

## Виділення ділянок, перспективних для пошуків первинного водню на території України (за даними 3D *P*-швидкісної моделі мантії)

**Т.О. Цветкова, І.В. Бугаєнко, Л.М. Заєць, 2024**

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна  
Надійшла 3 березня 2023 р.

Метою цієї роботи було виділення перспективних областей для пошуку первинного водню на території України з використанням 3D *P*-швидкісної моделі мантії під територією України та її оточенням на глибинах від 50—1700 км північніше 50° пн.ш. і до 2500 км південніше. Модель отримано з використанням даних бюлетенів ISC з 1964 р. вона має вигляд горизонтальних і вертикальних перетинів. Прояв водню на-самперед пов'язаний з виділенням шляхів міграції надглибинних флюїдів у мантії, тому подано їх короткий аналіз. Детальніше проаналізовано всі дев'ять надглибинних мантійних флюїдів, виділених на території України, їх швидкісні характеристики. Порівняння розташування трас проходження надглибинних флюїдів і швидкісної будови мантії досліджуваної території показало приуроченість цих трас до тектонічних активізованих зон. На підтвердження можливої наявності первинного водню у виділених трасах надглибинних мантійних флюїдів розглянуто карти щільності теплового потоку, карту температур на глибині 50 км, карту глибини залягання границі Мохо, карту щільності електропровідності та карту розломів Українського щита.

Проведено порівняльний аналіз карт розміщення надглибинних мантійних флюїдів і ділянок областей на території України з підвищеним тепловим потоком, підвищеною глибиною залягання границі Мохо, наявністю мантійних провідників і розломів. Узагальнення результатів порівняльного аналізу дало змогу виділити найперспективніші ділянки для пошуку первинного водню, що відповідають таким трасам надглибинних флюїдів: f12, північно-східна частина f3, південна частина f4 (район Дніпровсько-Донецької западини), південно-західна частина f1 (Західноукраїнський нафтогазоносний регіон) та f9 і f10 (Південнокримська нафтогазоносна провінція).

**Ключові слова:** тривимірна *P*-швидкісна модель, мантія, Україна, первинний водень, надглибинні флюїди.

**Вступ.** Водень — важливе альтернативне джерело енергії. Існують різні технологічні схеми його виробництва, що мають різні етапи розвитку: перша схема — електроліз води («зелений» водень, за термінологією ЄС); друга — паровий риформінг метану (MSR) і (або) автотермічний риформінг (ATR) — найсучасніша технологія отримання одержання водню («блакитного» згідно з термінологією ЄС); третя — на-

бір технічних рішень отримання водню з метану без доступу кисню (піроліз та інші методи) і, отже, без викидів CO<sub>2</sub>. Для виробництва водню використовується електроенергія з мережі або з відновлюваних джерел, таких як вітер та геотермальна енергія і у більш довгостроковій перспективі — сонячна енергія та біомаса. Граніти та гнейси архейського та палеопротерозойського (>1600 млн років) віку зазвичай

Citation: Tsvetkova, T.O., Bugaienko, I.V., & Zaiets, L.M. (2024). Selection of areas prospective for the search of primary hydrogen in the territory of Ukraine (based on the data of the 3D *P*-velocity model of the mantle). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(1), 3—15. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i1.298655>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

містять на порядок більше водню [Parnell, Blamey, 2017], що є також перспективним для отримання водню — подібні дані отримані в результаті холодного дроблення з метою виділення летючих флюїдних включень. На сьогодні частина водню виробляється з копалин, зокрема природного газу.

Існують гіпотези і спроби вивчення водню, сконцентрованого в ядрі і нижній мантії Землі в період її акреції та дегазації із надр зі змінною активністю, що пульсує в часі упродовж усього періоду існування (так званий первинний водень) [Шестопапов, 2020]. До вторинного відносять водень, сформований у земній корі та верхній мантії. Нині дедалі більше уваги приділяють пошукам величезної кількості газоподібного водню у вільному стані, що мігрує з надр Землі у двох основних формах: вільного газу  $H_2$  та у вигляді сполук із кремнієм — силіцидів. Сейсмічна томографія дає можливість встановити та проаналізувати можливі шляхи його міграції та накопичення в мантії для подальшого обґрунтування концепції пошуків. Нас цікавить первинний водень, проходження якого з ядра та нижньої мантії до корових структур у сейсмічній томографії асоціюється з надглибинними флюїдами [Цветкова и др., 2022].

Отже, мета роботи — виділення перспективних ділянок для пошуку водню на території України, тобто встановлення і аналіз можливих шляхів міграції надглибинних флюїдів. У статті використано 3D *P*-швидкісну модель мантії під територією України та її навколишнім середовищем з глибини від 50—1700 км північніше 50° пн.ш. до 2500 км південніше (рис. 1). Модель отримано з використанням даних бюлетенів ISC з 1964 р., її репрезентовано у вигляді горизонтальних і вертикальних перетинів. Горизонтальні перетини представлені з кроком 25 км за глибиною, вертикальні — з кроком 1°. Детальніше метод викладений в публікаціях [Гейко, 1997; Геуко, 2004], швидкісні моделі мантії під територією України — у статтях [Гейко и др., 2005, 2006; Старостенко и др., 2014; Цветкова и др., 2013, 2016, 2017, 2019, 2020а, б, 2022].

Як зазначено у публікаціях [Старостенко и др., 2011; Заец и др., 2012], за даними сейсмічної томографії проявом надглибинного флюїдного процесу є наявність субвертикальних швидкісних колонок, що визначаються чергуванням високо- і низькошвидкісних аномалій. У ролі газових потоків можуть бути як плюми, так і надглибинні флюїди. Сейсмічна візуалізація плюмів Східноєвропейської платформи детально описана у статті [Цветкова и др., 2019], де показані мантійні домени (ділянка, обмежена розтіканням головки плюму). На рис. 2 показано проєкції на поверхню виділених надглибинних флюїдів і плюмів. У цілому мантія під територією України знаходиться під впливом Північноазовського та Волино-Оршанського плюмів та ділянок областей їх розтікання (мантійних доменів) [Цветкова и др., 2017]. З огляду на те, що верхня мантія над центральною частиною Північноазовського (до глибини 525 км) і Волино-Оршанського мантійних доменів (до глибини 300 км) високошвидкісна та відсутні прояви виходу центральної ділянки флюїдного домену з нижньої мантії, можна припустити, що обидві зазначені центральні ділянки, які пов'язані з проявом плюмів, перебувають на стадії згасання (див. рис. 1). Центральні ділянки Північноазовського і Волино-Оршанського мантійних доменів належать до зон зчленування тектонічних структур. Північноазовський мантійний домен тяжіє до зчленування Хоперського мегаблока Воронезького кристалічного масиву (ВКМ) і Донбасу, Волино-Оршанський — до Курського мегаблока ВКМ, Оршанської западини (Волино-Оршанський авлакоген) і північно-західної частини Дніпровсько-Донецької западини. З огляду на те, що за визначенням плюми пов'язують з поширенням водню від нижньої мантії (можливо ядра) до кори, робимо висновок, що основними джерелами водню на території України можуть бути Північноазовський та Волино-Оршанський плюми. Центральні частини цих плюмів мають таку прив'язку на земній поверхні: Волино-Оршанський (30—33,5° сх.д., 52—54° пн.ш.), Північно-

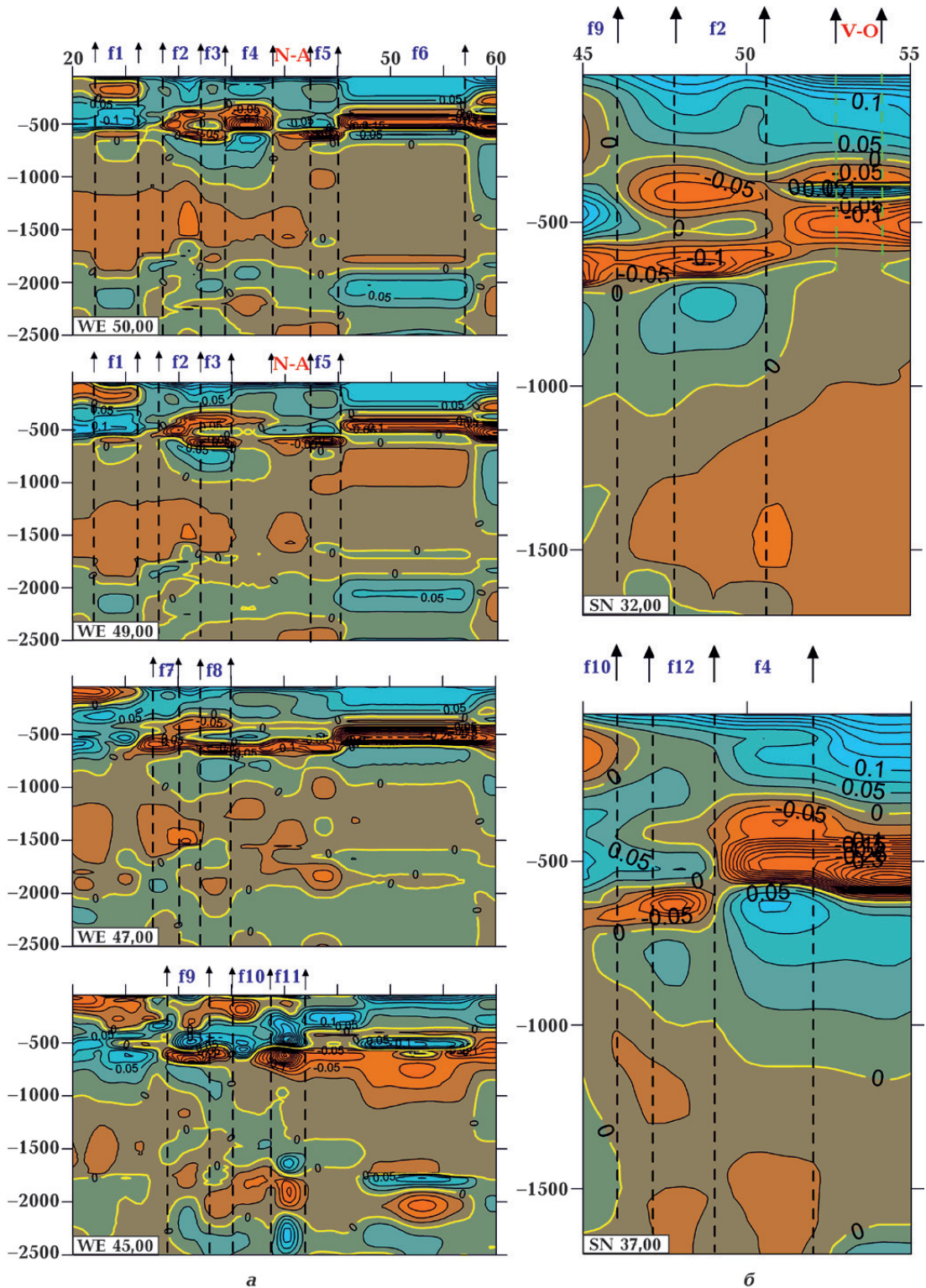


Рис. 1. Вертикальні перетини тривимірної  $P$ -швидкісної моделі мантії України, що демонструють шляхи міграції надглибинних флюїдів:  $a$  — широтні  $50^\circ$ ,  $49^\circ$ ,  $47^\circ$  та  $45^\circ$  пн.ш.,  $b$  — довготні  $32^\circ$  та  $37^\circ$  сх.д. Умовні позначення: V-O — Волино-Оршанський плюм; N-A — Північноазовський плюм, f1–f12 — надглибинні флюїди.

Fig. 1. Vertical cross-sections of the three-dimensional  $P$ -velocity model of the mantle of Ukraine, demonstrating the migration paths of super-deep fluids:  $a$  — latitudes  $50^\circ$ ,  $49^\circ$ ,  $47^\circ$  and  $45^\circ$  NL,  $b$  — longitudes  $32^\circ$  and  $37^\circ$  LE. Conventional designations: V-O — Volyn-Orsha plume, N-A — North Azov plume, f1–f12 — super-deep fluids.

азовський (39,5—42° сх.д., 48—54° пн.ш.). Ділянка розтікання зазначених плюмів покриває мантию під територією України, ВКМ і Прикаспію, зачіпаючи частину Білорусії [Цветкова и др., 2019]. На ділянках розтікання Північноазовського і Волино-Оршанського мантийних доменів виділено 12 надглибинних флюїдів, що поширюються зі значно глибинних геосфер Землі, ніж наявні виділені мантийні домени.

Детальний опис, шляхи міграції та проєкції надглибинних флюїдів (до складу яких входить і водень) наведено у публікації [Цветкова и др., 2017]. Дев'ять надглибинних флюїдів у мантиї під Україною

мають таку прив'язку на земній поверхні: флюїд 1 (25—27° сх.д., 49—52° пн.ш.), флюїд 2 (29—32,5° сх.д., 48—50,5° пн.ш.), флюїд 3 (32,5—35,5° сх.д., 48—50° пн.ш.), флюїд 4 (34—39,5° сх.д., 49—52° пн.ш.), флюїд 7 (29—30,8° сх.д., 46—48° пн.ш.), флюїд 8 (32,5—35,7° сх.д., 46—48° пн.ш.), флюїд 9 (30—33,6° сх.д., 44—46° пн.ш.), флюїд 10 (35,3—38,5° сх.д., 44—46° пн.ш.), флюїд 12 (36,2—39° сх.д., 47—48,8° пн.ш.) (див. рис. 1, 2).

**Результатом дегазації** є помірна активізація мантиї України [Шестопапов, 2020]. Вона відбувається в прикордонних областях під Східноєвропейською платформою та її оточенням як поширення в перехід-

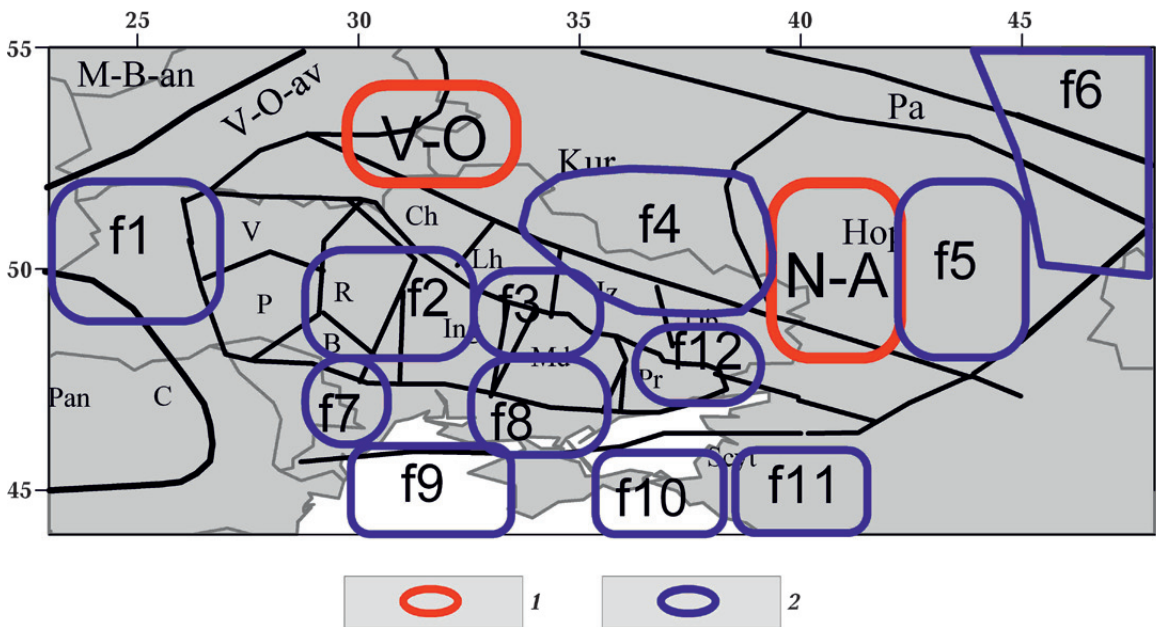


Рис. 2. Мантийні плюми і надглибинні флюїди досліджуваної території: 1 — плюми (V-O — Волино-Оршанський, N-A — Північноазовський), 2 — надглибинні флюїди (f1—f12) [Цветкова и др., 2017]; B — Бузький мегаблок Українського щита, C — Карпати, Ch — Чернігівський сегмент ДДЗ, Db — Донбаський сегмент ДДЗ, Inq — Інгільський мегаблок Українського щита, Iz — Ізюмський сегмент ДДЗ, Hop — Хоперський мегаблок ВКМ, Kur — Курський мегаблок ВКМ, Lh — Лохвицький сегмент ДДЗ, M-B-an — Мазуро-Білоруська антекліза, Md — Середньопридніпровський мегаблок Українського щита, P — Подільський мегаблок Українського щита, Pa — Пачелмський авлакоген, Pan — Паннонська западина, Pr — Приазовський мегаблок Українського щита, R — Росинський мегаблок Українського щита, Scyt — Скіфська плита, V — Волинський мегаблок Українського щита, V-O-av — Волино-Оршанський авлакоген.

Fig. 2. Mantle plumes and super-deep mantle fluids from the three-dimensional P-velocity model of the mantle: 1 — plumes (V-O — Volyn-Orsha and N-A — North-Azov), 2 — super-deep fluids (f1—f12) [Цветкова и др., 2017]; B — Bug megablock of the Ukrainian shield, C — Carpatian, Ch — Chernihiv segment of the DDD, Db — Donbass segment of DDD, Inq — Ingul megablock of the Ukrainian shield, Iz — Izyumsky segment of DDD, Hop — Hopper megablock of the Voronezh crystalline massif, Kur — Kursk megablock of the Voronezh crystalline massif, Lh — Lohvitsky segment of DDD, M-B-an — Mazuro-Belarusian antecleisis, Md — Middle Dnieper megablock of the Ukrainian Shield, P — Podolsk megablock of the Ukrainian shield, Pa — Pachelmsky avlakogen, Pan — Pannonian depression, Pr — Priazovsky megablock of the Ukrainian shield, R — Rosinsky megablock of the Ukrainian Shield, Scyt — Scythian plate, V — Volyn megablock of the Ukrainian shield, V-O-av — Volyn-Orsha avlakogen.

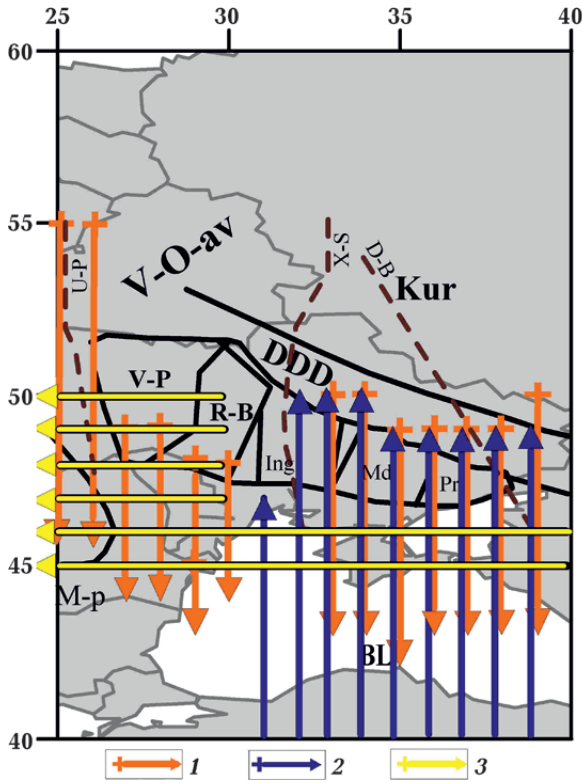


Рис. 3. Проекція високошвидкісних шарів верхньої мантії: 1 — високошвидкісні похилі шари верхньої мантії у напрямку північ—південь; 2 — високошвидкісні шари перехідної зони верхньої мантії; 3 — похилі шари в напрямку схід—захід; BL — Чорне море; D-B — тектонічна шовна зона Донецьк—Брянськ; DDD — Дніпровсько-Донецька западина; M-p — Мізійська плита; X-S — тектонічна шовна зона Херсон—Смоленськ. Інші умовні позначення див. на рис. 1.

Fig. 3. Projection of high-velocity layers of the upper mantle: 1 — high-velocity inclined layers of the upper mantle in the north-south direction; 2 — high-speed layers of the transition zone of the upper mantle; 3 — inclined layers in the east-west direction; BL — Black Sea; D-B — tectonic suture zone Donetsk—Bryansk; DDD — Dnieper-Donetsk depression; M-p — Mysia plate; X-S — tectonic suture zone Kherson—Smolensk. Conventional designations are the same as in Fig. 1.

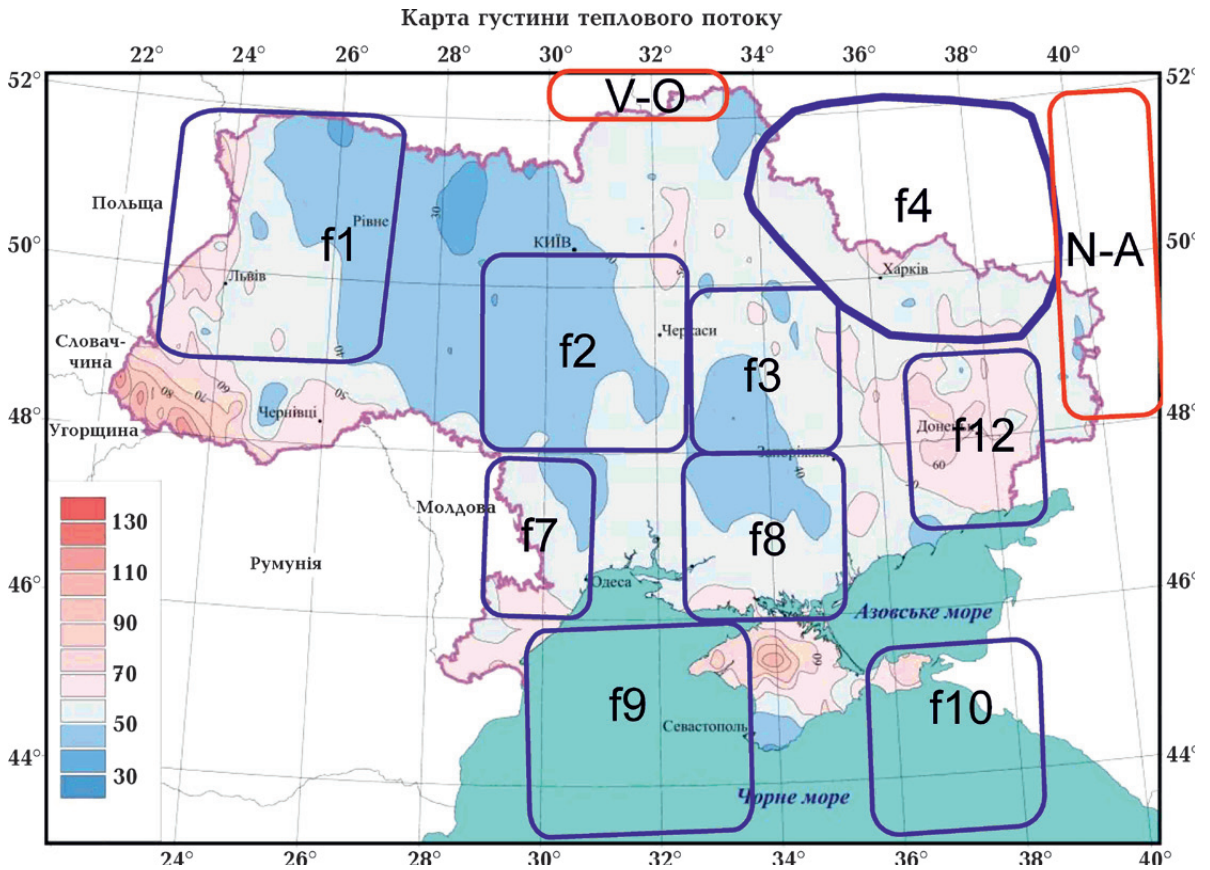


Рис. 4. Карта густини теплового потоку [Кутас, Гордиенко, 1971] з винесеними надглибинними флюїдами.

Fig. 4. Map of the heat flux density [Kutas, Gordienko, 1971] with removed super-deep fluids.

ній зоні мантійних структур з півдня (з боку Чорного моря) в структури мантії платформа, що виражається в наявності у швидкісній будові мантії похилих високошвидкісних шарів [Цветкова, Бугаєнко, 2012] (рис. 3). Слід зауважити, що похилі шари визначають окраїнні, ослабленні ділянки в мантії, по яких мігрують мантійні флюїди, зокрема і первинного водню. На рис. 3 виділено наступні похилі шари, що пов'язані: а) з Волинським і Подільським мегаблоками Українського щита (напрямок: зі сходу на захід); б) з поширенням з півночі на південь від північного околу мантії під Українським щитом у бік Чорного моря; в) із північно-західним і північно-східним шельфами Чорного моря.

За дальністю поширення мантійних шарів з півдня на північ (перехідна зона верхньої мантії під Чорним морем) під Україн-

ським щитом можна виділити три зони (рис. 3): а) центральну (32° сх.д.—34° сх.д.), що включає тектонічну шовну зону Херсон—Смоленськ, Інгуло-Криворізьку шовну зону та мантію під Інгульським мегаблоком; б) східну зону, що включає Придніпровський та Приазовський мегаблоки, а також Оріхів-Павлоградську шовну зону; в) західну зону, що включає Бузький, Волинський та Подільський мегаблоки, Волино-Оршанський авлакоген. Отже, за даними сейсмотомографії наявність похилих шарів у швидкісній будові мантії регіону, вплив мантійних структур перехідної зони верхньої мантії з півдня (Чорне море) підтверджують активізацію мантії під Українським щитом, Дніпровсько-Донецькою западиною та Кримом.

Крім виділених у мантії шляхів міграції флюїдів (або так званих флюїдних трас)

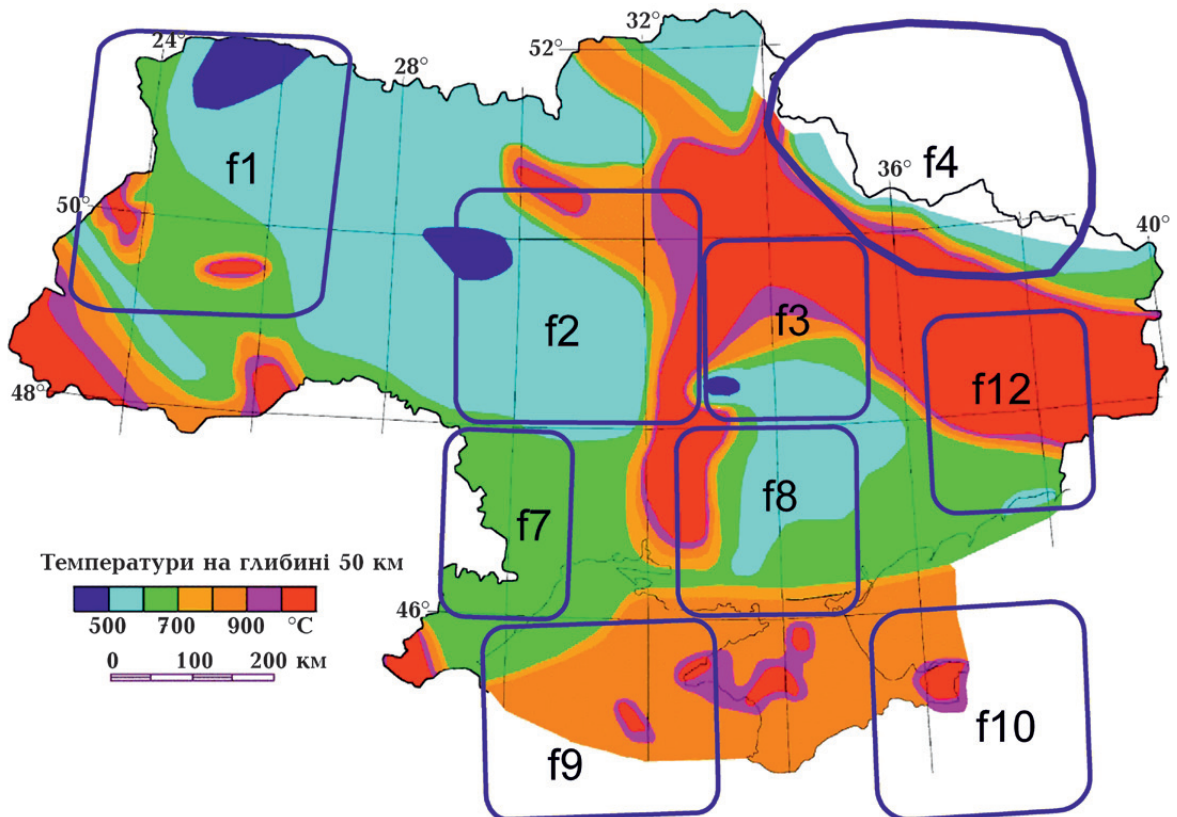


Рис. 5. Температура на глибині 50 км території України [Гордиєнко і др., 2004] з винесеними надглибинними флюїдами.

Fig. 5. Temperature at the depth of 50 km of the territory of Ukraine [Gordienko et al., 2004] with transported super-deep fluids.

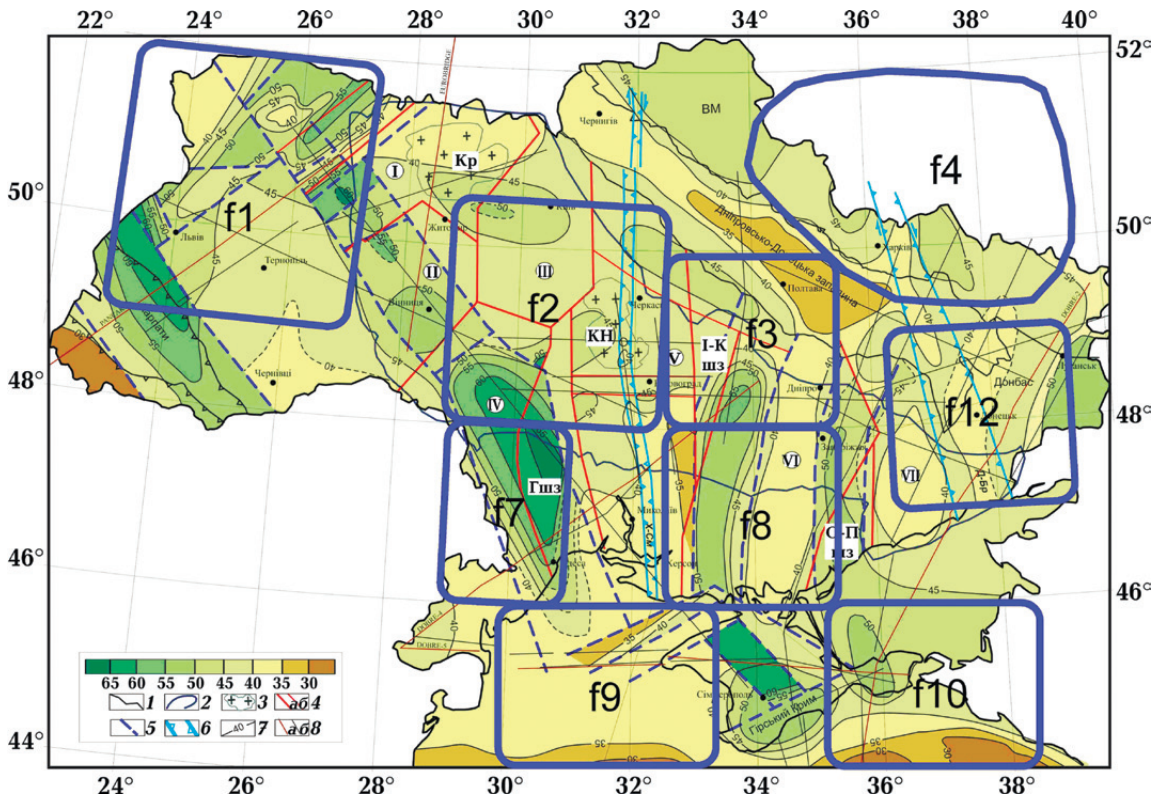


Рис. 6. Границя Мохо території України [Гинтов і др., 2018] з винесеними надглибинними флюїдами.  
 Fig. 6. The Moho boundary of the territory of Ukraine [Gintov et al., 2018] with transported super-deep fluids.

прояв водню пов'язується з підвищеним тепловим потоком, підвищеною електропровідністю та очікуваною підвищеною глибиною залягання границі Моховорича [Летников, 2003; Гуфельд, 2007]. Отже, розглянуто карту густини теплового потоку та карту температур на глибині 50 км (рис. 4, 5), карту глибини залягання границі Мохо (рис. 6), карту щільності електропровідності (рис. 7), карту розломів Українського щита (рис. 8). Виконано прив'язку цих даних до виділених трас надглибинних мантійних флюїдів з метою пошуку збігу (мова не йде про стовідсоткову кореляцію з огляду на не надто детальну систему спостережень на території України для побудови *P*-швидкісної моделі мантії [Бугаенко і др., 2015]). Як зазначено вище, надглибинні флюїди під територією України виділені з глибини 2500 до 50 км (мантія Землі). Як вони поширюються в корі Землі і до поверхні, дана сейсмотомографічна модель не показує.

На карті щільності теплового потоку (див. рис. 4) показано його максимальну щільність для ділянок трас f1 (у південно-західній частині), f7 (у південно-західній частині — 90–100 Вт/м·С°, f12 — 90–110 Вт/м·С°). Меншою щільністю теплового потоку характеризуються підзони надглибинних трас f2, f3, f8 — 40–60 Вт/(м·С°).

Розгляд карти температур на глибині 50 км (див. рис. 5) показує найвищі температури до 1000° у південно-західній частині ділянки траси f1, у крайній північно-східній частині f2, у північній частині f3, у південно-західній частині f4, у західній частині f8, майже на всій ділянці, де його досліджено у f9 та f10.

У зонах досліджуваних трас надглибинних флюїдів виділено підзони з підвищеною глибиною залягання границі Мохо: f9, f12, центральні частини f1, f2, досліджувана частина f4, східні частини f3, f8, південна частина f10.

Відповідно до карти аномалій електро-

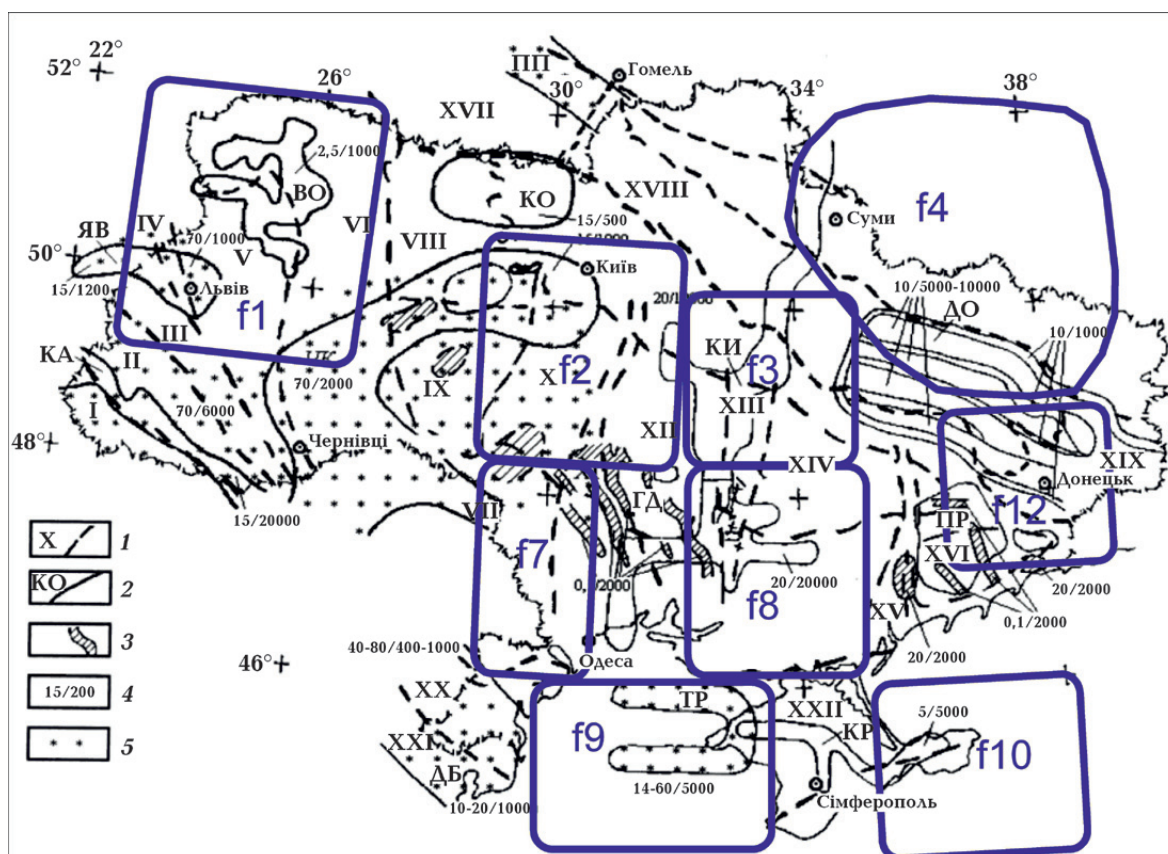


Рис. 7. Карта аномалій електропровідності у земній корі та верхній мантії на території України [Бурахович, Кулик, 2000] з винесеними надглибинними флюїдами: 1 — кордони тектонічних одиниць, їх номери, 2 — аномалії підвищеної електропровідності за даними МТЗ та МВП, 3 — Гайворон-Добровеличківська аномалія електропровідності, 4 — параметри аномалій (у чисельнику — глибина залягання покрівлі провідника, км, у знаменнику — значення інтегральної провідності), 5 — аномалії, спричинені мантійними провідниками.

Fig. 7. Map of anomalies of electrical conductivity in the Earth's crust and upper mantle on the territory of Ukraine [Burakhovych, Kulyk, 2000] with transported super-deep fluids: 1 — cordons of tectonic units and their numbers, 2 — anomalies of advanced electrical conductivity based on MTS and MVP data, 3 — Gayvoron-Dobrovelichkovska electrical conductivity anomaly, 4 — parameters of anomalies (numerator is the depth of the conductor cover, km, denominator is the integral conductivity), 5 — anomalies caused by mantle conductors.

провідності (див. рис. 7) виділені ділянки аномалій пов'язані з мантійними провідниками, що відповідають трасам надглибинних флюїдів — f1, f2, f9, f7. Звернено увагу і на систему розломів у межах Українського щита (див. рис. 8). Виділені зони трас проходження надглибинних флюїдів співвідносяться з шовними зонами та розломами.

Узагальнення результатів порівняльного аналізу доводить, що найперспективнішими ділянками для пошуку первинного водню є ділянки, що відповідають наступним трасам надглибинних флюїдів: f12,

північно-східна частина f3, південна частина f4 (район Дніпровсько-Донецької западини), південно-західна частина f1 (район Західноукраїнського нафтогазоносного регіону) та f9 і f10 (район Південнокримської нафтогазоносної провінції).

Слід також зазначити узгодженість отриманих результатів і відомих нафтогазових родовищ Західноукраїнського нафтогазоносного регіону, Східного нафтогазоносного регіону (Дніпровсько-Донецької западини) та Південнокримської нафтогазоносної провінції, у яких серед інших газів наявний і водень. Наприклад, у Ан-



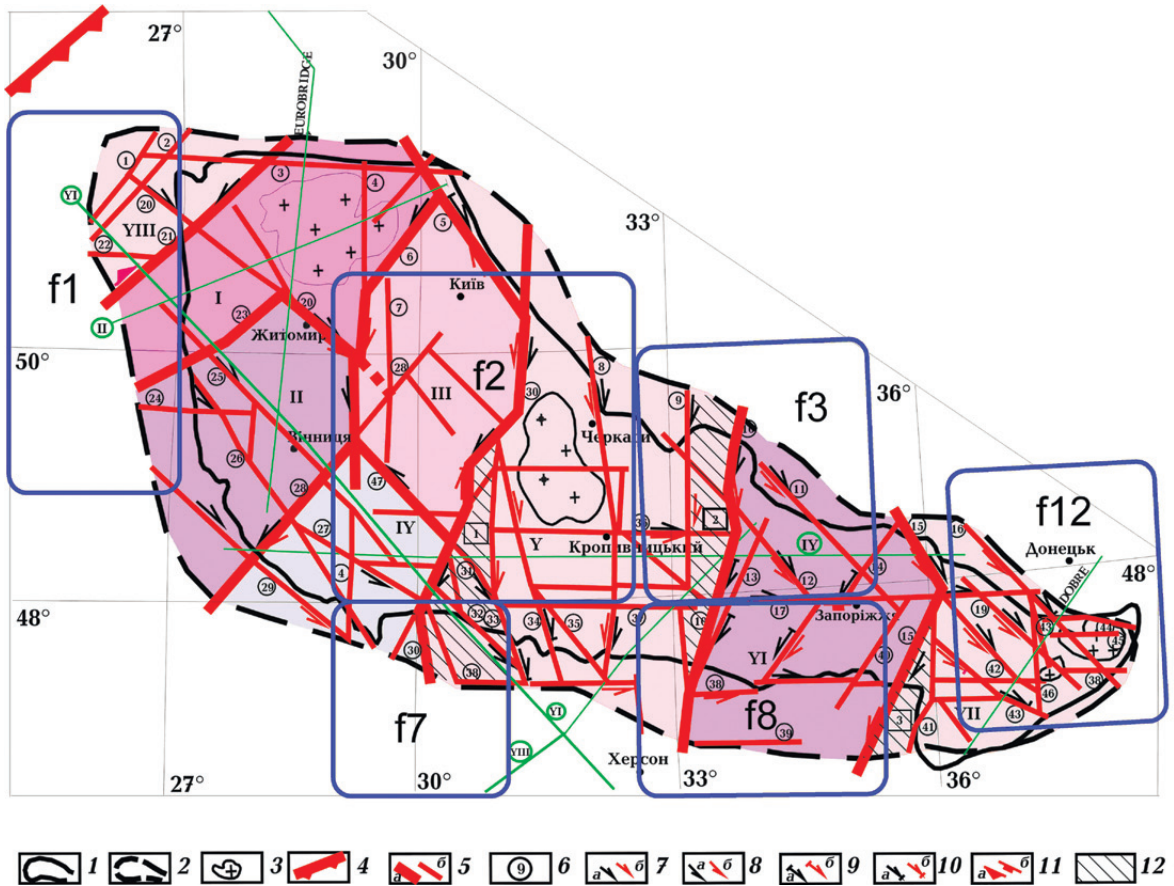


Рис. 8. Розломи Українського щита [Гинтов и др., 2018] з винесеними областями трас надглибинних флюїдів: 1 — контур відслоненої частини щита; 2 — контур схилів щита, в межах яких простежуються складчасті та розривні структури докембрійського фундаменту за геофізичними даними; 3 — плутони і великі інтрузивні масиви гранітоїдів; 4 — межа між Сарматією і Фенноскандією; 5 — зони розломів: (а — міжмегаблокові, б — внутрішньомегаблокові); 6 — номери зон розломів; 7—11 — кінематичні знаки (7 — правий зсув (а — під час закладання, б — під час головної фази активізації); 8 — лівий зсув (а і б — те саме, що і в п. 7); 9 — підкидо-зсув (а і б — те саме, що і в п. 7); 10 — скидо-зсув (а і б — те саме, що і в п. 7); 11 — підкид (а) і скид (б)); 12 — шовні зони (цифри в квадратиках): 1 — Голованівська, 2 — Інгулецько-Криворізька, 3 — Орхів-Павлоградська.

Fig. 8. Faults of the Ukrainian shield [Gintov et al., 2018] with outcrop areas of super-deep fluid tracks: 1 — contour of the exposed part of the shield; 2 — the contour of the slopes of the shield, within which the folded and discontinuous structures of the Precambrian basement can be traced according to geophysical data; 3 — plutons and large intrusive massifs of granitoids; 4 — the border between Sarmatia and Fennoscandia; 5 — fault zones: (a — inter-megablock, b — intra-megablock); 6 — numbers of fault zones; 7—11 — kinematic signs (7 — dextral strike — slip fault (a — during laying, b — during the main phase of activation); 8 — sinistral strike-slip fault (a and b — the same as in point 7); 9 — reverse strike-slip fault (a and b — the same as in point 7); 10 — normal strike-slip fault (a and b — the same as in point 7); 11 — reverse strike (a) and normal strike (b)); 12 — seam zones (numbers in squares): 1 — Golovanivska, 2 — Inguletsko-Kryvorizka, 3 — Orikhiv-Pavlogradska.

дріяшівському нафтогазовому родовищі Сумської області вміст водню у свердловині сягає 24 %, а у Бакумівському родовищі Полтавської області — до 18 %.

**Висновок.** Умовою дегазації визначено наявність активізації мантії, про що свід-

чить наявність похилих шарів у мантії, поширення високошвидкісного шару перехідної зони верхньої мантії від південних структур (з боку Чорного моря) на північ, підвищений тепловий потік під Українським щитом, Дніпровсько-Донецькою

западиною та Кримом. Порівняння розташування шляхів міграції надглибинних флюїдів (трас) та швидкісної будови мантії розглянутої території показало приуроченість їх до тектонічних активізованих зон. З огляду на наведені вище дані зроблено висновок, що основними джерелами водню можуть бути Північноазовський та Волино-Оршанський пліуми. Аналізуючи їх області розтікання можна стверджувати, як мінімум, про наявність там вторинного водню. На підтвердження наявності водню у виділених трасах надглибинних мантійних флюїдів розглянуто карти щільності теплового потоку, карту температур на глибині 50 км, карту глибини залягання границі Мохо, карту щільності електропровід-

ності та карту розломів Українського щита та проведено просторове зіставлення зі шляхами міграції надглибинних мантійних флюїдів. У результаті проведеного аналізу найперспективнішими ділянками в Україні на наявність первинного водню визнано три, що відповідають відомим нафтогазовим родовищам Західноукраїнського і Східного (Дніпровсько-Донецька западина) нафтогазоносних регіонів та Південно-кримської нафтогазоносної провінції. Дані результати є підтвердженням можливого мантійного генезису (від нижньої мантії до кори) родовищ водню. Для остаточного розгляду питання локалізації родовищ водню необхідно проведення як геофізичних, так і геохімічних досліджень в корі.

### Список літератури

- Бугаєнко І.В., Заєц Л.Н., Цветкова Т.А. Скоростная типизация средней и нижней мантии Европы. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 3. С. 88—101. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111104>.
- Бурахович Т.К., Кулик С.Н. Модель электропроводности земной коры Украины. *Физика Земли.* 2000. № 10. С. 48—56.
- Гейко В.С. Тейлорово приближение волнового уравнения и уравнения эйконала в обратных сейсмических задачах. *Геофиз. журн.* 1997. Т. 19. № 3. С. 48—68.
- Гейко В.С., Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаєнко І.В., Заєц Л.Н. Региональная 3D P-скоростная модель мантии Сарматии (юго-запад Восточно-Европейской платформы). *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 927—939.
- Гейко В.С., Шумлянская Л.А., Бугаєнко І.В., Заєц Л.Н., Цветкова Т.А. Трёхмерная модель верхней мантии Украины по временам прихода P-волн. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 1. С. 3—16.
- Гинтов О.Б., Орлюк М.И., Ентин В.А., Пашкевич И.К., Мычак С.В., Бакаржиева М.И., Шимкив Л.М., Марченко А.В. Структура западной и центральной частей Украинского щита. Спорные вопросы. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 6. С. 3—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Усенко О.В. *Геотермический атлас Украины*. Киев, 2004. 60 с.
- Гуфельд И.Л. *Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты*. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Заєц Л.Н., Као Динг Тру, Цветкова Т.А. Скоростное строение мантии и сверхглубинные флюиды Юго-Восточной Азии. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 108—127. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116760>.
- Кутас Р.И., Гордиенко В.В. *Тепловое поле Украины*. Киев: Наук. думка, 1971. 112 с.
- Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли. *Докл. РАН.* 2003. Т. 390. № 5. С. 673—675.
- Старостенко В.И., Лукин А.Е., Цветкова Т.А., Заєц Л.Н., Донцов В.В., Савиных Ю.В. Об участии суперглубинных флюидов в нефтигенезе (по данным изучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр). *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 4. С. 3—32. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011.116893>.
- Старостенко В.И., Лукин А.Е., Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А. Геофлюиды и современ-

- ное проявление активизации Ингульско-го мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 5. С. 3—25. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В. Сейсмотомография мантии под Восточно-Европейской платформой: мантийные скоростные границы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 161—179. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116672>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Главная геодинамическая граница и сейсмическая визуализация плюмов Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 1. С. 137—152. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158868>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 4. С. 42—54. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Сейсмічна томографія мантиї та родовища первинного водню на території Дніпровсько-Донецької западини. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 3. С. 44—55. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.261967>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Скоростная делимость мантии под Украинским щитом. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 4. С. 75—87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Скоростное строение под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением. Часть I. *Геофиз. журн.* 2020а. Т. 42. № 2. С. 71—85. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201742>.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Скоростное строение под Днепровско-Донецкой впадиной и ее окружением. Часть II. *Геофиз. журн.* 2020б. Т. 42. № 3. С. 147—163. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204706>.
- Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Мантия под КРР и смежными территориями. В кн.: *Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых*. Киев: Прастьє Луды, 2013, С. 100—109.
- Шестопалов В.М. О геологическом водороде. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 6. С. 3—35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278>.
- Geyko, V.S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Геофиз. журн.* Т. 26. № 1. С. 3—32.
- Parnell, J., & Blamey, N. (2017). Global hydrogen reservoirs in basement and basins. *Geochemical Transactions*, 18(2). <https://doi.org/10.1186/s12932-017-0041-4>.

## Selection of areas prospective for the search of primary hydrogen in the territory of Ukraine (based on the data of the 3D *P*-velocity model of the mantle)

**T.O. Tsvetkova, I.V. Bugaienko, L.M. Zaiets, 2024**

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

The work aimed to identify promising areas for the search for primary hydrogen in Ukraine using a 3D *P*-velocity model of the mantle under Ukraine and its surroundings. The work uses a 3D *P*-velocity model of the mantle under the territory of Ukraine and its surroundings from a depth of 50 to 1700 km north of 50° NL and up to 2500 km to the south. The model is derived using ISC bulletin data from 1964 and is presented as horizontal and vertical cross-sections.

Since the manifestation of hydrogen is primarily associated with the release of ultra-deep fluid tracks in the mantle, a brief analysis of them was presented. A detailed analysis of all nine superdeep mantle fluids isolated on the territory of Ukraine and their velocity characteristics was carried out. A comparison of the location of the routes of passage of superdeep fluids and the velocity structure of the mantle of the considered territory showed that they are confined to tectonically activated areas. In order to confirm the possible presence of primary hydrogen in selected tracks of superdeep mantle fluids, heat flow density maps, a temperature map at a depth of 50 km, a map of the depth of the Moho boundary, a conductivity density map, and a fault map of the Ukrainian Shield were considered.

A comparative analysis of maps of the location of superdeep mantle fluids and regions on the territory of Ukraine with increased heat flow, increased depth of the Moho boundary, and the presence of mantle conductors and faults was carried out. Summarizing the results of the comparative analysis, the most promising areas for the search for primary hydrogen were selected, corresponding to the following routes of superdeep fluids: f12, the northeastern part of f3, the southern part of f4 (the area of the Dnipro-Donetsk basin), the southwestern part of f1 (the area of the Western Ukrainian oil and gas-bearing region) and f9 and f10 (region of the South Crimean oil and gas-bearing province).

**Key words:** three-dimensional  $P$ -velocity model, mantle, Ukraine, primary hydrogen, superdeep fluids.

## Reference

- Bugaenko, I.V., Zaets, L.N., & Tsvetkova, T.A. (2015). Velocity typing the middle and lower mantle of Europe. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(3), 88—101. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111104> (in Russian).
- Burahovich, T.K., & Kulik, S.N. (2000). Model of electrical conductivity of the earth's crust of Ukraine. *Fizika Zemli*, (10), 48—56 (in Russian).
- Geyko, V.S. (1997). Taylor approximation of the wave equation and the eikonal equation in inverse seismic problems. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 19(3), 48—68 (in Russian).
- Geyko, V.S., Tsvetkova, T.A., Shumlyanskaya, L.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2005). Regional 3D  $P$ -velocity model of the Sarmatian mantle (south-west of the East European platform). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 27(6), 27—39 (in Russian).
- Geyko, V.S., Shumlyanskaya, L.A., Bugaenko, I.V., Zaets, L.N., & Tsvetkova, T.A. (2006). Three-dimensional model of the upper mantle of Ukraine from the times of arrival of  $P$ -waves. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 28(1), 3—16 (in Russian).
- Gintov, O.B., Orlyuk, M.I., Entin, V.A., Pashkevich, I.B., Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Shimkiv, L.M., & Marchenko, A.V. (2018). The structure of the Western and Central parts of the Ukrainian shield. Controversial issues. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(6), 3—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000> (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavhorodnyaya, O.V., Logvinov, I.M., Tarasov, V.N., & Usenko, O.V. (2004). *Geothermal Atlas of Ukraine*. Kiev, 60 p. (in Russian).
- Gufeld, I.L. (2007). *Seismic process. Physico-chemical aspects*. Korolev: TsNIIMash Publ., 160 p. (in Russian).
- Zayets, L.N., Kao, D.T., & Tsvetkova, T.A. (2012). Velocity structure of the mantle and abyssal fluids of Southeast Asia. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(4), 108—127. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116760> (in Russian).
- Kutas, R.I., & Gordienko, V.V. (1971). *Heat field of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka, 112 p. (in Russian).
- Letnikov, F.A. (2003). Superdeep Fluid Systems of Earth. *Doklady RAN*, 390(5), 673—675 (in Russian).
- Starostenko, V.I., Lukin, A.E., Tsvetkova, T.A., Zaets, L.N., Dontsov, V.V., & Savinykh, Y.V. (2011). On the participation of super-deep fluids in naphthyogenesis (according to the study of the unique oil deposit of the White Tiger). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(4), 3—32. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011.116893> (in Russian).

- Starostenko, V.I., Lukin, A.E., Tsvetkova, T.A., & Shumlyanskaya, L.A. (2014). Geofluids and up-to-date display of activation of the In-gul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36(5), 3—25. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567> (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., & Bugaenko, I.V. (2012). Seismotomography of the mantle under the East European platform: mantle velocity boundaries. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(5), 161—172. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116672> (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2019). The main geodynamic border and seismic visualization of plumes under the East European Platform. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(1), 137—152. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158868> (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2017). Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 39(4), 42—54. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506> (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2022). Seismic tomography of the mantle and primary hydrogen deposits on the territory of the Dnieper-Donets depression. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(3), 44—55. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.261967> (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2016). Velocity divisibility of the mantle beneath the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(4), 75—87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802> (in Russian).
- Tsvetkova, T., Bugaenko, I., & Zaets, L. (2020a). Speed structure of the mantle under the Dnieper-Donets Depression and its surroundings. Part I. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(2), 71—85. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201742> (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2020b). Speed structure of the mantle under the Dnieper-Donets depression and its surroundings. Pt. II. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 145—161. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204706> (in Russian).
- Tsvetkova, T.A., Shumlyanskaya, L.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2013). The mantle under the KRR and adjacent territories. In *The Kirovograd Ore Area. Deep structure. Tectonophysical analysis. Ore deposits* (pp. 100—109). Kiev: Prastye Ludy (in Russian).
- Shestopalov, V.M. (2020). On geological hydrogen. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(6), 3—35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278> (in Russian).
- Geyko, V.S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 26(1), 3—32.
- Parnell, J., & Blamey, N. (2017). Global hydrogen reservoirs in basement and basins. *Geochemical Transactions*, 18(2). <https://doi.org/10.1186/s12932-017-0041-4>.