

М.В. Лубков

## СУЧАСНІ ГОРИЗОНТАЛЬНІ РУХИ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

На основі варіаційної скінченноелементної методики, розробленої для в'язкопружних багат шарових оболонок, а також з урахуванням GPS-даних щодо внутрішньоплитних горизонтальних рухів проведено чисельне моделювання стійких сучасних горизонтальних рухів земної кори в межах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) у системі відліку ETRS89, яка жорстко зв'язана з Євразійською континентальною літосферною плитою. За результатами моделювання, для всього розглянутого регіону сучасні горизонтальні рухи земної кори мають приблизно однакову північно-західну спрямованість. Водночас інтенсивність сучасних горизонтальних рухів земної кори в регіоні не є однозначною. Найінтенсивніші горизонтальні рухи характерні для південного сходу ДДЗ і прилеглої до неї зони Українського щита. Тут амплітуди горизонтальних швидкостей сягають 3–3,5 мм/рік. По мірі просування на північний захід інтенсивність горизонтальних рухів поступово знижується до 1–1,5 мм/рік. Разом з тим у прилеглий до ДДЗ на північному сході зони Воронежського кристалічного масиву інтенсивність цих рухів різко знижується до 0,5–1 мм/рік.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, сучасні горизонтальні рухи, Дніпровсько-Донецька западина.

**Вступ.** Дніпровсько-Донецька западина (ДДЗ) розташована на українській частині Східноєвропейської континентальної плити. На стратиграфічному рівні ДДЗ – це система зближених різноспрямованих субвертикальних глибинних розломів, які простягаються у субширотному напрямку з південного сходу на північний захід і утворюють смугу опущених по зазначених порушеннях тектонічних блоків кристалічного фундаменту. Зона ДДЗ простягається майже на 700 км, при цьому її ширина змінюється від 100 до 150 км. ДДЗ розділяє Український щит (УЩ) і Воронежський кристалічний масив (ВКМ). На північному заході ДДЗ межує з Прип'ятським прогином (ПП), на південному сході – з Донецьким складчастим спорудженням (ДСС). ДДЗ має багату геологічну історію, пов'язану з її рифтовим утворенням на герцинському етапі і подальшою еволюцією у тектонічних умовах, що корелювалася з режимом розвитку палеоокеанів (Палеоуральського, Палеотетису, Тетису та ін.), які розміщувалися за периметром Східноєвропейської дорифейської континентальної плити [3, 8]. У новітній період історії ДДЗ разом з іншою українською частиною Східноєвропейської континентальної плити зазнає насування з боку Північнокавказько-Кримського складчастого поясу – релікту Палеотетису [3]. У свою чергу, сучасна тектоніка всього Східносередземноморського регіону від Північної Африки і Аравійського півострова на півдні до південного схилу Східноєвропейської континентальної плити на півночі, включаючи Північнокавказько-Кримський складчастий пояс, визначається колізією Аравійської та Африканської плит з Євразійською плитою [15]. Глобальний аналіз даних щодо руху літосферних плит [19] показує, що відносно Євразійської плити Аравійська плита рухається у

північно-західному напрямку зі швидкістю близько 18–25 мм/рік. Африканська плита рухається відносно Євразійської плити на північ зі швидкістю приблизно ~10 мм/рік, що зумовлює лівостороннє зрушення уздовж зони розломів Мертвого моря. Просування Аравійської плити на північ приводить до формування гірського спорудження Загросу в Ірані та високогірних плато Східної Туреччини, а також до росту гірських споруджень Малого та Великого Кавказу.

Сучасні методи космічної геодезії дають змогу оперативно одержувати високоточні дані щодо переміщення земної поверхні. Визначення координат за допомогою глобальної позиційної системи GPS забезпечує міліметрову точність положень і надійні оцінки швидкостей переміщень пунктів прийому супутникових сигналів. Завдяки цій точності сучасні тектонічні рухи та відповідні процеси деформування у верхній літосфері досліджують у різних регіонах нашої планети [13, 16, 17, 19, 20]. Важливу інформацію, зокрема, несуть дані щодо сучасних горизонтальних рухів земної кори. Ці дані важливі не лише із суто наукової точки зору, оскільки відображують процеси регіональної тектонічної активності на певному етапі розвитку. Вони також мають важливе народногосподарське значення, наприклад, для розміщення великих технічних будівель і споруджень. У статті на основі варіаційної скінченноелементної методики, розробленої для в'язкопружних багат шарових оболонок, а також з урахуванням GPS-даних щодо внутрішньоплитних горизонтальних рухів проведено чисельне моделювання сучасних горизонтальних рухів земної кори у межах ДДЗ, у системі відліку ETRS89, яка жорстко зв'язана з Євразійською континентальною літосферною плитою.

**Дані GPS-спостережень про горизонтальні рухи земної кори у межах ДДЗ.** Чотири GPS-станції, які розміщені у Харкові, Полтаві, Києві та Чернігові поряд з 6 GPS-станціями, розташованими на території України, входять до складу Європейської системи перманентної мережі Глобальних навігаційних систем (EUREF Permanent GNNS Network). Опорними вважають станції, спостереження на яких виконують не менше 5 років з високою точністю вимірюваних положень ( $< 1,0$  см). На цей час лише дві GPS-станції України, київська і полтавська, мають статус опорних. Служба EUREF, у свою чергу, є регіональною підсистемою глобальної служби IGS (International GPS Service) [14]. Дані спостережень цих станцій обробляють у відповідних локальних центрах аналізу (LAC) і центральному бюро EPN (<http://www.epncb.oma.be/center/analysis>). Служба EUREF через мережу INTERNET дає користувачам широкий набір даних для виконання багатьох досліджень, зокрема, дані щодо зміни координат станцій у системі ETRS89 – Європейській земній системі відліку 1989 (European Terrestrial Reference System 1989). Ця система є геоцентричною декартовою геодезичною системою координат, у якій Євразійська плита як єдине ціле є нерухомою. Система ETRS89 збігалася із глобальною земною системою ITRS на епоху 1989,0 і була прив'язана до стабільної частини Євразійської плити. З 1989 р. системи ETRS89 і ITRS розходяться внаслідок континентального дрейфу зі швидкістю 2,5 см/рік. Координати та карти на території Європи, які ґрунтуються на системі ETRS89, не піддаються змінюванню через континентальний дрейф. Зі способу побудови цієї системи виходить, що

швидкості пунктів у ній являють собою “внутрішньоплитні” швидкості регіонального або локального характеру.

Оскільки нас цікавлять сучасні горизонтальні рухи в межах ДДЗ, потрібно вибрати інформацію про стійкі зміни горизонтальних координат відповідних GPS-станцій у системі ETRS89. Результатом повної багатоступеневої обробки безперервних даних [1], які надходять з GPS-станцій, є згладжені часові серії змін координат у системі ETRS89. Графіки згладжених часових рядів, які відображують змінювання координат для кожної із станцій, що входять у службу EUREF, можна знайти на сайті ([http://www.epncb.oma.be/\\_dataproduts/products/timeseriesanalysis/residual.php/](http://www.epncb.oma.be/_dataproduts/products/timeseriesanalysis/residual.php/)).

Як видно з рис. 1, в усіх випадках простежуються довгострокові тренди горизонтальних швидкостей у відповідних напрямках, що дає змогу робити висновки щодо відносної стійкості розглянутих внутрішньоплитних рухів. Нижче наведено координати пунктів цих станцій та їх осереднені компоненти горизонтальних швидкостей: а) Київ – довгота ( $30,5^\circ$  E), широта ( $50,4^\circ$ ),  $V_N$  (0,10 мм/рік),  $V_E$  ( $-1,31$  мм/рік); б) Полтава – довгота ( $34,6^\circ$  E), широта ( $49,6^\circ$ ),  $V_N$  (0,42 мм/рік),  $V_E$  ( $-1,74$  мм/рік); в) Чернігів – довгота ( $31,5^\circ$  E), широта ( $51,5^\circ$ ),  $V_N$  (0,16 мм/рік),  $V_E$  ( $-1,29$  мм/рік); г) Харків – довгота ( $36,2^\circ$  E), широта ( $50,0^\circ$ ),  $V_N$  (0,36 мм/рік),  $V_E$  ( $-0,86$  мм/рік).

**Побудова механічної моделі та її чисельна реалізація.** Ґрунтуючись на осереднених даних геологічних розрізів земної кори, наведених у статті [7], для профілів, що перетинають Чернігівський, Лохвицький, Полтавський та Ізюмський мегаблоки ДДЗ, побудуємо тривимірну в'язко-

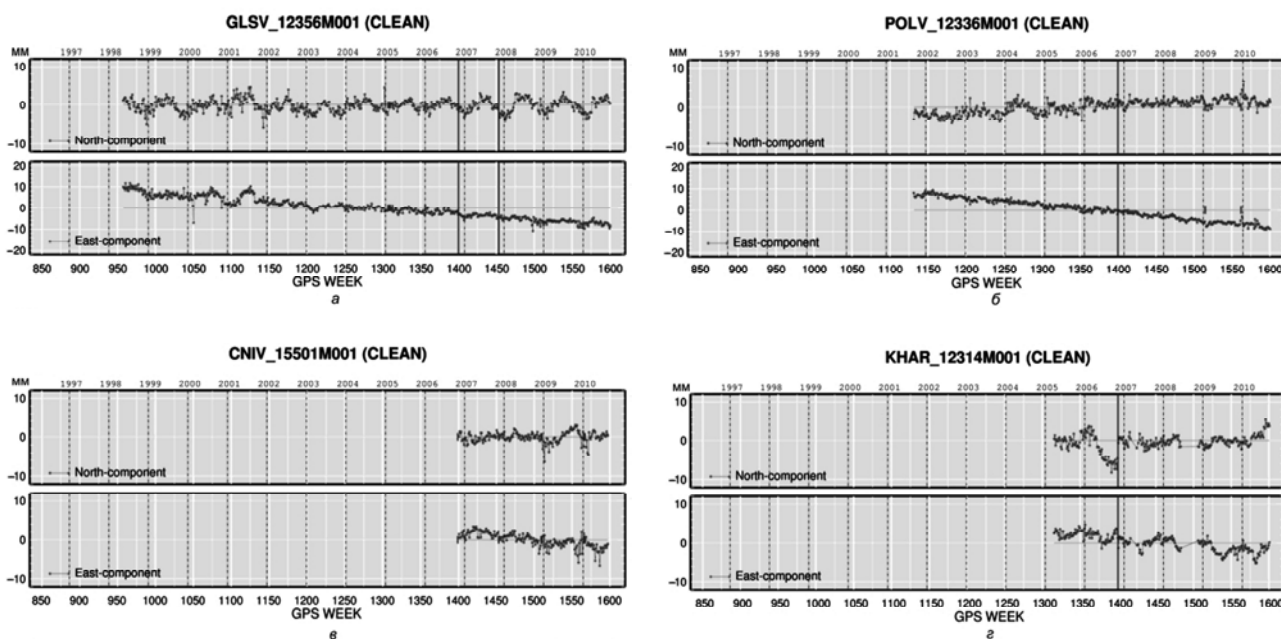


Рис. 1. Часові горизонтальні змінювання координат GPS-пунктів на території ДДЗ у системі ETRS89: а – у Києві, б – Полтаві, в – Чернігові, г – Харкові

пружну модель горизонтального внутрішньоплитного руху земної кори у регіоні. Розглянемо тришаровий півпростір, що складається з центральної області – довжина 640, ширина 100 км, що належить безпосередньо до ДДЗ (вісь симетрії цієї області приблизно збігається з віссю симетрії западини). З півночі та півдня до цієї області приймають дві області такої самої довжини та ширини, що представляють відповідно зони ВКМ і УЩ. Вважатимемо, що верхній шар земної кори, області ДДЗ завтовшки 10 км, складається з осадових порід, середній шар завтовшки 10 км – з діоритів, нижній шар завтовшки 15 км – з базальтів. Верхній шар земної кори, зони ВКМ, завтовшки 15 км складається з гранітів, середній шар завтовшки 22 км – з діоритів, нижній шар завтовшки 8 км – з базальтів. Верхній шар земної кори, зони УЩ, завтовшки 12 км складається з гранітів, середній шар завтовшки 25 км – з діоритів, нижній шар завтовшки 8 км – з базальтів. За даними робіт [2, 12], для осадових порід, гранітів, діоритів, базальтів виберемо відповідно такі осереднені механічні характеристики: а) густина: 2500, 2650, 2800, 2950 (кг/м<sup>3</sup>); б) модуль Юнга: 4,0; 5,5; 6,5; 7,5 ( $\times 10^{10}$  Па); в) модуль зсуву: 2,0; 3,0; 3,5; 3,0 ( $\times 10^{10}$  Па); г) коефіцієнт Пуассона: 0,22; 0,25; 0,25; 0,25; д) динамічна в'язкість: 2,0; 9,0; 9,0; 9,0 ( $\times 10^{20}$  Па·с). Далі задамо розподіл горизонтальних швидкостей на бокових межах розглянутого півпростору в такий спосіб, щоб розрахункове поле горизонтальних швидкостей півпростору узгоджувалось з горизонтальними швидкостями пунктів GPS-станцій, розташованих у ДДЗ. Для моделювання механічної поведінки розглянутого півпростору скористаємося теорією багат шарових в'язкопружних оболонок [4, 11]. Розглянемо ортотропні оболонки у криволінійній системі координат  $(s, \varphi, z)$ . Тут  $s, \varphi$  – координати уздовж поверхні оболонки;  $z$  – координата за товщиною оболонки. Переміщення уздовж координат  $s, \varphi, z$  для  $j$ -го шару оболонки можуть бути представлені у вигляді

$$\begin{aligned} u_j &= u_0(s, \varphi) + z u_1(s, \varphi); \\ v_j &= v_0(s, \varphi) + z v_1(s, \varphi); \\ w_j &= w_0(s, \varphi) + z w_1(s, \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $u_0, v_0, w_0$  – компоненти переміщення середньої поверхні оболонки;  $u_1, v_1$  – кути повороту нормалі до середньої поверхні відносно координатних ліній;  $\varphi = \text{const}, s = \text{const}$  відповідно;  $w_1$  – обчислення нормального елемента до середньої поверхні оболонки.

Деформування розглянутого півпростору під впливом руху його бокових меж є повільним устаткованим урівноваженим процесом, протягом якого перехідними стадіями можна знехтувати. Отже, повільний нестационарний процес дефор-

мування півпростору можна умовно розглядати як урівноважений процес повільних гармонічних (квазістационарних) коливань. В цьому випадку часову залежність можна врахувати на основі переходу в частотний простір, з огляду на що диференціювання за часом може бути замінено множенням на  $i\omega$ , де  $i$  – уявна одиниця,  $\omega$  – частота квазістационарних коливань [9]. Взявши характерну циклічну частоту повільного встановленого процесу деформування півпростору за  $\omega$ , на основі теорії багат шарових в'язкопружних ортотропних оболонок складемо комплексний функціонал Лагранжа [5, 18], що виражає повну механічну енергію півпростору, який перебуває в умовах квазістационарного навантаження у криволінійній системі координат  $(s, \varphi, z)$ :

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \iint_{h_j, S} [E_{ss}^j \varepsilon_{ss}^{j2} + E_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^{j2} + E_{zz}^j \varepsilon_{zz}^{j2} + 2E_{s\varphi}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j + \\ &+ 2E_{sz}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{zz}^j + 2E_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{zz}^j + 4\tilde{G}_{s\varphi}^j \varepsilon_{s\varphi}^{j2} + 4\tilde{G}_{sz}^j \varepsilon_{sz}^{j2} + 4\tilde{G}_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi z}^{j2} + \\ &+ \omega^2 \rho_j (u_j^2 + v_j^2 + w_j^2)] \left(1 + \frac{z}{R_3}\right)^2 ds d\varphi dz - \\ &- \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (T_s u_0 + T_{s\varphi} v_0) d\varphi - \int_{s_1}^{s_2} (T_{\varphi s} u_0 + T_{\varphi} v_0) ds. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут  $R_3$  – радіус кривизни Землі;  $S$  – площа горизонтальної поверхні півпростору;  $h_j$  – товщина  $j$ -го шару півпростору;  $\rho_j$  – густина  $j$ -го шару;  $\varepsilon_{\alpha\beta}^j$  – компоненти тензора деформацій  $j$ -го шару;  $E_{\alpha\beta}^j$  – дійсні модулі пружності  $j$ -го шару;  $\tilde{G}_{\alpha\beta}^j = G_{\alpha\beta}^j + i\omega\eta_{\alpha\beta}^j$  – комплексні компоненти узагальненого модуля зсуву  $j$ -го шару, що складаються з дійсної пружної частини та комплексної в'язкої частини;  $\eta_{\alpha\beta}^j$  – коефіцієнт динамічної в'язкості  $j$ -го шару;  $T_{\alpha}, T_{\alpha\beta}$  – зусилля, які діють на контур півпростору в напрямках, дотичних його горизонтальній поверхні.

В'язкопружність півпростору розглянемо на основі в'язкопружної моделі Кельвіна–Фойта [6], коли загальне напруження зсуву за заданих деформацій і швидкостей деформації має вигляд лінійної суперпозиції пружного і в'язкого напружень. Граничні умови задачі – горизонтальні зусилля, які діють на бокові межі півпростору. В умовах квазістационарного навантаження півпростору дії цих зусиль можуть бути замінені еківалентним завданням швидкостей на відповідних ділянках його бокових меж.

Для розв'язання поданої вище квазістационарної в'язкопружної задачі деформування півпростору скористаємось методом скінченних елементів, який ґрунтується на варіаційному принципі Лагранжа, що виражає мінімум повної механічної енергії системи [10]:

$$\delta \tilde{W}(u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1) = 0. \quad (3)$$

Для розв'язання варіаційного рівняння (3) застосуємо дев'ятивузловий ізопараметричний чотирикутний оболонковий скінченний елемент з криволінійною поверхнею [5]. Як глобальну систему координат, тобто систему, в якій поєднуються усі скінченні елементи (на які розбиваємо область дослідження), використаємо криволінійну систему координат  $(s, \varphi, z)$ . Як локальну систему координат, у якій для кожного скінченного елемента визначають функції форми і проводять чисельне інтегрування, застосуємо допоміжну нормалізовану систему координат. При побудові функцій форми, що апроксимують в межах кожного елемента складові переміщень:  $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$ , для виконання умов гладкості та збіжності скінченноелементного розв'язку, використаємо алгебричні та тригонометричні поліноми [5].

Алгоритм скінченноелементного розв'язання варіаційної задачі (3) полягає у такому [18].

На першому етапі в локальній системі координат апроксимуємо усі компоненти переміщень і деформацій, що входять у функціонал Лагранжа (2) і є функціями від складових переміщень:  $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$ . У цій самій системі проводимо аналітичне інтегрування усередині кожного шару оболонки, а потім – підсумовування по всьому пакету шарів оболонки.

На другому етапі здійснюємо диференціювання функціонала (2) по усіх вузлових складових переміщень і прирівнюємо відповідні похідні до нуля. В результаті для кожного скінченного елемента одержуємо лінійну комплексну алгебричну систему, що складається з 54 рівнянь.

На третьому етапі у глобальній системі координат  $(s, \varphi, z)$  підсумовуємо локальні системи комплексних алгебричних рівнянь по усіх скінченних елементах, на які розбито оболонку, і формуємо глобальну систему комплексних рівнянь. Подвійні інтеграли по площі оболонки обчислюємо за чисельним інтегруванням на основі квадратурних формул Гауса [10]. Глобальну систему лінійних алгебричних рівнянь розв'язуємо за допомогою чисельного методу Гауса [10]. В результаті визначаємо комплексні складові переміщень:  $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$  в усіх вузлових точках скінченноелементної сітки. За знайденими вузловими складовими переміщень можуть бути визначені комплексні квазістаціонарні компоненти швидкостей у довільній точці скінченного елемента, тобто у будь-якій точці горизонтальної поверхні розглянутого півпростору. Для переходу з частотного квазістаціонарного простору в часовий простір необхідно виділити реальну частину від отриманих комплексних значень.

У результаті чисельного моделювання на основі представленої вище варіаційної скінченноелементної методики, з урахуванням GPS-даних щодо внутрішньоплитних горизонтальних рухів у системі ETRS89 було отримано стійке поле горизонтальних швидкостей земної кори в ДДЗ (рис. 2).

**Аналіз отриманих результатів.** Відповідно до результатів моделювання, для усього розглянутого регіону стійкі сучасні горизонтальні рухи земної кори мають приблизно однакову спрямованість з південного сходу на північний захід.

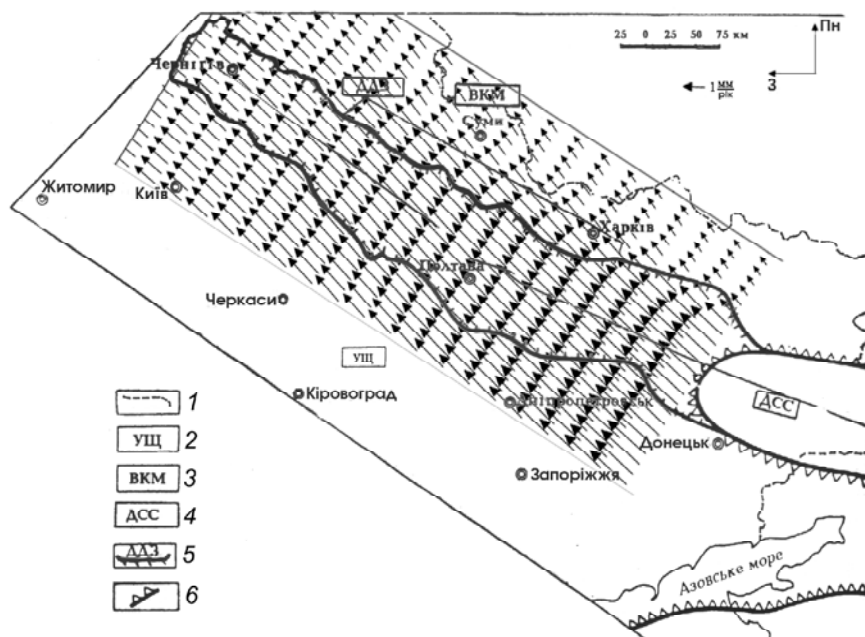


Рис. 2. Поле швидкостей сучасних горизонтальних рухів земної кори в ДДЗ у системі відліку ETRS89, яка жорстко зв'язана з Євразійською континентальною літосферною плитою: 1 – державний кордон України; 2 – Український щит; 3 – Воронезький кристалічний масив; 4 – Донецьке складчасте спорудження; 5 – Дніпровсько-Донецька западина і її межі; 6 – межі насування Північнокавказько-Кримського складчастого поясу на українську частину Східноєвропейської континентальної плити

Разом з тим інтенсивність сучасних горизонтальних рухів у ДДЗ є неоднорідною. Найінтенсивніші горизонтальні рухи характерні для південного сходу ДДЗ і прилеглої до неї частини УЩ, амплітуди швидкостей сягають 3–3,5 мм/рік. По мірі просування на північний захід інтенсивність сучасних горизонтальних рухів поступово знижується до 1–1,5 мм/рік. У прилеглої частині ВКМ, на північному сході ДДЗ, інтенсивність сучасних горизонтальних рухів різко знижується до 0,5 ~ 1 мм/рік. Загальна спрямованість сучасних горизонтальних рухів ДДЗ у північно-західному напрямку, ймовірно, підтверджує той факт, що регіон разом з іншою українською частиною Східноєвропейської континентальної плити знає насування з боку Північнокавказько-Кримського складчастого поясу і, отже, втягнутий у глобальний тектонічний процес, зумовлений колізією Аравійської та Африканської плит з Євразійською плитою. Водночас неоднорідність поля горизонтальних швидкостей за амплітудою вказує на неоднорідну за геологічним складом розломно-блокову структуру земної кори ДДЗ і, відповідно, на неоднозначність горизонтальних рухів елементів западини. Зокрема, помітний дисонанс сучасних горизонтальних рухів між ДДЗ і ВКМ, очевидно, можна пояснити суттєвою відмінністю в геологічній будові земної кори цих суміжних структур і різною стійкістю щодо регіональних горизонтальних рухів. Через важливість ДДЗ як у геологічному, так і промисловому аспекті стосовно загального народногосподарського комплексу України необхідне подальше вивчення сучасних стійких горизонтальних рухів земної кори у регіоні.

1. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. – К.: Наук. думка, 1996. – 391 с.
2. Григорьев А.С. Вопросы интерпретации современных движений земной поверхности, обусловленных движениями фундамента осадочного чехла / А.С. Григорьев, И.М. Волович, А.В. Михайлова // Современные движения земной коры. Морфоструктуры, разломы, сейсмичность. – М.: Наука, 1987. – С. 9–16.
3. Истомин А.Н. Геодинамические условия формирования Днепровско-Донецкой впадины / А.Н. Истомин, Н.И. Евдошук // Геофиз. журн. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 143–155.
4. Карнаухов В.Г. Связанные задачи теории вязкоупругих пластин и оболочек / В. Г. Карнаухов, И. Ф. Киричок. – Киев: Наук. думка, 1986. – 221 с.
5. Козлов В.И. Колебания многослойных ортотропных оболочек вращения с конечной сдвиговой жёсткостью /

- В.И. Козлов, М.В. Лубков // Тр. 15-й науч. конф. мол. учёных Ин-та механики АН УССР. – Киев 1990. – Ч. 2. – Деп. в ВИНТИ 26.10.90, № 3802-В 90. – С. 439–445.
6. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. – М.: Мир, 1974. – 338 с.
7. Куприенко П.Я. Трёхмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса / П.Я. Куприенко, И.Б. Макаренко, В.И. Старостенко, О.В. Легостаева, А.С. Савченко // Геофиз. журн. – 2010. – Т. 32, № 6. – С. 175–214.
8. Лубков М.В. Вплив субгоризонтальних рухів на розвиток Дніпровсько-Донецької западини // Геоінформатика. – 2008. – № 4. – С. 59–62.
9. Мориц Г. Вращение Земли: теория и наблюдения / Г. Мориц, А. Мюллер. – Киев: Наук. думка, 1992. – 512 с.
10. Образцов И.Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. – М.: Высш. шк., 1985. – 329 с.
11. Пелех Б.Л. Теория оболочек с конечной сдвиговой жёсткостью. – Киев: Наук. думка, 1973. – 248 с.
12. Тёркот Д. Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред / Д. Тёркот, Д. Шуберт. – М.: Мир, 1985. – 730 с.
13. Altiner Y. The contribution of GPS data to the detection of the Earth's crust deformations illustrated by GPS campaigns in the Adria region // Geophys. J. Int. – 2001. – V. 145. – P. 550–559.
14. Bruyninx C. The EUREF Permanent Network: a multidisciplinary network serving surveyors as well as scientists // Geoinformatics. – 2004. – V. 7. – P. 32–35.
15. DeMets C. Current plate motions / C. DeMets, R. Gordon, D.F. Argus, S. Stein // Geophys. J. Int. – 1990. – V. 101. – P. 425–478.
16. El-Fiky G. Elastic and inelastic strains in the Japanese Islands deduced from GPS dense array // Earth Planets Space. – 2000. – V. 52. – P. 1107–1112.
17. Khazaradze G. Tectonic deformation in western Washington from GPS measurements / G. Khazaradze, A. Qamar, H. Dragert // Geophys. Res. Lett. – 1999. – V. 26. – P. 3153–3156.
18. Lubkov M. Modeling of the bending deformations of tectonic plates // The 6<sup>th</sup> Orlov conf. Proc.: The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy. – Kiev: Akadempriodyka, 2010. – P. 115–122.
19. McClusky S. GPS constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // J. Geophys. Res. – 2000. – V. 105. – P. 5695–5719.
20. Pan M. Crustal movements in Skane, Sweeden, between 1992 and 1998 as observed by GPS / M. Pan, L. E. Sjoberg, Ch. J. Talbot // J. Geodynamics. – 2001. – V. 31, N 3. – P. 311–322.

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна  
E-mail: mikhail.lubkov@mail.ru

Надійшла до редакції 01.04.2013 р.

## СОВРЕМЕННЫЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

На основе вариационной конечно-элементной методики, разработанной для вязкоупругих слоистых оболочек, а также с учётом GPS-данных о внутриплитных горизонтальных движениях проведено численное моделирование современных горизонтальных движений земной коры в пределах Днепроовско-Донецкой впадины (ДДВ), в системе отсчёта ETRS89, жёстко связанной с Евразийской континентальной литосферной плитой. По результатам моделирования для всего рассматриваемого региона современные горизонтальные движения земной коры имеют приблизительно одинаковую северо-западную направленность. В то же время интенсивность современных горизонтальных движений земной коры в регионе не однозначна. Наиболее интенсивные горизонтальные движения характерны для юго-востока ДДВ и примыкающей к ней зоне Украинского щита. Здесь амплитуды горизонтальных скоростей достигают 3–3,5 мм/год. По мере продвижения на северо-запад интенсивность горизонтальных движений постепенно снижается до 1–1,5 мм/год. Вместе с тем в прилегающей к ДДВ на северо-востоке зоне Воронежского кристаллического массива интенсивность этих движений резко снижается до 0,5–1 мм/год.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, современные горизонтальные движения, Днепроовско-Донецкая впадина.

## MODERN HORIZONTAL MOVEMENTS OF THE DNEIPER-DONETS DEPRESSION

Using the variation finite element method elaborated for visco elastic foliated shells, and the calculation of GPS – data about inner plate horizontal movements, we carried out computer modeling of modern horizontal movements of the earth crust in the Dnieper-Donets Depression (DDD) region at the ETRS89 reference system rigidly connected with Eurasian continental lithospheric plate. The results of modeling show that modern horizontal movements of the entire region have approximately the same north-western direction. However, the intensity of the modern earth crust horizontal movements in this region shows variability. The most intensive horizontal movements can be observed in the south-eastern part of DDD and closely fitting to it Ukrainian shield zone. The horizontal velocity amplitudes can reach 3–3,5 mm/yr here. Along north-western direction horizontal movements intensity gradually decreases to 1–1,5 mm/yr; whereas in Woronezkiy crystalline massive zone closely fitting to the north-eastern part DDD border, we can observe significant decreasing of horizontal movements intensity to 0,5–1 mm/yr.

**Keywords:** computer modeling, modern horizontal movements, Dnieper-Donets Depression.