

УДК 550.31.551.24.03

**М.В. Лубков**

*Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Суботина НАН України, м. Полтава*

## **ПРО ВПЛИВ СУЧАСНИХ РОЗЛОМНО-БЛОКОВИХ РУХІВ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ НА ГРАВІТАЦІЙНЕ ПОЛЕ**

Проведено комп’ютерне моделювання швидкостей змінювання аномального гравітаційного поля в околі сучасних розломно-блокових рухів кристалічного фундаменту в регіоні Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). Установлено, що найінтенсивніші змінювання гравітаційного поля характерні для субгоризонтальних рухів блоків кристалічного фундаменту, особливо скидів і насувів. За вертикальних рухів мікроблоків кристалічного фундаменту амплітуди швидкостей змінювання аномального гравітаційного поля приблизно на порядок нижчі. Виявлений ступінь кореляції між розглянутими розломно-блоковими рухами і відповідними змінами гравітаційного поля дає можливість проводити гравітаційний моніторинг зон сучасної активізації у регіоні ДДЗ.

**Ключові слова:** сучасна активізація ДДЗ, розломно-блокові рухи, гравітаційне поле.

**Вступ.** Як відомо, в межах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), яка розміщується на північному сході української частини Східноєвропейської дорифейської плити, система глибинних розломів, яка простягається у субширотному напрямку з південного сходу на північний захід, утворює смугу опущених блоків і мікроблоків кристалічного фундаменту. За часом зародження і характером активізації в ДДЗ традиційно виділяють такі типи дислокацій [1]: 1) дорифтові розломи архейсько-протерозойського віку; 2) рифтові пізньодевонські розломи, які простягаються вздовж осі западини і мають поперечний напрямок відносно дорифтових розломів; 3) скидові післярифтові регіональні та локальні розриви в осадовому чохлі западини. Згідно із геологічними і геофізичними даними [2–4], ДДЗ і особливо її південно-східна частина за останні 3–5 млн років зазнає тектонічної активізації. Сучасна активізація (СА) виявляється у підвищених значеннях теплових потоків, які переносяться з мантії у літосферу і земну кору, підняттях земної поверхні, а також рухах уздовж розломів кристалічного фундаменту. Порушення

фундаменту переважно представлені скидами та насувами, частина порушень наслідують давні великі розломи або тяжіє до них. Разом з цим велика кількість молодих порушень “оживляє” дрібні давні розломи або прокладає нові шляхи [4, 5]. Водночас увесь регіон ДДЗ разом з рештою української частини Східноєвропейської дорифейської плити зазнає насування з боку Північнокавказько-Кримського складчастого поясу в напрямку, який приблизно збігається з простяганням ДДЗ [6]. Ця геотектонічна подія також сприяє активізації розломно-блокових рухів у розглянутому регіоні ДДЗ. У свою чергу, активні розломно-блокові рухи приводять до змінювання рівня земної поверхні, які мають супроводжуватися відповідними змінами локального гравітаційного поля. Виходячи з цього можна припустити, що за допомогою моніторингу змінювань аномального гравітаційного поля можна спостерігати динаміку сучасних тектонічних рухів у розломних зонах ДДЗ і виявляти зони СА. Зауважимо, що багато геологів і геофізиків пов’язує прояви нафтогазоносності в ДДЗ безпосередньо із зонами СА [5, 7].

Отже, для застосування гравітаційного моніторингу становить інтерес моделювання змінювань аномального гравітаційного поля в зонах сучасних розломно-блокових тектонічних рухів ДДЗ.

**Постановка та метод розв’язання задачі.** У геодезії та гравіметрії добре відомий факт тісної кореляції між вертикальними переміщеннями земної поверхні та відповідними змінюваннями локального гравітаційного поля. Здебільшого між масивами таких даних може бути встановлена прямо пропорційна залежність. Наприклад, добре відома теоретично визначена і широко використовувана на практиці величина редукції гравітаційного поля внаслідок вертикальних переміщень земної поверхні, зумовлених тиском атмосферного стовпа, яка дорівнює  $-0,3086$  мкГал/мм. У статті [8] показано, що дія льодового навантаження приводить до виникнення прямо пропорційної залежності між змінюваннями гравітаційного поля і вертикальними переміщеннями земної поверхні з коефіцієнтом пропорційності  $-0,15$  мкГал/мм. У публікації [9] проведено теоретичне та експериментальне дослідження відношення змінювань гравітаційного поля до вертикальних переміщень земної поверхні. В ній зазначено, що у випадку виключення глобальних переміщень мас усередині Землі і нехтування дією атмосферного тиску для достатньо сухих регіонів (насамперед не екваторіальних поясів) пружний перерозподіл у поверх-

невому шарі Землі має коефіцієнт пропорційності – 0,0766 мкГал/мм. Справедливість цієї величини підтверджена обробкою даних спостережень у районі пустелі Сахара, де практично були відсутні інші важливі фактори зміни гравітаційного поля – метеорологічні опади і глобальні переміщення мас усередині Землі.

Регіон ДДЗ розташований у достатньо сухому з цієї точки зору кліматі, тут в наш час не спостерігаються переміщення великих внутрішніх мас. Тому для моделювання змінювань локального гравітаційного поля в активних розломних зонах западини достатньо правомірно використовувати наведений вище коефіцієнт відношення змінювань гравітаційного поля до вертикальних переміщень земної поверхні – 0,0766 мкГал/мм. Рух блоків і мікроблоків кристалічного фундаменту в зонах активних розломів ДДЗ зумовлює деформування вищезалгаючих осадових порід і відповідні вертикальні переміщення земної поверхні. Поле швидкостей відповідних вертикальних переміщень земної поверхні, у свою чергу, можна визначити на основі варіаційної скінченно-елементної методики, розробленої для багатошарових в’язкопружних оболонок [10–12].

Розглянемо механічну поведінку тришарового в’язкопружного півпростору, який складається з осадових порід, під впливом рухомих блоків і мікроблоків кристалічного фундаменту. Виходячи з даних роботи [13], виберемо середній склад осадових порід, характерний для ДДЗ. Припустимо, що верхній шар завтовшки 2 км складається з глинистих порід, середній шар завтовшки 6 км – з пісковиків, нижній шар завтовшки 2 км – з вапнякових порід. На основі даних робіт [14, 15] задамо для глинистих, піщаних і вапнякових порід відповідні механічні властивості: густина – 2300, 2400, 2500 (кг/м<sup>3</sup>); модуль Юнга – 2,0; 3,5; 7,0 ( $\cdot 10^{10}$  Па); модуль зсуву – 1,4; 2,0; 2,5 ( $\cdot 10^{10}$  Па); коефіцієнт Пуассона – 0,07; 0,25; 0,275; динамічна в’язкість –  $1 \cdot 10^{17}$ ;  $1,4 \cdot 10^{20}$ ;  $2,56 \cdot 10^{20}$  (Па $\cdot$ с). Для описання механічної поведінки розглянутого в’язкопружного півпростору осадових порід, як зазначено вище, скористаємося теорією багатошарових в’язкопружних оболонок. Розглянемо ортотропні оболонки у криволінійній системі координат ( $s, \varphi, z$ ), яку вважатимемо жорстко закріпленою з відповідним мегаблоком ДДЗ. Тут  $s, \varphi$  – координати уздовж поверхні оболонки;  $z$  – координата по товщині оболонки.

Переміщення уздовж координат  $s, \varphi, z$  для  $j$ -го шару оболонки можуть бути представлені у вигляді

$$\begin{aligned} u_j &= u_0(s, \varphi) + zu_1(s, \varphi); \\ v_j &= v_0(s, \varphi) + zv_1(s, \varphi); \\ w_j &= w_0(s, \varphi) + zw_1(s, \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

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

Для розв’язання в’язкопружної задачі застосовують метод скінченних елементів, який ґрунтується на варіаційному принципі Лагранжа [11], що виражає мінімум механічної енергії системи:

$$\delta \tilde{W}(u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1) = 0. \quad (2)$$

Функціонал Лагранжа для в’язкопружної тришарової ортотропної оболонки в криволінійній системі координат  $(s, \varphi, z)$  має такий комплексний вигляд [12]:

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \int_{h_j} \int_S [E_{ss}^j \varepsilon_{ss}^{j2} + E_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^{j2} + E_{zz}^j \varepsilon_{zz}^{j2} + 2E_{s\varphi}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j + 2E_{sz}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{zz}^j + 2E_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{zz}^j + \\ &+ 4\tilde{G}_{s\varphi}^j \varepsilon_{s\varphi}^{j2} + 4\tilde{G}_{sz}^j \varepsilon_{sz}^{j2} + 4\tilde{G}_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi z}^{j2} + \omega^2 \rho_j (u_j^2 + v_j^2 + w_j^2)] (1 + \frac{z}{R_3})^2 ds d\varphi dz - \\ &- \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (T_s u_0 + T_{s\varphi} v_0 + Q_s w_0) d\varphi - \int_{s_1}^{s_2} (T_{\varphi s} u_0 + T_{\varphi} v_0 + Q_{\varphi} w_0) ds. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут  $R_3$  – радіус кривизни Землі;  $S$  – площа поверхні розглянутого півпростору осадових порід (оболонки);  $h_j$  – товщина  $j$ -го шару оболонки;  $\rho_j$  – густина осадових порід  $j$ -го шару;  $\omega$  – частота встановленого динамічного процесу в розглянутому в’язкопружному півпросторі;  $T_{\alpha\beta}$ ,  $Q_{\alpha}$  – горизонтальні та вертикальні зусилля, дія яких на контур оболонки еквівалентна відповідному заданню розподілу швидкостей на цьому контурі;  $\varepsilon_{\alpha\beta}^j$  – компоненти тензора деформацій  $j$ -го шару;  $E_{\alpha\beta}^j$  – дійсні модулі Юнга  $j$ -го шару;  $\tilde{G}_{\alpha\beta}^j = G_{\alpha\beta}^j + i\omega\eta_{\nu}^j$  – комплексні компоненти узагальненого модуля зсуву  $j$ -го шару оболонки: дійсна пружна складова та комплексна в’язка складова;  $\eta_{\nu}^j$  – коефіцієнт динамічної в’язкості  $j$ -го шару;  $i$  – уявна одиниця.

Звернімо увагу на те, що динамічну поведінку у в’язкопружному середовищі в цьому випадку описують на основі в’язкопружної моделі Кельвіна [14], коли загальне напруження зсуву за заданих деформацій і швидкостей деформацій має вигляд лінійної комбінації пружних і в’язких напружень.

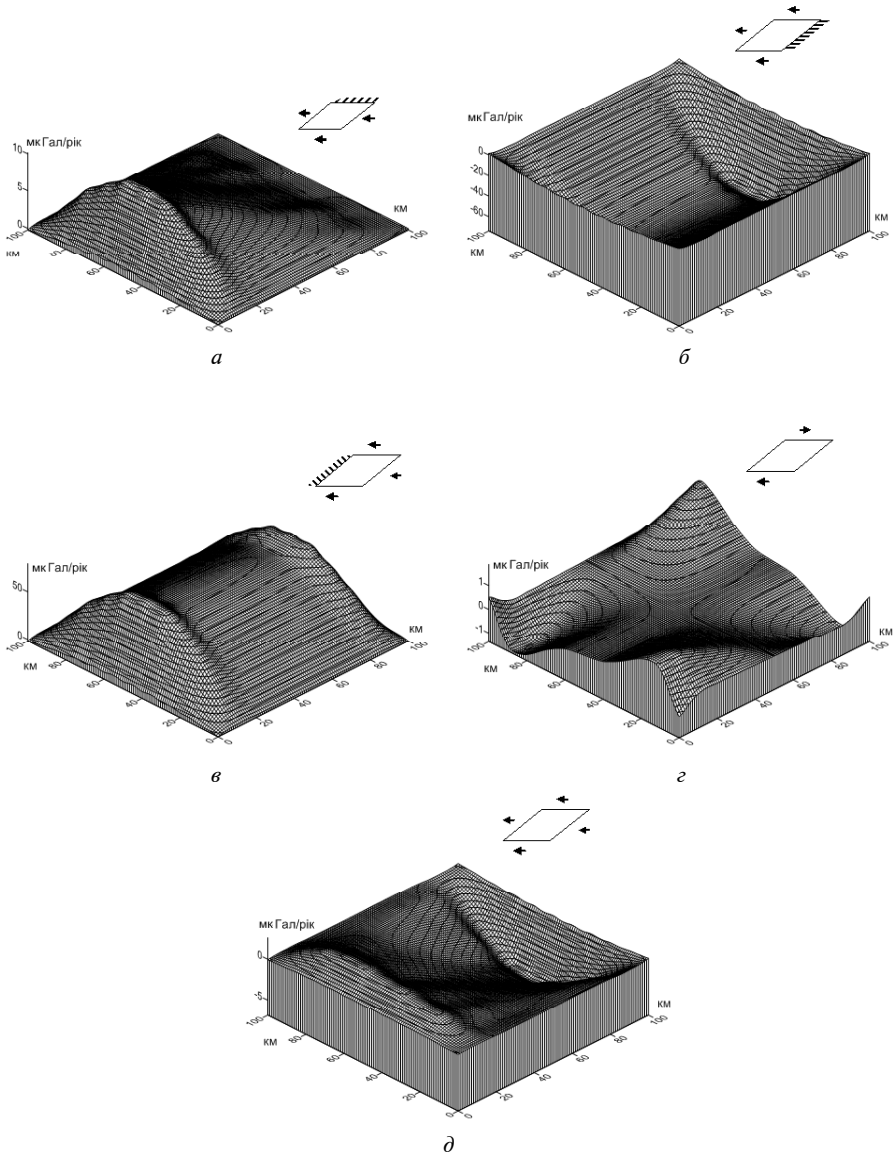
Варіаційне рівняння (2) розв’язують на основі зазначеної вище варіаційної скінченно-елементної методики для багатoshарових в’язкопружних ортотропних оболонок [12, 16, 17]. У результаті розв’язання наведеної в’язкопружної задачі можуть бути визначені швидкості вертикальних переміщень поверхні у розглянутому півпросторі осадових порід і, отже, швидкості змінювання аномального гравітаційного поля.

**Моделювання змін гравітаційного поля в зонах сучасних розломно-блокових рухів ДДЗ.** Під час моделювання змінювань аномального гравітаційного поля в околах сучасних розломно-блокових рухів ДДЗ будемо розглядати умовні ділянки земної поверхні з розмірами, які корелюють із середньою шириною западини, а тому виберемо лінійні розміри ділянки 100 на 100 км. Як зазначено раніше, рух блоків і мікроблоків кристалічного фундаменту під цими ділянками буде приводити до деформування осадових порід і відповідних вертикальних переміщень земної поверхні, які, у свою чергу, спричинять зміни аномального гравітаційного поля. Розглянемо горизонтальні та вертикальні розломно-блокові рухи кристалічного фундаменту, які можуть відбуватися в зонах СА ДДЗ.

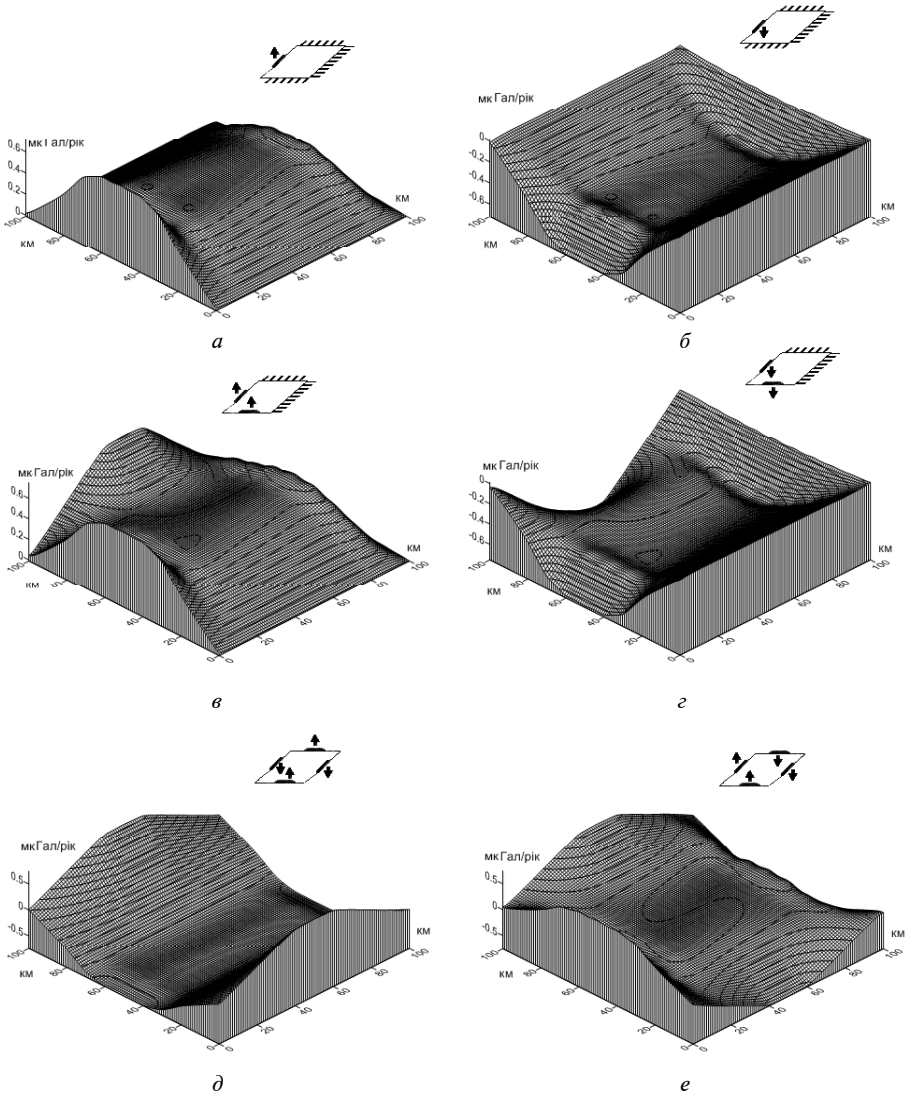
Припустимо, що здебільшого напрямки цих рухів корелюють з напрямками рифтових і дорифтових розломів ДДЗ. Приймемо, що швидкість сучасних розломно-блокових рухів ДДЗ, яка характерна для регіонів Дніпровсько-Донецького рифту [15, 18], дорівнює 1 см/рік.

Поверхневі діаграми, що визначають розподіли швидкостей змінювання аномального гравітаційного поля в околах блокових горизонтальних рухів кристалічного фундаменту (лінійні розміри блоків порядку ~100 км), показані на рис. 1, а в околах вертикальних рухів мікроблоків кристалічного фундаменту (лінійні розміри мікроблоків порядку ~20 км) – на рис. 2.

Аналіз отриманих результатів демонструє відмітні особливості у поведінці локального гравітаційного поля в околах сучасних розломно-блокових рухів кристалічного фундаменту в регіоні ДДЗ. При цьому найінтенсивніші змінювання аномального гравітаційного поля характерні для субгоризонтальних розломно-блокових рухів кристалічного фундаменту. Так,



*Рис. 1.* Розподіли швидкостей змінювання аномального гравітаційного поля в околах сучасних розломно-блокових горизонтальних рухів кристалічного фундаменту ДДЗ: *a* – борт блока, паралельний руху, є жорстко закріпленим, решта бортів здійснюють однапрямлений рух; *б* – випадок скиду; *в* – випадок насуву; *г* – супротивний рух протилежних бортів блока; *д* – однапрямлений рух усіх бортів блока



*Рис. 2.* Розподіли швидкостей змінювання аномального гравітаційного поля в околах сучасних вертикальних рухів мікроблоків кристалічного фундаменту ДДЗ, які розташовані на серединах сторін нерухомих блоків: *a* – мікроблок рухається вгору; *б* – мікроблок рухається вниз; *в* – мікроблоки, розташовані на суміжних сторонах блока, рухаються вгору; *г* – мікроблоки, розташовані на суміжних сторонах блока, рухаються вниз; *д* – пара мікроблоків, розташована на протилежних сторонах блока, рухається вгору, інша пара – вниз; *е* – пара мікроблоків, розташована на суміжних сторонах блока, рухається вгору, інша пара – вниз

для вибраної швидкості розломно-блокових рухів  $\sim 1$  см/рік, типової для регіону ДДЗ, у випадку скидів і насувів амплітуда швидкості змінювань аномального гравітаційного поля досягає  $\sim 60$  мкГал/рік. Якщо, один борт тектонічного блока має жорстке закріплення із суміжними блоками, а протилежний борт рухається за простяганням розлому, швидкість змінювання аномального гравітаційного поля досягає  $\sim 10$  мкГал/рік. У випадку однонапрявленого руху всіх бортів блока – максимальна швидкість змінювання аномального гравітаційного поля становить  $\sim 5$  мкГал/рік, у випадку супротивного руху протилежних бортів блока – не перевищує  $\sim 5$  мкГал/рік. За вертикальних рухів мікроблоків кристалічного фундаменту швидкість змінювань аномального гравітаційного поля суттєво менше порівняно з горизонтальними розломно-блоковими рухами. Так, для характерної швидкості вертикальних рухів мікроблоків  $\sim 1$  см/рік швидкість змінювання аномального гравітаційного поля в усіх розглянутих випадках не перевищує  $\sim 1$  мкГал/рік. Водночас розподіли швидкості змінювань аномального гравітаційного поля в околах вертикальних рухів мікроблоків залежать від їх конфігурацій розташування і напрямків рухів.

**Висновки.** Відповідно до загального аналізу результатів моделювання змін аномального гравітаційного поля під впливом сучасних розломно-блокових тектонічних рухів у регіоні ДДЗ, найінтенсивніші змінювання гравітаційного поля характерні для горизонтальних розломно-блокових рухів, особливо скидів і насувів. За вертикальних рухів мікроблоків кристалічного фундаменту змінювання аномального гравітаційного поля значно менші. Отже, у випадку реальних сучасних рухів по активних розломах, які є комбінаціями як горизонтальних, так і вертикальних рухів мікроблоків кристалічного фундаменту на аномальне гравітаційне поле насамперед впливатимуть субгоризонтальні розломно-блокові рухи кристалічного фундаменту. Разом з тим загальна картина розподілу швидкостей змінювання аномального гравітаційного поля в зонах СА залежатиме як від кінематики рухів активних блоків і мікроблоків, так і від їх взаємного розміщення. Крім того, виявлений ступінь кореляції між розломно-блоковими рухами кристалічного фундаменту і відповідними змінами аномального гравітаційного поля дає можливість проводити гравітаційний моніторинг у зонах СА ДДЗ з метою виявлення місць накопичення вуглеводневої сировини. З цієї точки зору актуальними є подальші дослідження в цьому напрямку і створення відповідної методики, яка б мала практичне значення.



1. *Гавриш В.К.* Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Глубинное строение и геотектоническое развитие / Забелло Г. Д., Рябчун Л. М. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.
2. *Верховцев В.* Новітні вертикальні рухи земної кори території України, їх взаємовідношення з лінійними та кільцевими структурами. Енергетика Землі, її геолого-екологічні прояви, науково-практичне використання / В. Верховцев. – К.: КНУ, 2006. – С. 129–137.
3. *Лукин А.Е.* Литолого-динамические факторы нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах / Лукин А.Е. – Киев: Наук. думка, 1997. – 224 с.
4. *Современная активизация Днепровско-Донецкой впадины. Современное состояние наук о Земле* / [Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н.]. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2011. – С. 472–476.
5. *Гордиенко В.В.* Активизация тектоносферы и месторождения углеводородов / В.В. Гордиенко // Геофиз. журн. – 2011. – 33, № 3. – С. 75–101.
6. *Истомин А.Н.* Геодинамические условия формирования Днепровско-Донецкой впадины / А. Н. Истомин, Н. И. Евдошук // Там же. – 2002. – 24, № 6. – С. 143–155.
7. *Лукин А. Е.* О роли глубинных и сверхглубинных флюидов в нефтеобразовании / А.Е. Лукин, Ю. М. Пиковскиц // Геол. журн. – 2004. – № 2. – С. 21–33.
8. *Wahr J.* Predictions of vertical uplift caused by changing polar ice volumes on a viscoelastic earth / J. Wahr, H. DaZhong, A. Trupin // Geophys. Res. Lett. – 1995. – 22. – P. 977–980.
9. *Linage C.* A search on the gravity/ height ratio induced by surface loading; theoretical investigation and numerical applications / C. Linage, J. Hinderer, J. Paul Boy // ВІМ. – 2007. – 143. – P. 11451–11459.
10. *Карнаухов В.Г.* Связанные задачи теории вязкоупругих пластин и оболочек / В.Г. Карнаухов, И.Ф. Киричок. – Киев: Наук. думка, 1986. – 221 с.
11. *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.
12. *Козлов В.И.* Колебания многослойных ортотропных оболочек вращения с конечной сдвиговой жёсткостью / В.И. Козлов, М.В. Лубков // Тр. 15-й науч. конф. молодых учёных Ин-та механики АН УССР, Киев 1990. – часть II. – Деп. в ВИНТИ 26.10.90, N 3802–В 90. – С. 439–445.
13. *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. – 32, № 6. – С. 175–214.
14. *Тёркот Д.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред / Д. Тёркот, Д. Шуберт. – М.: Мир, 1985. – 730 с.
15. *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.
16. *Лубков М.В.* Определение статических чисел Лява и Шида методом конечных элементов / М. В Лубков // Геофиз. журн. – 2004. – 26, № 6. – С. 147–150.

17. *Lubkov M.* Modeling of the bending deformations of tectonic plates / M. Lubkov // The 6th Orlov Conf. Proceed.: The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy. – Kiev: Akadempriodyka, 2010. – P. 115–122.
18. *Григорьев А.С.* О кинематических характеристиках движения дневной поверхности и напряженном состоянии осадочного чехла в зонах над разломами фундамента / А.С. Григорьев, А.В. Михайлова, З.Е. Шахмурадова // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1979. – № 1. – С. 3–20.

**О влиянии современных разломно-блоковых движений Днепровско-Донецкой впадины на гравитационное поле** М.В. Лубков

Проведено компьютерное моделирование скоростей изменения аномального гравитационного поля в окрестностях современных разломно-блоковых движений кристаллического фундамента в регионе Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ). Установлено, что наиболее интенсивные изменения гравитационного поля характерны для субгоризонтальных движений блоков кристаллического фундамента, особенно сбросов и надвигов. При вертикальных движениях микроблоков кристаллического фундамента амплитуды скоростей изменения аномального гравитационного поля примерно на порядок ниже. Выявленная степень корреляции между рассмотренными разломно-блоковыми движениями и соответствующими изменениями гравитационного поля позволяет проводить гравитационный мониторинг зон современной активизации в регионе ДДВ.

**Ключевые слова:** современная активизация ДДВ, разломно-блоковые движения, гравитационное поле

**About influence of modern DDD fault block movements on gravity field** M.V. Lubkov

Computer modeling of anomalous gravity field velocities changing in vicinities of modern fault crystalline fundament blocks movements in DDD region was carried out. It was obtained, that the most intensive gravity field changing are connected with sub horizontal crystalline fundament blocks movements, especially with faults and overthrusts. For vertical crystalline fundament micro blocks movements anomalous gravity fields changing velocity amplitudes were approximately on one order smaller. The defined degree of correlation between fault block movements and the gravity fields changing makes possible application of gravity monitoring for modern active zones in DDD region.

**Keywords:** DDD modern activity, fault block movements, gravity field.