

УДК 551.24:556.18:622.831

Канд. физ.-мат. наук ТАРАНЕЦ Р. М. (ИППМ НАН Украины), докт. геол. наук ПРИВАЛОВ В. А., канд. тех. наук ПРИХОДЬКО С. Ю. (ДонНТУ)

## ОБ ОДНОМ ИЗ АСПЕКТОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ГЕОДИНАМИКИ: ВЛИЯНИЕ МАССОВЫХ СИЛ НА ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ДОНЕЦКОГО БАССЕЙНА

Геодинамика как дисциплина геологического цикла знаний изучает силы и процессы, которые обуславливают глубинные и поверхностные пространственно-временные движения масс вещества и энергии в геосферах. В настоящее время накоплен обширный фактический материал [1–4], позволяющий утверждать, что геодинамическое поведение геологических сред в пределах активных разломных зон земной коры контролируется нелинейными сценариями. Нелинейность, в общем понимании, проявляется в том, что реакция среды на сумму воздействий – не равна сумме реакций на отдельные воздействия, или когда малые воздействия вызывают аномально большой отклик среды [5]. Применительно к геологическим средам, это означает, что в тектонически активных зонах имеют место процессы, вследствие которых, с одной стороны, накапливается запас энергии, с другой стороны, возможен его выброс при возбуждении среды. При этом, сам эффект или результирующая энергия возбуждения среды во многих случаях значительно превосходит энергию первоначального инициирующего воздействия. Яркие проявления сильной нелинейности геологической среды были зафиксированы при промышленных ядерных взрывах, при зондировании земной коры мощными электрическими импульсами, формировании уступов земной поверхности в зонах тектонических нарушений при их подработке [6–8].

Для описания качественного поведения вертикального смещения локальной области земной поверхности применяется модель колебания упругой тонкой пластины под действием внешних массовых сил. Учитывая относительную локальность области, в которой рассматривается модель, можно пренебречь вращением Земли. Тогда, согласно [9], для вертикальной компоненты вектора смещения получаем уравнение в частных производных (гиперболического типа) следующего вида:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \Delta h + \frac{\partial f}{\partial h}, \quad (1)$$

где  $h = h(t, x, y)$  – вертикальное смещение, зависящее от времени  $t$  и декартовых плановых координат  $x, y$ ;  $f = f(h) := V_e + V_i$  – сумма соответствующих внешних ( $V_e$ ) и внутренних сил ( $V_i$ ), действующих на земную поверхность;  $\mu$  – параметр Ламе;  $\rho$  – плотность;  $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$  – оператор Лапласа.

В качестве внешних сил  $V_e$  можно рассматривать воздействие на земную поверхность комплекса экзогенных процессов и эрозионных волн [10], влияние долговременных тенденций изменения атмосферного давления, результаты гравитационного взаимодействия Земли с другими космическими телами (Солнце, Луна) и т.п. В качестве внутренних сил  $V_i$  учитывается влияние вертикальных тектонических движений, возникающих как вследствие движения тектонических плит, так и в результате процессов физико-химической дифференциации вещества в недрах Земли. В дальнейшем рассмотрении мы конкретизируем выбор  $V_e$  и  $V_i$ , как функций от  $h$ .

В работе [11] приведена эмпирическая связь между вертикальным смещением  $-h$ , потенциалом силы тяжести  $-g$  и внешним потенциалом  $V_e$ :

$$h = \frac{V_e}{g}, \quad (2)$$

Принимая во внимание тот факт, что потенциал силы тяжести в большей мере зависит от изменений внешнего потенциала, нежели от других факторов, (т.е.  $g$  является функцией от  $V_e$ ), полагаем следующую связь между ними:

$$g \sim (V_e)^\alpha, \quad \alpha > 0. \quad (3)$$

Данное предположение свидетельствует о том, что с увеличением воздействия внешнего потенциала сила тяжести также растет, а скорость роста зависит от выбора параметра  $\alpha > 0$ , который, вообще говоря, может зависеть от многих факторов. Таким образом, из соотношения (2) и нашего предположения (3) находим следующую зависимость  $h$  от  $V_e$ :

$$h \sim (V_e)^{1-\alpha} \Rightarrow V_e \sim h^{1/(1-\alpha)},$$

откуда нетрудно увидеть, что параметр  $\alpha$  должен быть меньше 1, т.е.  $0 < \alpha < 1$ . В случае  $\alpha > 1$  ( $\alpha = 1$ ) с увеличением  $V_e$  вертикальное смещение уменьшалось бы или оставалось бы постоянным, что противоречит эмпирическим данным по измерению вариации силы тяжести [12].

Далее мы предполагаем, что действие соответствующего внутреннего потенциала  $V_i$  соответствует действию потенциала силы тяжести:

$$V_i \sim g \sim (V_e)^\alpha \sim h^{\alpha/(1-\alpha)},$$

т.е. рост силы тяжести вызывает возрастание внутреннего потенциала. Таким образом, в силу наших предположений на поведение массовых сил, уравнение (1) приводится к нелинейному уравнению колебаний пластины вида:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \Delta h + c_1 h^{\beta-1} - c_2 h^\beta, \quad 0 < c_i < \infty, \quad 0 < \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1. \quad (4)$$

Данное модельное уравнение учитывает зависимость вертикального смещения, а, следовательно, напряжения в земной поверхности, от взаимодействия внешнего и внутреннего суммарных потенциалов. Мы считаем, что основной вклад в формирование и развитие земной поверхности привносит именно «конкуренция» между этими потенциалами.

Нелинейные уравнения в частных производных широко используются при моделировании различных процессов в теории упругих деформаций, динамике течения жидкостей, теории горения, физике плазмы и т.д. Например, существует модель, описывающая эволюцию тонкой жидкой пленки, распространяющейся по твердой поверхности под действием конкурирующих сил гравитации и поверхностного натяжения. С помощью этой модели хорошо описывается эффект вязких «пальцев», т.е. возникновение на поверхности пленки определенных периодических структур. Определенная аналогия с этим эффектом прослеживается и в нашем модельном уравнении (4).

В настоящей работе изучается поведение вертикального смещения земной поверхности, описываемого уравнением вида (4), на примере Донецкого бассейна. В качестве основы для математического моделирования использовалась схема глубинных тектонических разломов фундамента Донбасса [13].

В момент времени, выбранный за начальный, мы предполагаем, что массив находится в состоянии покоя. Западная и восточная и границы бассейна, соответственно в зонах Мариупольско-Курского и Липецко-Константиновского линеаментов, зажаты ( $h=0$ ), а северная (Северо-Донбасский краевой разлом) и южная (Южно-Донбасский краевой разлом) - свободны ( $\nabla h=0$ ). Внутри массива, в зависимости от типов разрывных нарушений, задаются три вида разрывов:

$$(\nabla h|_1 - \nabla h|_2) \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{- для слабых разрывов,}$$

$$(\nabla h|_1 - \nabla h|_2) \cdot \vec{n} + h = 0 \quad \text{- для упругих разрывов,}$$

$$(\nabla h|_1 - \nabla h|_2) \cdot \vec{n} + h = 1 \quad \text{- для упругих разрывов со смещением,}$$

где  $\vec{n}$  - вектор нормали к линии разрыва.

Получающаяся при этом начально-краевая задача решается методом численного моделирования в наиболее простой ситуации, когда в уравнении (4) младшие нелинейные слагаемые ведут себя линейным образом. Соответствующий численный результат, представляющий собой картограмму изолиний амплитуд инверсионного подъема на территории Донецкого бассейна в условных единицах (у. е.) показан на рис. 1.

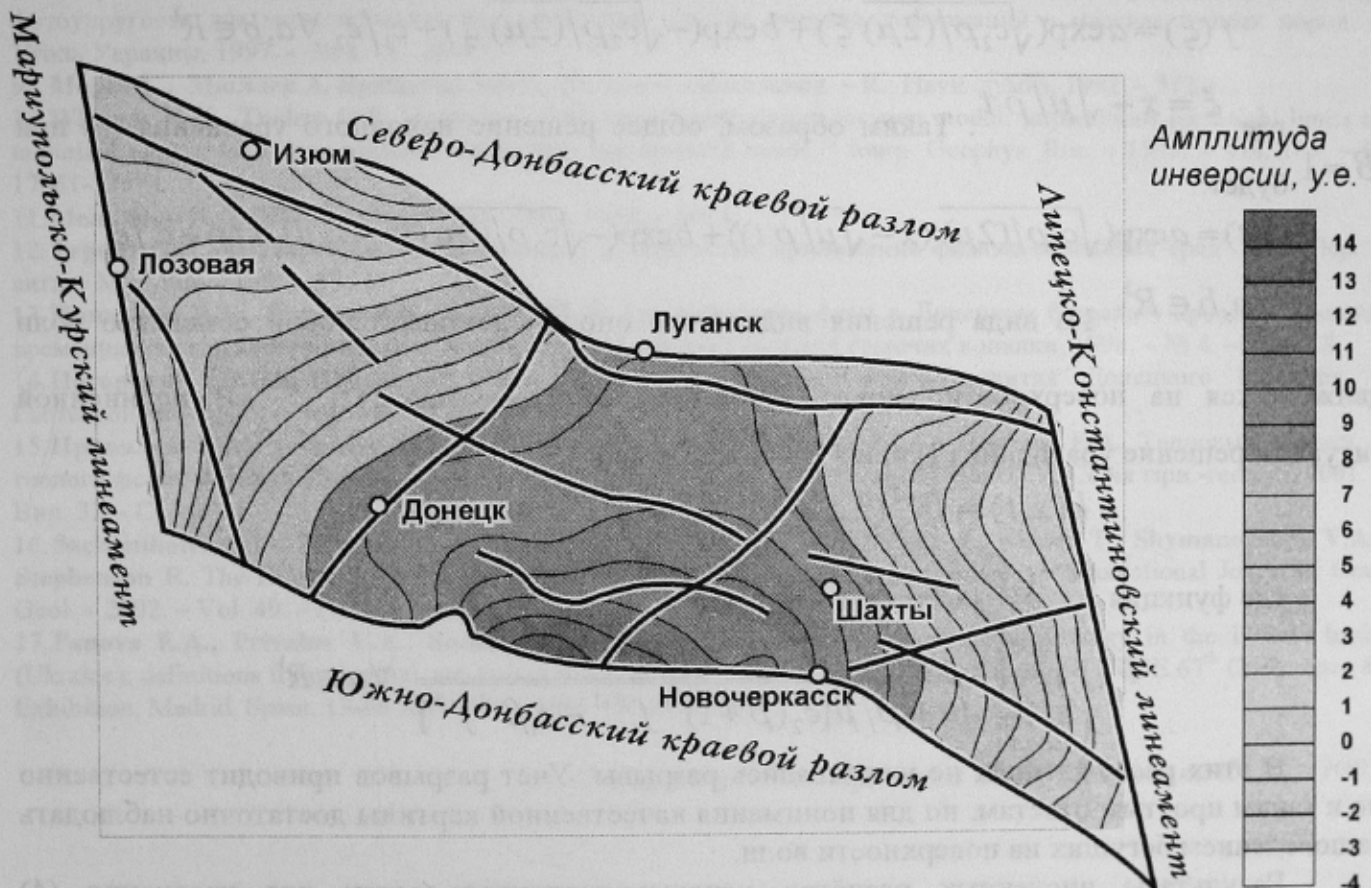


Рис. 1. Модельная реконструкция амплитуд инверсионного подъема ( $h$  мод), предшествовавшего складкообразованию в уральскую фазу складчатости герцинского орогенического цикла, на территории Донецкого бассейна.

Сопоставление полученных результатов с известными реконструкциями интенсивности денудации в Донбассе [14-17] показывает, что соответствующий численный результат моделирования ( $h$  мод), удовлетворительно описывает плановое распределение

асимметричного инверсионного подъема (*h* факт) в пределах тектонического блока между поперечными Донецко-Кадиевским и Еланчик-Ровенецким глубинными разломами, которое предшествовало складкообразованию в уральскую фазу складчатости герцинского орогенического цикла. Между фактическими [14] и модельными данными установлена значимая корреляционная зависимость  $h \text{ факт} = 0,933 \exp(0,195h \text{ мод})$ , коэффициент корреляции  $r = 0,76$ .

Для того чтобы аналитически прокомментировать получающийся результат рассмотрим соответствующее (4) одномерное уравнение

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + c_1 h^{\beta-1} - c_2 h^\beta, \quad 0 < c_i < \infty \quad (5)$$

при  $\beta = 1$  (т.е.  $\alpha = 1/2$ ). Будем искать решение в виде бегущей волны, а именно:

$$h(x, t) = f(x - \sqrt{\mu/\rho} t)$$

Для функции *f*, соответственно, получаем обычное дифференциальное уравнение:

$$\frac{2\mu}{\rho} f'' + c_1 - c_2 f = 0$$

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$f(\xi) = a \exp(\sqrt{c_2 \rho / (2\mu)} \xi) + b \exp(-\sqrt{c_2 \rho / (2\mu)} \xi) + c_1 / c_2 \quad \forall a, b \in R^1,$$

где  $\xi = x - \sqrt{\mu/\rho} t$ . Таким образом, общее решение исходного уравнения (5) при  $\beta = 1$  будет:

$$h(x, t) = a \exp(\sqrt{c_2 \rho / (2\mu)} (x - \sqrt{\mu/\rho} t)) + b \exp(-\sqrt{c_2 \rho / (2\mu)} (x - \sqrt{\mu/\rho} t)) + c_1 / c_2$$

$$\forall a, b \in R^1$$

Из вида решения видно, что оно представляет собой семейство волн движущихся на поверхности упругой пластины со скоростью  $\sqrt{\mu/\rho}$ . В нелинейной ситуации решение уравнения (5) при  $\beta \neq 1$  имеет вид:

$$h(x, t) = F^{-1}(\pm \xi + b) \quad \forall b \in R^1, \quad \xi = x - \sqrt{\mu/\rho} t,$$

где функция  $F^{-1}(\cdot)$  - обратная к функции

$$F(f) := \int_{f_0}^f \frac{df}{\sqrt{a + \rho/\mu [c_2(\beta+1)^{-1} f^{\beta+1} - c_1 \beta^{-1} f^\beta]}} \quad \forall a \in R^1$$

В этих рассуждениях не учитывались разрывы. Учет разрывов приводит естественно не к таким простым ответам, но для понимания качественной картины достаточно наблюдать за поведением бегущих на поверхности волн.

Результаты численных расчётов начально-граничных задач для уравнения (4) позволяют определять вариации вертикальных морфотектонических смещений в ходе геологической истории развития трансформированных инверсией осадочных бассейнов.

Применительно к Донецкому бассейну, этот подход позволит в дальнейшем рассчитать пространственно-временные вариации напряженного состояния горного массива в момент инверсии и на последующих этапах тектонической эволюции бассейна.

Поскольку инверсионный режим вызывает подъем отложений, активизирует эрозионные процессы, нарушает системы первичного кливажа и приводит к

перераспределению сформировавшихся на доинверсионной стадии углеводородных газов, полученные результаты могут быть использованы при реконструкциях процессов миграции и формирования скоплений метана в угленосной толще, а также для прогнозирования локализации газодинамических явлений в угольных шахтах.

### Литература

1. **Turcotte D.L.** Fractals and chaos in geology and geophysics. - Cambridge: Univ. Press, 1992. - 222 p.
2. **Privalov V.A., Panova E.A.** Field theory and fractal geometry applied to the prediction of deep basement fault in relation to mineralization: the example of the Donets Basin // Trans. Inst. Min. Metall. (UK), Sect. B (Appl. Earth Sci.). - 1994. - V. 102. - В 200.
3. **Вадковський В.Н., Захаров В.С.** Динамічні процеси в геології. - М.: МГУ, 2000-2001. - URL: <http://dynamo.geol.msu.ru/courses/DPG.html>.
4. **Привалов В.А.** Фрактальний геометричний образ розривних порушень Донбасса // Наукові праці ДонНТУ: Серія гірн.-геол. - 2003. - Вип. 62. - С. 204-216.
5. **Быков В.Г.** Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеанская. геология. - 2000. - Т.19. - № 1. - С.104-108.
6. **Николаев А.В., Верещагина Г.М.** Об инициировании землетрясений подземными ядерными взрывами // Докл. АН СССР. - 1991. - Т.319. - № 2. - С.333-336.
7. **Тарасов Н.Т.** Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 1997. - Т.353. - № 4. - С.542-545.
8. **Азаров Н.Я., Привалов В.А., Панова Е.А., Ченджин Ван.** Применение голографического метода фотоупругости для моделирования распределения энергии упругих деформаций в массиве горных пород // Уголь Украины, 1997. - № 8. - С. 39-43.
9. **Морис Г., Мюллер А.** Вращение Земли: Теория и наблюдения. - К.: Наук. думка, 1992. - 512 с.
10. **Whipple K.X., Tucker G.E.** Dynamics of the stream-power river incision model: implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs // Journ. Geophys. Res. - 1999. - Vol. 104. - P. 17661-17674.
11. **Мельхиор П.** Земные приливы. - М.: Мир, 1988. - 246 с.
12. **Теркот Д.Л., Шуберт Дж.** Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 1: Пер. с англ. - М.: Мир. - 1985. - 376 с.
13. **Привалов В.А., Панова Е.А., Азаров Н.Я.** Тектонические фазы в Донецком бассейне: пространственно-временная локализация и характер проявления // Геологія і геохімія горючих копалин, 1998. - № 4. - С. 11-18.
14. **Нагорный Ю.Н., Нагорный В.Н.** Особенности геологического развития Донецкого бассейна // Геотектоника - 1976. - № 1. - С. 74-86.
15. **Привалов В.А., Саксенхофер Р., Жикаляк Н.В., Писковой М.А., Панова Е.А.** Тепловые потоки в геологической истории Донбасса: результаты моделирования // Наук. праці ДонНТУ: Серія гірн.-геолог., 2001. - Вип. 32. - С. 14 - 21.
16. **Sachsenhofer R.F., Privalov V.A., Zhykalyak M.V., Bueker C., Panova E., Rainer T., Shymanovskyy V.A., Stephenson R.** The Donets Basin (Ukraine/Russia): Coalification and thermal history // International Journ. of Coal Geol. - 2002. - Vol. 49. - P. 33-55.
17. **Panova E.A., Privalov V.A., Sachsenhofer R.F., Antsiferov V.A.** Exploration strategy in the Donets basin (Ukraine): definitions from thermal and burial history reconstructions // Extended abstracts of EAGE 67<sup>th</sup> Conference & Exhibition, Madrid, Spain, 13-16 June 2005, 2005. - P. 2371-2374

© Таранец Р. М., Привалов В. А., Приходько С. Ю., 2007