

**Геодинамические волны деформации в блоковой геосреде и их модельное представление в виде волн миграции сейсмической и вулканической активности**  
**А.И. Герус<sup>1,2</sup>, А.В. Викулин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*  
*e-mail: gerus@kscnet.ru*

<sup>2</sup> *Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский*

В работе изложен возможный подход к модельному описанию геодинамических волн деформации в земной коре. Приведены результаты численных расчетов динамических параметров решения модифицированного уравнения синус-Гордона и их интерпретация в смысле параметров очага землетрясения.

В настоящее время широко распространена концепция переноса деформационных напряжений в земной коре посредством «медленных движений» – волн деформации, скорости которых на несколько порядков ниже скоростей звука, но выше скоростей тектонических течений (крипа). Прямые инструментальные наблюдения таких волн затруднены тем, что они имеют очень малую скорость и амплитуду, и специфическую поляризацию. Фактически, такие волны удается распознать лишь косвенным образом – по наиболее выраженным вариациям геофизических полей. Например, изменение концентрации подпочвенного радона [8], вариация излучения акустической эмиссии [12], смещение GPS-станций [9].

Такое известное и активно исследуемое явление, как миграция сейсмической и вулканической активности, находит свое объяснение в виде волнообразных изменений полей напряжения.

Впервые представление о медленной деформационной волне как о солитоне (уединенной волне) было сформулировано В.Н. Николаевским в 1995 году [7]. В контексте механики Коссера им было предложено уравнение движения такой волны в блоковой среде в виде классического уравнения  $\sin$ -Гордона. С тех пор это уравнение успешно применяется разными исследователями при моделировании динамики разломов, а также при описании механизмов поворота и скольжения элементов земной коры [1]. Важной особенностью этого уравнения является то, что оно имеет целое семейство качественно отличающихся друг от друга солитонных решений.

В пользу представлений о солитонных деформационных волнах говорит также существование медленных деформационных фронтов в металлах, которые могут двигаться с разными скоростями в зависимости от уровня действующих напряжений, а также останавливаться и взаимодействовать между собой, как солитоны [6].

Для сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана разработана блоковая ротационная модель движения геосреды [5], которая не только не обладает недостатками, связанными с континуумом Коссера [7], но и позволяет описать такие свойства геосреды, как ее энергонасыщенность и реидность. Основные особенности этой модели заключаются в том, что: а) элементарная часть вращающегося твердого тела – блок земной коры – является жестким недеформируемым объемом; б) его движение может быть связано только с действием собственного момента; в) такое движение приводит к изменению напряженного состояния в окружающей блок земной коре [5].

В рамках блоковой ротационной модели поворотное движение блоков в цепочке также математически представлено уравнением синус-Гордона, однако в данном случае

уравнение не просто постулируется, а аналитически выводится из моментного взаимодействия блоков между собой [2, 4]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta, \quad (1)$$

где  $\theta = \beta/2$ ,  $\xi = k_0 z$  и  $\eta = c_0 k_0 t$  – безразмерные координаты,  $z$  – расстояние вдоль цепочки блоков,  $t$  – время,  $\beta$  – функция угла поворота,  $c_0$  – характерная скорость процесса,  $k_0$  – волновое число. Здесь под углом поворота следует понимать угол, в котором заключена дуга, вдоль которой блок смещается по поверхности коры; сам же блок ассоциируется с сейсмофокальным объемом.

Классическое аналитическое односолитонное решение уравнения СГ имеет следующий вид:

$$\theta = 4 \operatorname{arctg} \left[ \exp \left( \frac{\xi - u\eta - \xi_0}{\sqrt{1-u^2}} \right) \right], \quad (2)$$

$$u = \frac{U}{c_0}, \quad c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \Omega R_0,$$

где  $U$  – скорость распространения уединенной волны деформации (поворота).

В модели движения среды, описываемой уравнением СГ (1), волновое решение (2) задает равномерное смещение равновеликих блоков друг относительно друга. Скорость распространения такой волны постоянна во времени. Для того, чтобы уравнением (1) можно было описать реальный сейсмический процесс, в нем необходимо учесть структурную неоднородность модельной цепочки.

Дополним (в соответствии с теорией возмущений [10]) нашу модель (1) эффектами отклонения моментов сил блоков от равновесных положений  $\mu$  и трения на границах  $\alpha$ . Тогда структурное возмущение будет выглядеть следующим образом:

$$\mathcal{E}f = -\alpha \frac{\partial \theta}{\partial \eta} - \mu \delta(\xi) \sin \theta, \quad (3)$$

и возмущенное уравнение СГ запишется в виде:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \mu \delta(\xi) \sin \theta, \quad (4)$$

где  $\delta(\xi)$  – Функция Дирака.

Уравнение (4) не имеет аналитических решений, так как в формуле одиночного солитона (2) скорость  $u$  и фаза  $\xi_0$  в присутствии структурного возмущения (3) приобретают зависимость от времени:

$$X = \int_0^t u(t') dt' + \xi_0(t), \quad \frac{dX}{dt} = u(t) + \frac{d\xi_0(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$\theta = 4 \operatorname{arctg} \left[ \exp \left( \frac{\xi - X(t)}{\sqrt{1-u(t)^2}} \right) \right]. \quad (6)$$

Следуя методике авторов [10], в результате подстановки (5)-(6) в (4) мы получили систему уравнений, из которой и были численно рассчитаны динамические параметры модели – значения координаты  $X$  и скорости  $u$ . Кроме того, нами была рассчитана производная по времени от функции угла поворота блока – скорость поворотного деформирования:

$$\dot{\theta} = \frac{d\beta}{dt} = 20 \sqrt{\frac{\Omega \sqrt{G/\rho}}{R_0}} \frac{u}{\sqrt{1-u^2}} \sec h \left( \frac{X-u\eta}{\sqrt{1-u^2}} \right), \quad (7)$$

которая при моделировании деформационного процесса представляет большой интерес.

При  $\alpha = \mu = 0$  уравнение (4) сводится к невозмущенному уравнению (1), для которого солитон (2) движется равномерно, т.е. имеет постоянные значения  $U$  и  $\dot{\theta}$ .

Анализ проводился при значениях параметра  $\alpha = 0.4-0.8$ , соответствующих реальным разломам [11], с фиксированной величиной коэффициента неоднородности  $\mu = 0.0005$ , а также при значениях  $\mu$  в пределах  $\mu = 0.0001-0.0005$  и фиксированном  $\alpha = 0.6$ . В результате нами были получены следующие графики изменения динамических параметров решения (рис. 1).

Скорость распространения волны и скорость поворотной деформации в присутствии структурного возмущения (3) меняются со временем, причем первая всегда имеет один локальный максимум  $U_{max}$ , а вторая – два максимума и один минимум между ними. После колебаний оба параметра выходят на асимптотику. Значение координаты  $X$  асимптотически ограничено величиной блока –  $10^5$  м.

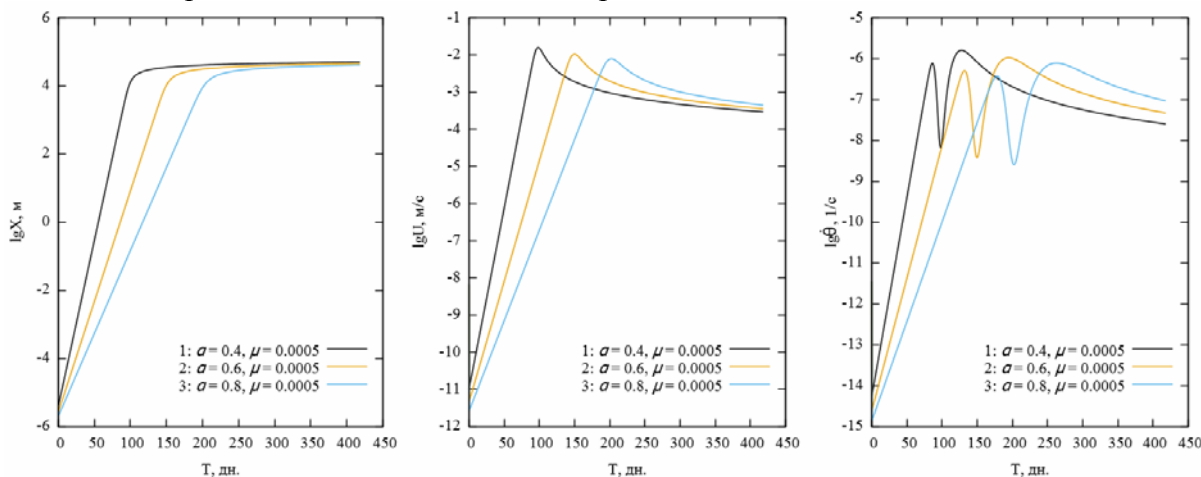


Рис. 1. Динамика изменения параметров  $X$ ,  $U$  и  $\dot{\theta}$  при  $\alpha = 0.4, 0.6, 0.8$ .

Помимо зависимостей скорости распространения процесса от значений  $\alpha$  и  $\mu$ , было установлено существование инвариантных величин, не зависящих от  $\alpha$  и  $\mu$ , но характерных для процесса в целом: 1) отношение максимумов скорости деформации  $\dot{\theta}_{\max 2}/\dot{\theta}_{\max 1} \approx 2$ ; 2) отношение продолжительностей максимумов скорости деформации  $\Delta T_{\max 2}/\Delta T_{\max 1} \approx 6$ , которые могут быть интерпретированы как форшоковые и афтершоковые закономерности [3].

Интерпретация графика скорости деформации  $\dot{\theta}$  может быть следующей. Структурная неоднородность в цепочке, величина которой характеризуется коэффициентом  $\mu$ , отражает момент реакции блока на подошедшую к нему волну деформации в виде «срабатывания», высвобождения накопленных напряжений при землетрясении, произошедшем в результате локализации неустойчивой деформации в определенный момент времени (минимум на графике  $\dot{\theta}$ ). Тогда первой и второй стадиям взаимодействия геодинамической волны с сейсмофокальным блоком (первый и второй максимумы на кривой  $\dot{\theta}$ ) могут соответствовать форшоковая и афтершоковая стадии сейсмического цикла.

Предельная скорость миграции глобальной сейсмической активности по оценкам в [5] составляет  $V_{1,\max} = 1-10$  см/с, а энергетический характер миграционной

зависимости соответствует солитонному типу возбуждения. В нашей численной модели (4) солитонное решение также демонстрирует такие значения  $U_{max} = 1-10$  см/с (которые мы можем расценивать как его предельную скорость  $c_0$  в (2)) на некоторых диапазонах значений параметров  $\alpha$  и  $\mu$ ; в частности, при соответствующих реальным разломам [11]  $\alpha = 0.6$  и  $\mu = 0.0005 - 0.0050$ . Скорости примерно такого же порядка получают и многие другие исследователи в своих оценках.

Таким образом, несмотря на принципиальную сложность прямого инструментального наблюдения медленных геодинамических волн деформации в земной коре, существует немало косвенных свидетельств и признаков их существования, позволяющих в той или иной степени смоделировать механизмы их распространения и оценить некоторые их параметры. Приведенный в данной работе подход, будучи строго физическим по своей сути, в процессе численного моделирования убедительно согласуется с экспериментальными данными и позволяет описать некоторые свойства миграции сейсмического и вулканического процессов.

### Список литературы

1. *Быков В.Г.* Нелинейные волны и солитоны в моделях разломно-блоковых геологических сред // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 5. С. 1008-1024.
2. *Викулин А.В.* Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика: сб. тр. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2011. 407 с.
3. *Викулин А.В.* Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. 151 с.
4. *Викулин А.В., Иванчин А.Г.* О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2013. № 3. С. 67-84.
5. *Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г. и др.* О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 3. С. 547-557.
6. *Макаров П.В., Перышкин А.Ю.* Математическая модель и результаты численного моделирования медленных волн деформации в элементах земной коры // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 3-8 октября 2016 г. М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 2. С. 301-307.
7. *Николаевский В.Н.* Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. 1995. Т. 341. № 3. С. 403-405.
8. *Фирстов П.П., Макаров Е.О.* Особенности формирования предвестниковых аномалий землетрясений в подпочвенном радоне на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Пятая научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Сборник материалов. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2015. С. 300-305.
9. *Bykov V.G., Trofimenko S.V.* Slow strain waves in blocky geological media from GPS and seismological observations on the Amurian plate // Nonlin. Processes Geophys. 2016. № 23. P. 467-475.
10. *McLaughlin D.W., Scott A C.* Perturbation analysis of fluxon dynamics // Phys. Rev. A. 1978. № 18. P. 1652-1680.
11. *Nur A., Ron H., Scotti O.* Fault mechanics and the kinematics of block rotation // Geology. 1986. № 14. P. 746-749.
12. *Poscolieri M., Gregori G.P., Paparo G. et al.* Crustal deformation and AE monitoring: annual variation and stress-soliton propagation // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2006. № 6. P. 961-971.