

Викулин А.В.¹, Викулина С.А.², Осипова Н.А.¹

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, vik@kscnet.ru*

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Введение

Имеющиеся данные прямо указывают на вращательный, крутильный и вихревой характер движения геофизических блоков, тектонических плит и других геологических структур планеты [7, 18]. Важно, что многие геофизики и геологи, как непосредственно работающие с материалом исследователи, отмечают «самостоятельный», «собственный», «с ненулевыми дивергенциями и вихрями» и упругий характер таких движений, которые прямо связаны с вращением планеты [18, 22]. Более того, именно наличие сильно выраженных нелинейных свойств позволяет горные породы рассматривать как среду с собственными источниками упругой энергии [16]. Вращения мезоструктур на большие (до 1–10 градусов и более) углы отмечены и в поликристаллических материалах [8, 9].

Таким образом, геофизические и геологические данные приводят нас к специфической задаче о поле упругих напряжений во вращающейся блоковой среде [2 – 4, 23].

Постановка задачи

Для блоковых геофизических нелинейных сред [10, 15, 17, 19] в рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений [13] была поставлена и аналитически решена задача о поле напряжений во вращающемся с угловой скоростью Ω твердом теле вокруг упруго связанного с ним небольшого поворачивающегося *под действием внутренних источников* макрообъема V [2, 6, 23]. Основная идея решения такой задачи заключается в том, что когда V упруго сцеплен с окружающей его средой (матрицей), изменение за счет внутренних источников направления момента импульса макрообъема приводит к появлению вокруг него упругих напряжений, которые в силу законов сохранения имеют момент силы. Эта идея соответствует известному положению в теории вихрей [21, с. 17]: «завихренность пропорциональна моменту количества движения частиц».

Смысл, который мы вкладываем в понятие «собственный момент блока», по сути – спина, наиболее близок «собственному моменту количества движения конечного объема сплошной среды» в смысле Л.И. Седова [20, с. 146]. Такой наш подход к сеймотектоническим задачам, при котором упругое поле вокруг макрообъема (блока) вращающейся среды, по сути, «наследует» его «собственный момент» (циркуляцию), в принципе, отличается от подходов других авторов, которые либо не учитывают вращения Земли [10, 12, 19], либо учитывают формально, в рамках моментной теории упругости [1, 12, 24]. Отличие нашей ротационной модели от континуума Коссера, наиболее часто применяющегося для объяснения влияния ротации планеты на геофизические процессы, заключается в том, что блоки геофизической среды не просто имеют ротационные степени свободы, они имеют *собственный момент*, который в случае вращения среды и приводит к целому ряду интересных специфических следствий.

Решение задачи

Решение задачи для блока шаровой формы радиуса R_0 в сферической системе координат (r, φ, θ) получены для области $r \geq R_0$ в работах [3, 4, 23] аналитические решения для момента силы упругого поля вокруг блока, направленного перпендикулярно плоскости его поворота

$$K = -6\pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \beta / 2, \quad (1)$$

величины упругой энергии

$$W = 16/15 \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2, \quad (2)$$

поля смещений

$$U_r = U_\theta = 0, U_\varphi = \Omega R_0^4 r^{-2} \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \theta \sin \beta / 2, r \geq R_0 \quad (3)$$

и напряжений

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 \Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \theta \sin \beta / 2, r \geq R_0. \quad (4)$$

Остальные компоненты напряжений равны нулю.

При параметрах модели: плотности среды $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, модуле сдвига $G = 10^{11} \text{ н/м}^2$, угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$, и размере блока $R_0 \approx 100 \text{ км}$, соответствующих сейсмофокальным блокам земной коры, для сильнейших (с магнитудами $M \approx 8$) землетрясений из соотношений (1) – (4) получаем: $U_0 \approx 10 \text{ м}$; $\sigma_0 \approx 100 \text{ бар}$; $W_0 \approx 10^{16 \pm 18} \text{ дж}$; $K_0 \approx 10^{28 \pm 30} \text{ дин}\cdot\text{см}$, которые по порядку величины близки реально регистрируемым при таких землетрясениях смещениям, сброшенным напряжениям, упругой энергии и сейсмическому моменту соответственно. Эти значения достигаются при угле поворота блока (очага землетрясения) $\beta \approx \beta_0 = U_0 / R_0 \approx 10^{-4} \text{ рад}$. При продолжительности сейсмического цикла (повторяемости сильнейших землетрясений в одном месте) 100 – 1000 лет для скорости поворота блока получаем «механическую» (модельную) оценку $10^{-(4 \pm 6)} \text{ град/год}$, которая оказалась близкой «геологическим» скоростям вращения Исландии, микроплит Наска и Хуан-Фернандос и других блоков и плит земной коры [7, 18].

Следует отметить, что при форме блока, близкой к эллипсоидальной или овальной, конечные формулы существенным образом не изменятся. В них, как показывают оценки [6], появляются коэффициенты, близкие к единице.

Дальнодействие ротационного упругого поля

Для определения величины энергии взаимодействия поворачивающихся блоков воспользуемся известной закономерностью, согласно которой упругая энергия (в рамках закона Гука) пропорциональна квадрату деформации. Тогда для двух блоков, записывая величину деформации какой-либо части твердого тела в виде суммы деформаций, создаваемых в этой части каждым из блоков в отдельности $W = G \int (a + b)^2 dV = G \{ \int a^2 dV + \int b^2 dV + 2 \int abdV \}$ получим выражение, в котором «перекрестные» слагаемые определяет энергию взаимодействия блоков друг с другом $W_{int} = 2G$. Здесь a и b – тензоры упругой деформации, созданные в результате поворота первой и второй областями соответственно, интегрирование проводится по всему объему тела.

Определим энергию взаимодействия. Полагая блоки шаровыми с радиусами R_{0a} и R_{0b} и расстоянием между ними l для энергии взаимодействия двух поворачивающихся (с одинаковой скоростью) областей получим выражение [4, 6]:

$$W_{int} = 3/2 \pi \rho \Omega^2 R_{0a}^4 R_{0b}^4 l^{-3} \cos \phi. \quad (5)$$

Здесь ϕ – угол между моментами блоков a и b .

Отношение энергии взаимодействия W_{int} к «собственной» энергии блока W на основании соотношений (2) и (5) определится равенством: $\frac{W_{int}}{W} = \frac{45 (R_0/l)^3 \cos \phi}{32 (\sin \beta/2)^2} = \delta$. Видно, что

максимальное ($\cos \phi \approx 1$) расстояние, на котором энергия взаимодействия будет по порядку величины близка собственной энергии блока ($\delta \approx 1$), определится из соотношения $l_0 \approx 2\beta^{-2/3} R_0$ или при $\beta \approx \beta_0 = 10^{-4} \text{ рад}$ получаем $l_0 = (10^2 - 10^3) R_0$. Из полученного соотношения видно, что упругие поля, создаваемые вокруг поворачивающихся внутри вращающегося тела блоков, являются, по сути, *дальнодействующими*.

Миграция землетрясений

Рассмотрим одномерную цепочку поворачивающихся взаимодействующих блоков, расположенную внутри твердого тела, вращающегося с угловой скоростью Ω . Будем полагать, что все блоки имеют форму шаров одинакового радиуса $R_0 (\approx 1/2L_0)$.

Рассмотрим случай, когда все блоки в цепочке движутся равномерно. Тогда в соответствии с результатами, полученными выше, уравнение движения для блока в цепочке запишем в виде:

$$I \frac{d^2 \beta}{dt^2} = \overline{K}_1 + \overline{K}_2, \quad (6)$$

где β - как и выше, угол, на который повернулся блок в результате подготовки землетрясения, K_1 - собственный момент блока (1), K_2 - момент, действующий на блок со стороны всех остальных блоков цепочки. Окончательно, уравнение движения (6) для блока в безразмерных координатах $\xi = k_0 x$, $\eta = c_0 k_0 t$ можно записать в виде [3, 4, 23] (x - расстояние вдоль цепочки блоков):

$$\partial^2 \mathcal{G} / \partial \xi^2 - \partial^2 \mathcal{G} / \partial \eta^2 = \sin \mathcal{G}. \quad (7)$$

Здесь $\mathcal{G} = \beta / 2$. Волновое число и скорость, характеризующие сейсмический процесс, соответственно определяются из соотношений:

$$k_0^2 = \frac{3\pi\Omega}{wV} \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{4/3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}}, \quad (8)$$

$$c_0^2 = \frac{wV}{I}, \quad (9)$$

где w - линейная плотность упругой энергии в цепочке, V - объем блока, I - его момент инерции.

Уравнение (7) известно как уравнение синус-Гордона.

Известный фактический материал по скоростям очагов тихоокеанских землетрясений собран в работах [3, 5, 6, 14] и представлен на рисунке.

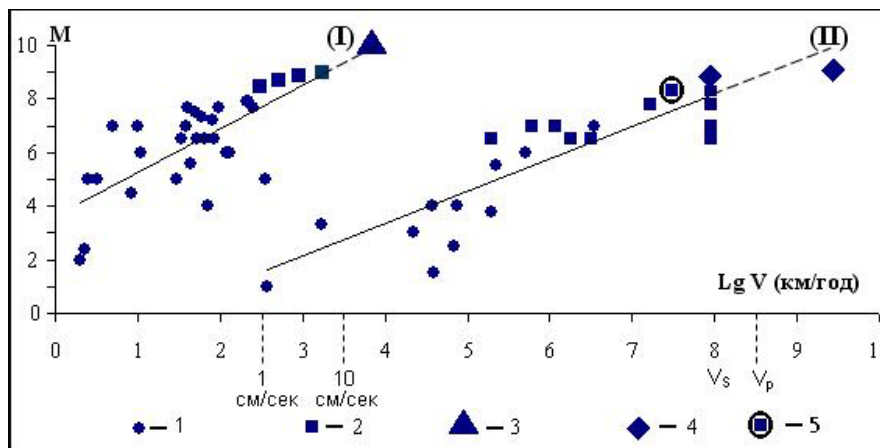


Рисунок. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений и определенные по ним зависимости магнитуды землетрясения M как функции скорости их миграции V : $M(\text{Lg}V)$ [5, с. 296]. 1 - данные, полученные ранее [6]; 2 - 5 - более поздние данные, полученные в [5, 14], 3 - скорость миграции сильнейших землетрясений-дуплетов с $M_W = 8,1-8,7$ в 1897-1901 гг. вдоль окраины Тихого океана; 4 - скорости миграции толчков в дуплетах 4.11.1952, Камчатка, $M_W = 9,0$ и 13.11.1963 Курилы, $M_W = 8,7$; 5 - скорость миграции, соответствующая максимальному значению магнитуды форшока $M = 8,3$, которым за 40 с предварялся основной толчок Чилийского землетрясения 1960, $M = 8,3$, $M_W = 9,5$; $V_p \approx 8 \text{ км/сек}$ и $V_s \approx 4 \text{ км/сек}$ - продольная и поперечная сейсмические скорости соответственно. (I) и (II) - зависимости магнитуды от скорости «глобальной миграции» вдоль окраины Тихого океана $M_1(\text{Lg}V_1)$ и скорости «локальной» миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений $M_2(\text{Lg}V_2)$ соответственно.

Из данных на рисунке видно, что все поле скоростей достаточно отчетливо разбивается на две области, разделенные значением:

$$V^0 = (10^2 - 10^3) \text{ км/год} \approx 1-10 \text{ см/сек.} \quad (10)$$

В области с большими значениями ($V_2 > V^0$) расположены скорости миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений – локальная миграция, в области с меньшими значениями ($V_1 < V^0$) – скорости, определяющие миграцию в больших пространственно–временных пределах – глобальная миграция.

По аналогии с обычными упругими волнами, считая длину волны экситона (решения (2) на рисунке) λ_0 равной размеру сейсмофокального блока $\lambda_0 \approx R_0$, $k_0 = 2\pi/R_0$, для значения характерной скорости сейсмического процесса c_0 получаем следующее выражение:

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \sim V_R V_S, \quad (11)$$

или при принятых выше параметрах модели $c_0 \approx 1-10 \text{ см/сек.}$

Как видим, характерная скорость модельного ((6) – (9)) сейсмического процесса c_0 оказалась близкой определяемой соотношением (10) скорости V^0 , что «экспериментальные» миграционные соотношения (I) и (II) на рисунке позволяет считать соответственно солитонным и экситонным (в смысле А.С. Давыдова [11]) решениями задачи (6) – (9).

Значение c_0 , согласно соотношения (11), с точностью до численного множителя может быть представлено в виде среднегеометрического произведения двух скоростей: центробежной $V_R = \Omega R_0$ и упругой поперечной $V_S = (G/\rho)^{1/2}$. Отсюда и название модели (6) – (9), данное ей авторами – ротационная модель [3, 6].

Заключение

В работе поставлена и аналитически решена задача о поле упругих напряжений, возникающем вокруг поворачивающегося за счет внутренних источников блока земной коры. Единственное физическое предположение модели заключается в том, что изменение, вследствие вращения Земли, направления момента импульса блока приводит к появлению вокруг него *упругого поля с моментом силы*. Оценки показали, что в случае размера блока $R \approx 100$ км и угле его поворота $\beta \approx \beta_0 = 10^{-4} \text{ рад}$, теоретические (модельные) значения для величин упругой энергии, сейсмического момента, напряжений и подвижки близки таким же величинам, характерным для очагов сильнейших ($M > 7,5$) землетрясений. В свою очередь, такие углы поворота при разумных предположениях о повторяемости землетрясений хорошо согласуются с установленными скоростями вращения блоков и плит земной коры. Тем самым показано, что ротационная модель применима к описанию процессов, протекающих в очагах землетрясений.

Установлен дальнедействующий характер таких ротационных упругих полей напряжений, что позволило перейти к рассмотрению цепочки сейсмофокальных блоков, позволяющих моделировать сейсмический процесс, протекающий в сейсмических поясах планеты. Феноменологически поставлена задача о движении цепочки взаимосвязанных блоков и получено ее аналитическое решение. Показано, что решения такой задачи в виде солитонов и экситонов (в терминологии А.С. Давыдова [11]), позволяют описать весь спектр известных значений скоростей миграции землетрясений. При этом солитонные решения, представляющие собой глобальные волны миграции землетрясений (рис., (I)), по сути, медленные тектонические волны [1], характеризуются максимальными скоростями (1 – 10) см/сек. Экситонные решения (рис., (II)), по сути, быстрые тектонические волны [1], характеризуют локальные волны миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений с максимальными скоростями, близкими скоростям сейсмических волн.

В тектоническом приближении [4], считая длину волны экситона, равной размеру сейсмофокального блока (очага сильнейшего землетрясения), получено значение характерной для данной модели скорости:

$$c_0^2 \approx V_R V_S,$$

равной среднегеометрическому произведению центробежной V_R и поперечной сейсмической V_S скоростей.

Таким образом, для блоковых вращающихся геофизических сред теоретически установлено существование нового типа упругих волн – ротационных, и показано, что именно они ответственны за миграцию очагов землетрясений.

Следует отметить, что экспериментально определенные углы поворота мезообъемов в поликристаллических телах достигают 1–10 градусов и значительно превышают углы поворота блоков земной коры β_0 . Взаимодействие между «неоднородностями» твердого тела в значительной степени определяют его физические свойства [8, 9]. Это позволяет полученные в работе решения применить в том числе и к задачам прочности «обычных» вращающихся твердых тел.

Список литературы

1. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1179–1190.
2. Викулин А.В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Доклады АН СССР. 1990. Т. 310. № 4. С. 621–824.
3. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 150 с.
4. Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. С. 559–570.
5. Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 463 с.
6. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 6. С. 94–102.
7. Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН – КГПУ, 2004. 297 с.
8. Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинация в кристаллах. Л.: Наука, 1986. 224 с.
9. Вопросы материаловедения №1 (29). Труды международного семинара «Мезоструктура», Санкт-Петербург, 4–7 декабря 2001 г. / Ред. И.В. Горынин. СПб: ЦНИИ КМ «Прометей», 2002. 443 с.
10. Гольдин С.В. Физика «живой» Земли // Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. Кн. 1. С. 17–36.
11. Давыдов А.С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // УФН. 1982. Т. 138. Вып. 4. С. 603–643.
12. Курленя М.В., Опарин В.Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II. ФТПРПИ. 2000. № 4. С. 3–26.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 2003. 246 с.
14. Осипова Н.А. О миграции тихоокеанских землетрясений в области магнитуд $M > 8$ // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-практической конференции. 11–17 ноября 2007 г. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. С. 196–199.
15. Островский Л.А. Неклассическая нелинейная акустика // Нелинейные волны 2004. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 109–124.
16. Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды / Ред. Ю.Г. Леонов. М.: Наука, 2008. 379 с.
17. Проблемы геофизики XXI века: В 2 кн. / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003. Кн. 1, 311 с. Кн. 2, 333 с.
18. Ротационные процессы в геологии и физике // Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.
19. Садовский М.А. Новая модель геофизической среды // Българско геофизично списание, 1985. Т. XII. №2. С. 3–10.
20. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1973, 536 с.
21. Сэффмэн Ф.Дж. Динамика вихрей. М.: Научный мир, 2000, 376 с.
22. Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes // Geophys. J. Int. 1995. V. 122. P. 776 – 783.
23. Vikulin A.V. Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects. Eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. Springer Berlin – Heidelberg – New York, 2006. P. 273–289.
24. Xie Xin-sheng. Discussion on rotational tectonics stress field and the genesis of circum-Ordos langmass fault system. Acta Seismol. Sinica. 2004, V.17, N 4, p. 464 – 472.