

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЛОКОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Трофименко С. В., Гриб Н. Н.

*Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО "Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова", г. Нерюнгри, Россия (678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Южно – Якутская 23), e-mail: [trofimenko\\_sergei@mail.ru](mailto:trofimenko_sergei@mail.ru)*

Рассмотрена задача движения блока земной коры для случая периодической силы трения. В системе блоков с упругим взаимодействием и наличием одного дезинтегрированного контакта (разлома) задача взаимодействия системы блоков сводится к одномерному уравнению движения блока в периодическом потенциале внешних сил. Приведение уравнения движения блока к уравнению в обобщенных безразмерных координатах позволило сопоставить задачу о движении блока с известной задачей о колебании нелинейного математического маятника. Сравнение уравнения математического маятника и полученное уравнение движения блока показало, что движение блока происходит в виде затухающих колебаний, когда затухание пропорционально первой степени скорости. Переход колебательного движения блоков в поступательное (в режим «stick-slip») возможен при уменьшении сил трения вследствие изменения физических свойств контакта. Фактически это означает, что длительные слабые периодические воздействия на массив горных пород могут инициировать землетрясение либо модулировать реальный сейсмический процесс.

Ключевые слова: земная кора, блоковое строение, периодическая нагрузка, нелинейная сила трения, землетрясение.

## MECHANICAL MODEL BLOCK MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST

Trofimenko S. V., Grib N. N.

*Technical Institute (branch) "North-Eastern Federal University of MK Ammosov" Neryungri, Russia (678 960, Republic of Sakha (Yakutia), Neryungri Street. South - Yakut 23), e-mail: [trofimenko\\_sergei@mail.ru](mailto:trofimenko_sergei@mail.ru)*

The problem of motion of crustal blocks in the case of a periodic force of friction. The system blocks with elastic interaction and the presence of a disintegrated contact (fault), the problem of interaction between blocks is reduced to one-dimensional equation of motion of the block in the periodic potential of external forces. Reduction of equations of motion of the block to the equation in dimensionless generalized coordinates allow to compare the motion of a block of well-known problem of the vibration of a nonlinear pendulum. Comparison of the pendulum equation and the resulting equation of motion of the block showed that the movement of the block is in the form of damped oscillations when the damping is proportional to the velocity. The transition of the vibrational motion of the blocks in the forward (in the mode of «stick-slip») is possible with a decrease in the friction forces due to changes in physical properties of the contact. In fact, this means that the weak long periodic effects on rock mass can trigger an earthquake, or modulate the actual seismic process.

Key words: Earth's crust, block structure, the periodic load, the nonlinear friction force, earthquake.

### Введение

По результатам статистических исследований аномалий геофизических полей магнитной и гравитационной природы в пределах изучаемой территории установлена блоковая структура земной коры [4] в виде ромбических структур, что отражает общие закономерности строения литосферы [3].

При изучении закономерностей сейсмического процесса Олекмо – Становой зоны было установлено, что в динамике сейсмичности содержатся периодические компоненты. Этот результат свидетельствует о том, что динамическая функция состояния массива горных пород (энергонасыщенность) должна содержать периодические компоненты вида

$$F_j(E, \omega_j) \approx \sum \alpha_i F_{ij}(E, \omega_j), \quad (1)$$

где  $E = f(x, y, z)$ ,  $\omega_j$  – энергетический и периодический параметры сейсмической активности, формирующиеся под действием внешней силовой нагрузки  $\sum \alpha_i F_{ij}(E, \omega_j)$ ;  $i$  – количество разнородных силовых нагрузок.

Статистический анализ распределений количества сейсмических событий на различных периодах реализаций показал, что неоднородность сейсмической активности наиболее контрастно проявляется на суточных и недельных периодах. Фактически это означает, энергонасыщенность массива горных пород (1) можно аппроксимировать функциями вида

$$F_1(E, \omega_j) = N / N_{\max} \cdot \sin(2\pi k_1 / 24), \quad (2)$$

где  $k_1 = 1, 2, \dots, 24$  – дискретное время (часы суток) и аналогично для недельной статистики

$$F_2(E, \omega_j) = N / N_{\max} \cdot |\cos(2\pi k_2 / 7)| \quad (3)$$

где  $k_2 = 1, 2, \dots, 7$  – дискретное время (дни недели).

Изменение энергонасыщенности массива горных пород в виде функций распределения (2) – (3) связано с действием внешней силовой нагрузки и, как следствие, с деформацией геофизической среды [3].

Источником суточных аномалий (2) могут быть силы инерции, связанные с неравномерностью суточного вращения Земли, и как следствие, с изменением кинематики взаимодействия блоков земной коры. Для недельных аномалий (3) – причиной может быть семидневная цикличность техногенной нагрузки на геологическую среду посредством массовых взрывов.

Фактически это означает, что необходимо рассмотреть задачи о движении блоков под действием внешней периодической силовой нагрузки в потенциальном поле силы трения. Данные задачи определили цель настоящего исследования, направленную на построение моделей движения блоков земной коры под действием слабых возмущений.

### **Результаты моделирования**

Поставленная задача о движении (относительном) блоков может быть рассмотрена в одномерном случае, если из всего набора шовных межблоковых зон одна отличается по своим физическим свойствам (верхний фрагмент, рис.1). В этом случае, выбирая направление оси  $x$  вдоль данного контакта и проецируя все векторные величины на данное направление, получим одномерную модель.

Если рассматривать границу раздела блоков как тривиальный трибологический контакт, то для анализа движения блока в режиме «stick-slip» по контакту можно использовать формализм обобщенной одномерной модели Томлинсона [5], разработанной для изучения процессов трения. В рамках этой модели рассматривается одномерное движение тела с

массой  $m$  под действием силы  $F$  в поле периодической потенциальной силы сопротивления с амплитудой  $N$  и периодом  $a$ . Уравнение движения тела имеет вид:

$$mx_{tt} = F - \eta x_t - N \sin(2\pi x/a), \quad (4)$$

где  $\eta$  – вязкость среды,  $x$  – координата тела. Если ввести новые безразмерные переменные  $u = 2\pi x/a$  и  $\xi = t\sqrt{2\pi N/ma}$ , то  $x = (a/2\pi)u$ ,  $\partial t = \partial \xi / \sqrt{2\pi N/ma}$ , и уравнение (4) может быть переписано как

$$u_{\xi\xi} + \sin(u) = K_2 - K_1 u_\xi, \quad (5)$$

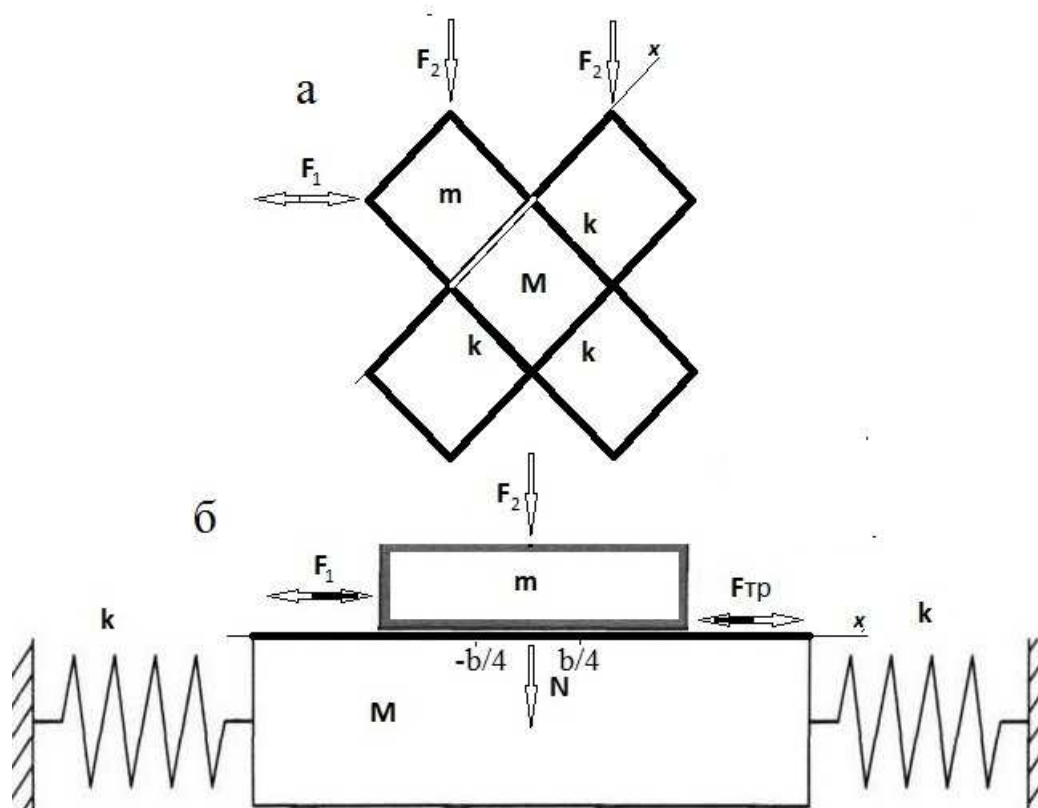
где  $K_2 = F/N$  – безразмерная сила,  $K_1 = \eta\sqrt{a/2\pi Nm}$  – безразмерный коэффициент затухания.

Теперь рассмотрим трибологическую систему (рис.1, нижний фрагмент), состоящую из двух блоков массой  $m$  и  $M$ , разделенных межблоковой шовной зоной, тонкой пленкой между блоками (трибологический контакт). Блок  $m$  имеет возможность двигаться относительно блока  $M$  за счет внешней силы  $F_1$  в поле силы  $F_2$ . Блок  $M$  соединен с основанием двумя пружинами с коэффициентом жесткости  $k$ . Пусть сила  $F_1$ , вызывающая смещение блока  $m$ , изменяется по периодическому закону  $F_1 = F_1^0 \sin(\omega t)$ . Проекция этой силы равны  $F_1^x = F_1 \cos \gamma$  на ось  $x$  и  $F_1^N = F_1 \sin \gamma$  на направление силы  $F_2$ , где  $\gamma$  – угол между направлением действия силы  $F_1$  и осью  $x$ . Координату его центра тяжести  $x$  относительно неподвижной системы координат и скорость движения блока  $v$  можно записать в виде  $x = \alpha \sin(\omega \cdot t)$ ,  $v = -\alpha \omega \cos(\omega \cdot t)$ . В этом случае сила трения  $F_{тр}$  будет зависеть от нагрузки  $N(F_2, F_1)$  нелинейным образом (периодический потенциал).

Действительно, если упруго-вязкие свойства контакта не меняются за период действия силы  $F_1$ , то силу трения можно представить в виде суммы  $F_1^\omega = F_{el}^\omega + F_v^\omega$ , где  $F_{el}^\omega$  – упругая и  $F_v^\omega$  – пластическая составляющие силы трения. Пусть  $k_{el}^0$  – коэффициент трения в отсутствие периодической силы, тогда силу  $F_{el}^\omega$  можно представить в виде

$$F_{el}^\omega = F_2 k_{el}^0 + F_1 \sin \gamma \sin(\omega \cdot t) k_{el}^0 = F_2 k_{el}^0 (1 + F_1 / F_2 \sin \gamma \sin(\omega \cdot t))$$

где  $k_{el}^0 \sin(\omega \cdot t)$  периодическая компонента коэффициента трения. Сила  $F_v^\omega$  пропорциональна скорости движения блока в первой степени  $F_v^\omega = \eta x'$ , где  $\eta$  – вязкость среды контакта.



**Рис. 1.** Блоковая (а) и трибологическая (б) модели движения блока. Обозначения в тексте

Если контакт не однороден, то дополнительно к силе  $F_{el}^{\omega}$  появится сила трения  $F_{el}^b$ , пропорциональная линейному размеру неоднородности  $b=L/2n$ , где  $L$  – линейный размер блока,  $n=1, 2, 3, \dots$ .

$$F_{el}^b = N(F_2) \sin(2\pi x / b), \quad x \in (0, L). \quad (6)$$

Под действием силы  $F_{el}^{\omega}$  блок  $M$  начнет движение. Уравнение движения блока будет зависеть от силы горизонтального сжатия  $F_2$  (направление силы выбрано условно), которую за период действия силы  $F_1$  можно принять постоянной и сил упругости  $F_{уп} = -kx$  при взаимодействии с соседними блоками.

Таким образом, уравнение движения (4) с учетом (6) можно записать в виде

$$mx'' = F - \eta x' - N(F_2, F_1) \sin(2\pi x / b) - F_{el}^{\omega} - 2kx. \quad (7)$$

Если блоки расположены горизонтально, то роль нагрузки играет нормальная проекция силы горизонтального сжатия  $F_2$ . Отличие двух положений блоков заключается в том, что при вертикальном расположении  $F_{тр} \leq N(m)$ . В горизонтальном положении сила трения не зависит от массы подвижного блока, и сила трения может принимать любое значение (в зависимости от величины  $F_2$ ).

Ограничением горизонтального смещения без проскальзывания служат максимумы  $\sin(2\pi x/b)$  в точках  $\pm b/4$  (см. рис.1). При дальнейшем увеличении  $x$  движение переходит в режим «stick-slip», то есть блок из одной потенциальной ямы переходит в другую. При этом величина смещения  $\delta(x)$  будет пропорциональна ( $\pm b/4$ ), т.е.  $\delta(x) = \pm kb/4$ , где  $k = 0,1,2,\dots$ . Этот режим может наблюдаться и при изменении физических параметров контакта, как это показано в работе [1] при изучении движения блоков в режиме «stick-slip», в пределах  $x \in (-b/4, b/4)$  изменения силы трения.

Уравнение (7) обобщает уравнение (4) и эквивалентно ему при отсутствии сил дальнего действия  $kx=0$  и периодической нагрузки  $F_2 k_{el}^0 \sin(\omega t) = 0$ . Сравнивая уравнение математического маятника [2, стр. 487] и уравнение (5), можно заключить, что уравнение (5) описывает затухающие колебания, когда затухание пропорционально первой степени скорости. Переход колебательного движения блоков в поступательное (в режим «stick-slip») возможен при уменьшении сил трения (6) вследствие изменения физических свойств контакта.

#### Список литературы

1. Астафуров С. В., Шилько Е. В., Димаки А. В., Ружич В. В., Лопатин В. В., Попов В. Л., Псахье С. Г. Изучение особенностей отклика границ раздела в разломно-блоковых средах на изменение их состояния и динамические воздействия // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 5. – С. 25-32.
2. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1976. – 576с.
3. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
4. Трофименко С. В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 29, №3. – С. 64-77.
5. Tomlinson G. A. A molecular theory of friction // Phil. Mag. Series. – 1929. – P. 935-939.

#### Рецензенты:

Максимов Евгений Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор по кафедре ТИТР, Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО "Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова", г. Нерюнгри.

Заровняев Борис Николаевич, доктор технических наук, профессор, декан Горного факультета Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск.