ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 1, с. 78–81

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.3 + 551.24

ДВУХЗВЕННАЯ КЛАВИШНО-БЛОКОВАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНЕЙШИХ СУБДУКЦИОННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2021 г.
Академик РАН Л. И. Лобковский[1,2,*], И. С. Владимирова[2,3,**], Д. А. Алексеев[1,2], Ю. В. Габсатаров[2,3]

Поступило 26.10.2020 г.
После доработки 03.11.2020 г.
Принято к публикации 05.11.2020 г.

В работе рассматривается модель генерации сильнейших землетрясений в субдукционных регионах в условиях блокового строения среды. Данная схема представляет собой существенное развитие математической клавишно-блоковой модели Л.И. Лобковского, связанное с учетом нарушения сплошности не только фронтальной, но и тыловой части островной дуги. Показано, что введение в исходную модель дополнительного структурного элемента приводит к уточнению оценок ряда характеристик сейсмического процесса, поскольку предложенный подход позволяет учесть более широкий спектр геодинамических процессов, реализующихся в зонах субдукции на разных стадиях сейсмического цикла, с возможностью прямого сопоставления теоретических расчетов с данными спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: сейсмический цикл, зона субдукции, блоковое строение среды, модель генерации землетрясений

DOI: 10.31857/S2686739721010138

Сильнейшие субдукционные землетрясения (M ≥ 8) приводят к высвобождению колоссальных упругих напряжений, накопленных за сотни или даже за тысячу лет. Прогноз подобных землетрясений, наносящих значительный социально-экономический и экологический ущерб, является одной из важнейших и актуальнейших задач геофизики [1]. Примером решения задачи долгосрочного прогноза является концепция сейсмических брешей и сейсмических циклов, предложенная С.А. Федотовым для Курило-Камчатской островной дуги и северо-восточного сегмента Японского архипелага [2].

К настоящему времени значимые успехи в области прогноза землетрясений были достигнуты в таких направлениях, как изучение процесса деформирования, происходящего в области будущего очага землетрясения [3–5], поиск геофизических предвестников [6, 7] и статистический анализ закономерности сейсмического режима [8–10].

Большинство моделей, воспроизводящих сейсмический процесс, основаны на представлениях о сплошной геофизической среде, разрушаемой плоским разрывом в момент землетрясения. Континуальные представления о среде способствовали успешному решению ряда задач сейсмологии и сейсморазведки. В то же время для решения таких задач, как моделирование процессов, сопровождающих подготовку землетрясения, снятие накопленных упругих напряжений, а также релаксацию напряжений в окрестности очага после сейсмического события, концепция сплошной среды оказывается недостаточной. Более перспективным направлением представляется рассмотрение блоковой модели геофизической среды [11], что позволит разработать и реализовать методику количественного описания реального сейсмического процесса.

Одной из моделей генерации сильнейших субдукционных землетрясений, учитывающей разломно-блоковое строение континентальной окраины, является клавишная модель возникновения сильнейших землетрясений в современных зонах субдукции [12]. Эта модель объединила идеи возможного синхронного разрушения нескольких

[1] *Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
[3] *Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", Обнинск, Россия*
**E-mail: llobkovsky@ocean.ru*
***E-mail: vladis@gsras.ru*

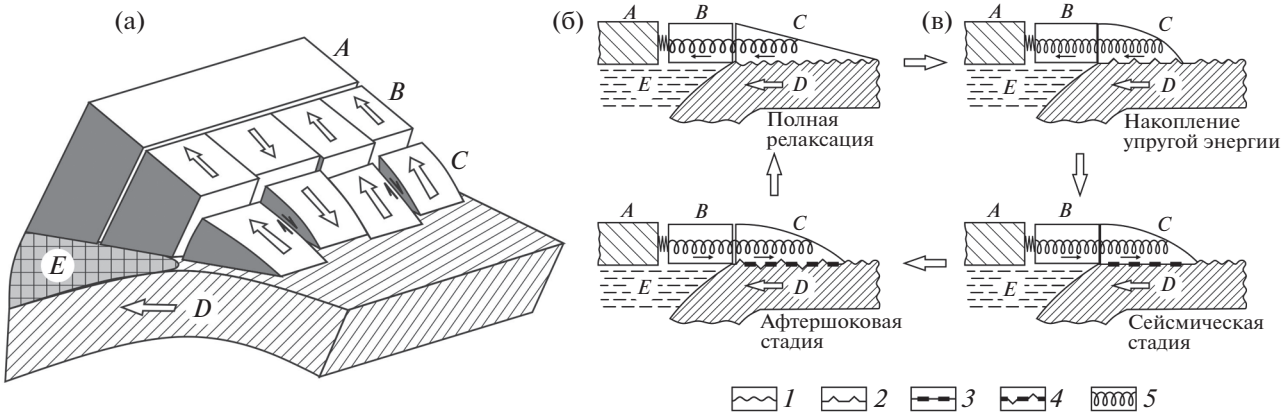

Рис. 1. Клавишная модель фронтальной части островной дуги (а) и схема последовательных этапов деформирования (нагружения и разгрузки) блоков и соответствующих стадий сейсмического цикла (б). A – недеформированная часть литосферной плиты; B – тыловой блок; C – фронтальный блок; D – пододвигаемая плита; E – астеносфера. *1* – ненарушенная "шероховатая" структура контактной зоны (СКЗ) (стабильная стадия цикла); *2* – пластически "выровненная" СКЗ (предсейсмическая стадия цикла); *3* – сильно раздробленная и неоднородная СКЗ (стадия сейсмического вспарывания); *4* – частично восстановленная СКЗ (афтершоковая стадия цикла); *5* – пружина, имитирующая упругое взаимодействие блоков и недеформированной части континентальной плиты.

смежных шероховатостей, взаимного скольжения вдоль плоскости с переменным по скорости коэффициентом трения и последующего залечивания дефектов среды в условиях высокого давления.

В работе [12] предложена численная схема для моделирования перемещений фронтальных сейсмогенных блоков на разных стадиях сейсмического цикла. Однако тыловой массив островной дуги здесь рассматривается как единый структурный элемент, не разделенный на отдельные блоки и не испытывающий собственных горизонтальных перемещений. В то же время данные натурных наблюдений в сочетании с результатами геологических и сейсмологических изысканий явно свидетельствуют в пользу того, что тыловая часть дуги также имеет сложную структуру и разделена на отдельные сегменты крупными разломами, уходящими корнями в зону контакта взаимодействующих литосферных плит [13, 14]. В силу относительно слабого взаимодействия между соседними блоками каждый из них может деформироваться независимо от смежных структурных сегментов, при этом их деформирование носит весьма сложный характер. Так, тыловые блоки, также, как и фронтальные, испытывают практически мгновенные скачкообразные смещения во время сейсмических событий. В постсейсмический период происходит медленное распрямление тыловых блоков, осложненное сопротивлением подстилающего астеносферного слоя в условиях вязкого трения на подошве блока.

Данные предпосылки определяют необходимость модернизации исходной модели [12] с целью учета нарушения сплошности не только фронтальной, но и тыловой части островной дуги (рис. 1).

Вычислительная схема, которая была использована для построения модернизированной модели, описывается системой уравнений равновесия, связывающих напряжения в рассматриваемом сейсмогенном блоке (длиной l) и соответствующем блоке тылового массива (длиной r), а также соседних с ними блоках, выражаемые через скорости смещений и вязкости материала контактного слоя, астеносферы под тыловым блоком и зон дробления, разделяющих блоки. Для каждого из блоков (любого из звеньев) имеет место уравнение равновесия: $\dfrac{\partial(H\sigma_i)}{\partial x} = \left[\tau_0^{(i)} + \dfrac{H}{d_i}(\tau_{i-1} + \tau_{i+1})\right]$, где $\tau_0^{(i)}$ – тангенциальное напряжение, действующее на основание i-го блока со стороны вязкого контактного слоя, τ_{i-1} и τ_{i+1} – латеральные напряжения трения поверхностей блока с соседними блоками, а d_i – протяженность блока вдоль простирания желоба.

Напряжения на нижней и боковых границах блоков каждого из звеньев могут быть записаны в виде:

$$\tau_0^{(i)} = -\eta(\dot{\gamma}_i)\dot{\gamma}_i = \begin{cases} -\eta(\dot{\gamma}_i)\left(\dfrac{\partial w_i}{\partial t} - V_i^1\right)\dfrac{1}{h} & 0 \le x \le l \\ -\eta(\dot{\gamma}_i)\left(\dfrac{\partial w_i}{\partial t}\right)\dfrac{1}{h_0} & l \le x \le l + r \end{cases}$$

и

$$\left[\begin{aligned} \tau_{i-1} &= \frac{\mu_{i-1}^{1,2}}{h_g}\left(\frac{\partial w_{i-1}}{\partial t} - \frac{\partial w_i}{\partial t}\right) \\ \tau_{i+1} &= \frac{\mu_i^{1,2}}{h_g}\left(\frac{\partial w_{i+1}}{\partial t} - \frac{\partial w_i}{\partial t}\right). \end{aligned}\right.$$

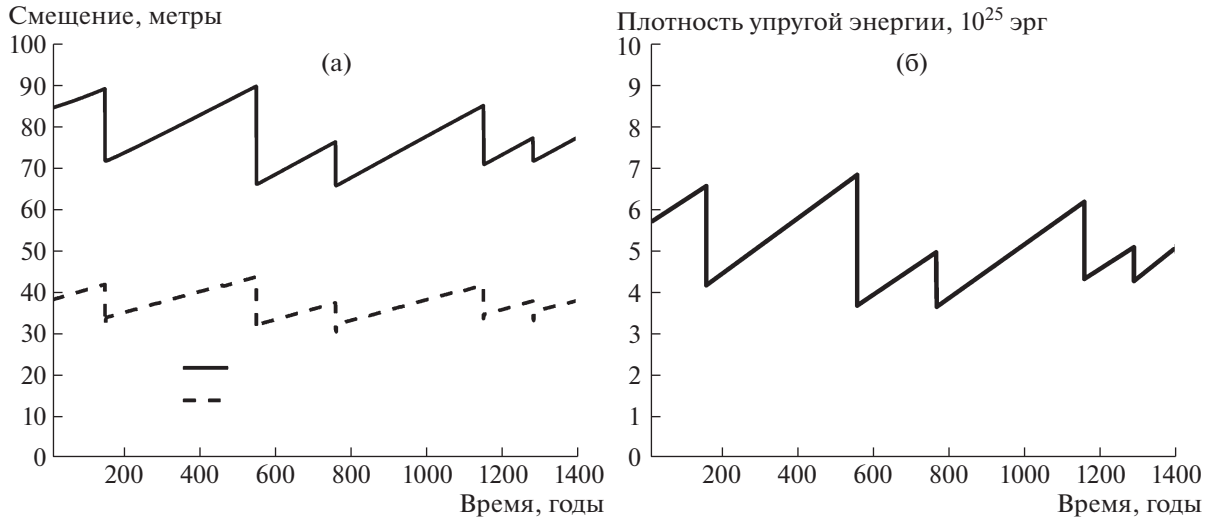

Рис. 2. Циклические смещения внешней кромки фронтального и тылового блоков (а) и вариации полной упругой энергии (б) в процессе сейсмотектонической эволюции системы с неоднородными условиями сброса напряжений.

Здесь $\dot{\gamma}_i = \left(\frac{\partial w_i}{\partial t} - V_i^0\right)\frac{1}{h}$ – средняя скорость деформации в контактном слое толщиной h, V_i^1 – скорость субдукции под блоками первого звена, h_0 – толщина слоя астеносферы, $\eta(\dot{\gamma}_i, x)$ – эффективная вязкость контактного слоя, h_g – толщина межблоковой разломной зоны, $\mu_{i-1}^{1,2}$ и $\mu_i^{1,2}$ – вязкости материала между блоками i и $i-1$, либо i и $i+1$ в первом и втором звеньях.

При этом внешние края блоков со стороны желоба являются свободными, $\left.\frac{\partial w_i}{\partial x}\right|_{x=0} = 0$, а тыловые части блоков второго звена упруго взаимодействуют с неподвижной континентальной окраиной, $\left.\left(\frac{\partial w_i}{\partial x} + k_i^r w_i\right)\right|_{x=l+r} = 0$. Дополнительные условия включают скачкообразное изменение (сброс) напряжений в момент землетрясения, что приводит к синхронным смещениям точек сейсмогенного и тылового блоков в момент землетрясения: $\sigma_i^1(x, t_{eq}^i + 0) = q^1\sigma_i^1(x, t_{eq}^i - 0)$. Пересчет моделируемых смещений в плотность упругой энергии и ее сравнение с критическим значением позволяют получить условие запуска сейсмического события: $\epsilon_i = \frac{E}{2lH_m}\int_0^l H(x)\left(\frac{\partial w_i}{\partial x}\right)^2 dx = \epsilon_{\text{cr}}$ ($H_m = (H_0 + H_l)/2$ – средняя мощность системы блоков).

Построенная вышеописанным образом система уравнений характеризуется существенной нелинейностью, и используемый для ее решения алгоритм реализован в виде явной конечно-разностной схемы, позволяющей получить инкремент смещения узловых (с учетом расположения станций наблюдения) точек внутри каждого блока для набора времен, задаваемых с определенным шагом.

В численном эксперименте, проведенном для проверки модели, были использованы геометрические и реологические параметры, характерные для островодужных систем западной окраины Тихого океана ($E_1 = 29$ ГПа, $E_2 = 80$ ГПа, $\eta = 10^{18}$–10^{19} Па с, $\mu = 0.5\times10^{19}$ Па с, $V_i^1 = 6$ см/год, $h = 1$ км, $h_0 = 20$ км, $h_g = 0.5$ км, $H_0 = 10$ км, $H_l = H_r = 50$ км, $d_i = 200$ км, $l = 100$ км, $r = 200$ км) [12–15]. Построенная модель сейсмического цикла (рис. 2) хорошо воспроизводит основные характеристики сейсмического процесса в субдукционных зонах, при этом полученная средняя продолжительность сейсмического цикла составила около 200 лет, что соответствует полученным ранее значениям для Курило-Камчатской и Японской субдукционных зон [2].

Полученные оценки косейсмических смещений фронтальных и тыловых блоков, а также продолжительность афтершоковой стадии сейсмического цикла хорошо согласуются с доступными данными спутниковых геодезических измерений и результатами независимого моделирования [13, 14]. Сопоставление построенной модели с данными спутниковых геодезических измерений позволит не только уточнить определяющие механические свойства среды, но и получить критически важные оценки времен перехода структурных элементов субдукционной системы из одного состояния в другое. В частности, реалистичные оценки момента окончания стадии консолидации контактного слоя (т.е. момента восстановле-

ния сцепления островодужного блока с плитой), а также момента контакта фронтального блока с тыловым (т.е. начала стадии упругого сжатия системы, сопровождающегося накоплением напряжений) имеют большое значение в решении задач долгосрочного и среднесрочного прогноза.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 20-17-00140.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шебалин Н.В.* Избранные труды. Сильные землетрясения. М.: Издательство Академии горных наук, 1997. 542 с.
2. *Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. Гл. 8. С. 121–150.
3. *Ruff L.J.* Asperity Distributions and Large Earthquake Occurrence in Subduction Zones // Tectonophysics. 1992. V. 211. P. 61–83.
4. *Kaneko Y., Avouac J.P., Lapusta N.* Towards Inferring Earthquake Patterns from 513 Geodetic Observations of Interseismic Coupling // Nature Geoscience. 2010. V. 3. №. 5. P. 363–369.
5. *Rosenau M., Horenko I., Corbi F., Rudolf M., Kornhuber R., Oncken O.* Synchronization of Great Subduction Megathrust Earthquakes: Insights from Scale Model Analysis // J. Geophys. Res. 2019. V. 124. №. 4. P. 3646–3661.
6. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // ДАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
7. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 242 с.
8. *Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В.* Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20.
9. *Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W.* Localization of Intermediate-term Earthquake Prediction // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. №. 12. P. 12763–12772.
10. *Sykes L.R., Menke W.* Repeat Times of Large Earthquakes: Implications for Earthquake Mechanics and Long-term Prediction // BSSA. 2016. V. 96. № 5. P. 1569–1596.
11. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
12. *Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.
13. *Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Гарагаш И.А., Баранов Б.В., Стеблов Г.М.* Постсейсмические движения после Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. на различных стадиях сейсмического цикла // ДАН. 2017. Т. 473. № 3. С. 359–364.
14. *Лобковский Л.И., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Стеблов Г.М.* Сейсмотектонические деформации, связанные с землетрясением Тохоку 2011 г., на разных стадиях сейсмического цикла по данным спутниковых геодезических наблюдений // ДАН. 2018. Т. 481. № 5. С. 548–552.
15. *Ozawa S., Nishimura T., Suito H., Kobayashi T., Tobita M., Imakiire T.* Coseismic and Postseismic Slip of the 2011 Magnitude-9 Tohoku-Oki Earthquake // Nature. 2011. V. 475. P. 373–377.

TWO-ELEMENT KEYBOARD MODEL OF STRONGEST SUBDUCTION EARTHQUAKES GENERATION

Academician of the RAS L. I. Lobkovsky[a,b,#], I. S. Vladimirova[b,c,##], D. A. Alekseev[a,b], and Y. V. Gabsatarov[b,c]

[a] *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation*

[c] *Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation*

[#] *E-mail: llobkovsky@ocean.ru*

[##] *E-mail: vladis@gsras.ru*

The paper considers a model for the generation of the strongest earthquakes in subduction regions taking into account the block structure of the medium. The model is a significant development of the mathematical keyboard model of L.I. Lobkovsky by taking into account the discontinuities of not only the frontal blocks, but also the rear massif of the island arc. It is shown that the attachement of an additional structural element into the initial model leads to a more accurate assessment of a number of characteristics of the seismic process. The proposed approach allows one to take into account a wider range of geodynamic processes occurring in subduction zones at different stages of the seismic cycle, with the possibility of direct comparison of theoretical calculations with satellite geodetic data.

Keywords: seismic cycle, subduction zone, block structure of medium, earthquake generation model