

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ГИПОТЕЗА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ  
КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОНОКУ-ОКИ (ЯПОНИЯ, 11.03.2011)

*В. Н. Татаринов*

Получено 5 июня 2018 г.; принято 25 июня 2018 г.; опубликовано 2 июля 2018 г.

Геофизический центр РАН,  
Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта

[v.tatarinov@gcras.ru](mailto:v.tatarinov@gcras.ru)

Аннотация: Землетрясение Tohoku-Oki, которое произошло 11.03.2011 г. недалеко от восточного побережья о. Хонсю, привлекло внимание ученых уникальностью экспериментальных данных о косейсмических и постсейсмических вертикальных и горизонтальных смещениях земной коры. Эти данные дали толчок для построения различных моделей и гипотез развития геодинамического процесса в данном регионе. Ниже представлена альтернативная гипотеза о геодинамических источниках катастрофических землетрясений. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Землетрясение Tohoku-Oki, геодинамика, поля напряжений.

Ссылка: Татаринов, В. Н. (2018), Альтернативная гипотеза геодинамических источников катастрофического землетрясения Tohoku-Oki (Япония, 11.03.2011), *Geoinf. Res. Papers*, 6, BS6001, <https://doi.org/10.2205/2018BS046>.

Землетрясение Tohoku-Oki, происшедшее 11.03.2011 г. недалеко от острова Хонсю, привлекло внимание исследователей не только своей энергетической мощностью и катастрофическими последствиями от волн цунами и разрушения трех ядерных реакторов АЭС «Фукусима-1», но и уникальностью экспериментальных данных о косейсмических и постсейсмических вертикальных и горизонтальных смещениях земной коры в районе Японского архипелага, которые были получены на пунктах геодинамической сети GEONET (GNSS Earth Observation Network System) [<http://www.fig.net/pub/proceedings/korea/full-papers/pdf/session11/imakiire-nakahori.pdf>]. Эти новые факты дали толчок для построения многочисленных геодинамических моделей региона [Shestakov et al., 2012; Simons et al., 2011; Tong et al., 2012; Трубицын, 2012; Pollitz et al., 2011a; Tsuji et al., 2012; Pollitz, et al., 2011b]. Почти все они опираются на постулаты плейтектоники, согласно которым землетрясения, происходящие в этом регионе, это результат силового давления на Евразийскую континентальную плиту (ЕП), погружающейся под нее Тихоокеанской плиты (ТП).

В неравной «тектонической» борьбе «фиксистов» и «мобилистов» победа на стороне последних, т.к. все-таки большинством поддерживаются геодинамические модели сейсмичности региона, основанные именно на первичности силового воздействия ТП. Вместе с тем, имеется целый ряд фундаментальных противоречий, которые не объясняют, замалчивают или просто не замечают. В этой связи на основе анализа и обобщения фактов о кинематике верхней части литосферы во время и после землетрясения Tohoku-Oki выдвигается альтернативная гипотеза о силовых источниках

возникновения подобных катастрофических землетрясений, происходящих как в районе Японского архипелага, так и в близком к нему в тектоническом отношении району сочленения Южно-Американской плиты и плиты Наска.

С геодинамической точки зрения Японский архипелаг является одним из самых сложных участков на нашей планете. Его напряженно-деформированное состояние определяется силовым взаимодействием четырех плит: Амурской, Охотской, Тихоокеанской и Филиппинской (рис. 1). Японские острова как бы перемалываются в жернове разнонаправленных движений этих литосферных плит. ТП надвигается на ЕП с максимальной скоростью 92 мм/год (1), Филиппинская (2) движется на северо-запад со скоростью – 48 мм/год, Охотская (3) - 13 мм/год на юго-запад, Амурская (4) – 10 мм/год на юг.

В сейсмическом отношении Тихоокеанский пояс является самым активным на Земле. С 1900 по 2011 г. на всей планете было зарегистрировано всего 89 землетрясений с  $M > 8$ , из них в Азии максимальное количество – 43. Землетрясение Tohoku-Oki по своей энергетической мощности занимает четвертое место среди сейсмических событий на всем земном шаре за последние 100 лет. Наибольшей разрушительной силой и, чаще всего, источниками цунами, являются именно неглубокие коровые землетрясения. В тоже время глубокие землетрясения ощущаются на гораздо большей территории и имеют, несомненно, большую энергетическую мощность. Например, землетрясение 24 мая 2013 г.  $M=8,2$ , происшедшее на глубине 600 км с эпицентром в Охотском море, ощущалось даже в Москве и С.-Петербурге.

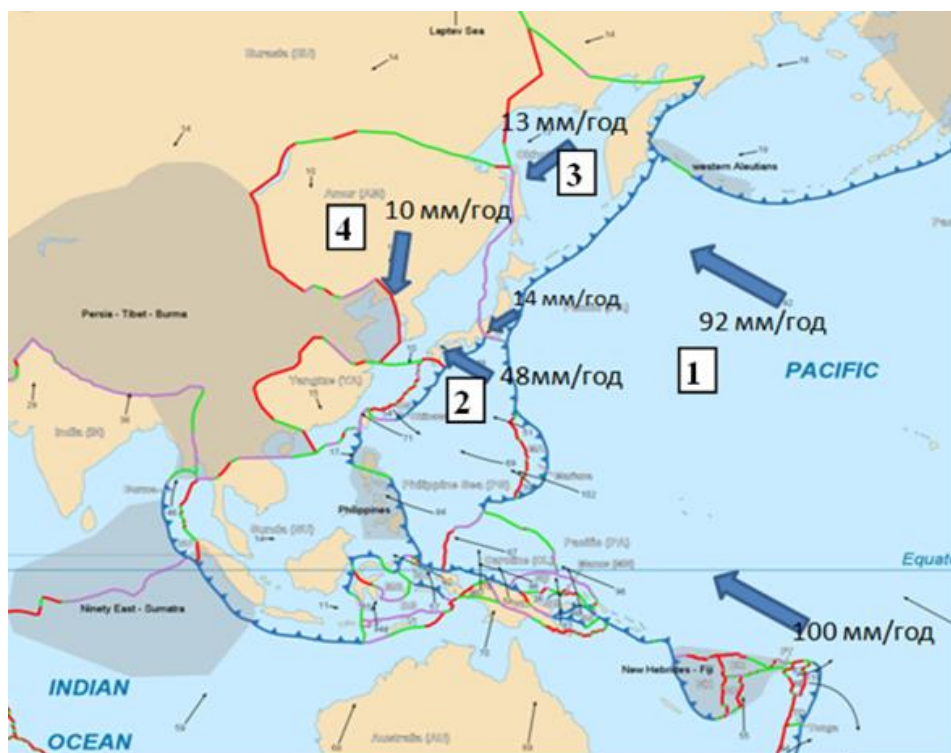


Рис. 1. Границы литосферных плит региона и скорости горизонтальных движений.

Плиты: 1- Тихоокеанская, 2 – Филиппинская, 3 – Охотская, 4 – Амурская

По данным сейсмической томографии на границе континентальной и океанической плит четко выделяется наклонная зона, уходящая на глубину до 500 км под углами 50-60°, где скорость продольных и поперечных волн и упругие свойства

среды выше средних значений приблизительно на 6 % (рис. 2) [Tong *et al.*, 2012]. Эту зону общепринято считать уходящей вниз Тихоокеанской плитой. Над ней находятся породы, обладающие меньшей скоростью поперечных волн, а, следовательно – менее упругие, и, вероятно, более трещиноватые. Предполагается, что это зона относительной разгрузки, по которой вверх проникает магма вулканических очагов (на рис. 2 она показана красным цветом).

Главный толчок был зарегистрирован 11 марта 2011 г. в 05:46:24 UTC. Ему предшествовала серия крупных форшоков ( $M > 6,0$ ). После основного толчка была отмечена сильная афтершоковая активность и три сильных повторных толчка с магнитудами  $M > 7,0$ . Магнитуда главного толчка составила 9,0, энергия  $1,9 \pm 0,5 \times 10^{17}$  Дж. Эпицентр находился на расстоянии 60 км от берегов Японии на границе Охотской и Тихоокеанской плит. Очаг землетрясения моделировался разломом, расположенным на глубине 25–30 км. Его длина по различным оценкам составила 300–380 км. Вдоль линии разлома наблюдался обратный сброс с амплитудой 25–30 м (а по некоторым данным даже 75 метров).

При землетрясении образовались цунами, которым потребовалось от 10 до 30 минут, чтобы достичь берегов Японии и вызвать катастрофические разрушения инфраструктуры прибрежных районов. Высота цунами в районе АЭС «Фукусима-1» составила 13,1 м, а в некоторых прибрежных районах достигала 40 м. Механизм очага землетрясения был рассчитан в ИОЦ ГС РАН (табл. 1, а) и Геологической службой США (USGS) (табл. 1, б).

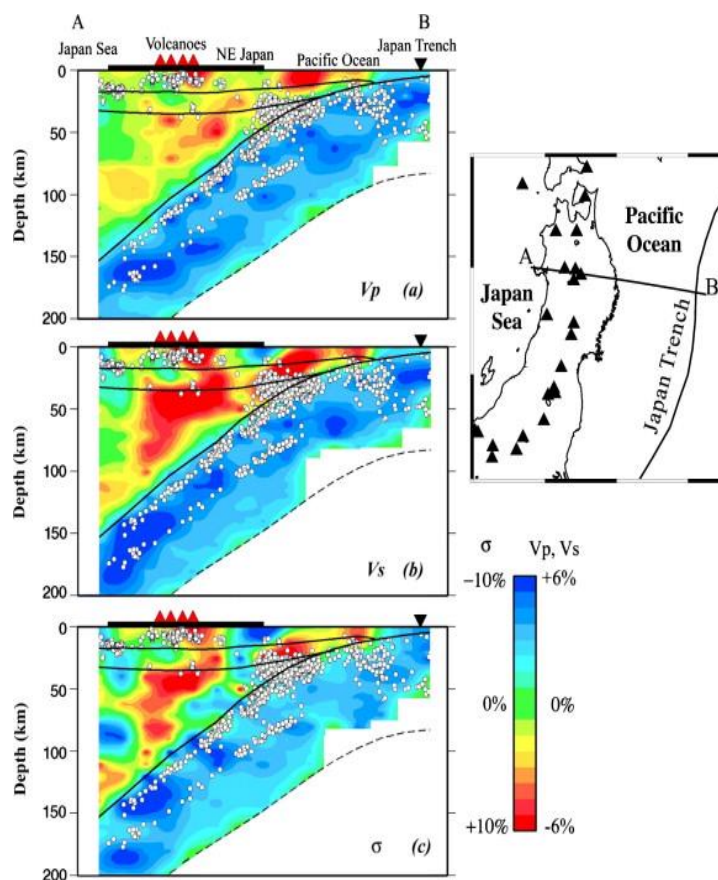


Рис. 2. Вертикальный разрез относительного изменения скоростей  $P$ -волн (а),  $S$ -волн (б) и коэффициента Пуассона (с) в земной коре [Tong *et al.*, 2012].

Таблица 1

Оси главных напряжений						
	<i>T</i>		<i>P</i>		<i>N</i>	
	Pl	Azm	Pl	Azm	Pl	Azm
а)	48	322	36	107	18	210
б)	55	313	32	108	11	205
Нодальные плоскости						
	<i>NP1</i>			<i>NP2</i>		
а)	141	19	19	33	84	108
б)	162	17	45	28	78	102

Решения практически одинаковы. Землетрясение возникло под действием как растягивающих, так и сжимающих напряжений, ориентированных в направлении северо-запад-юго-восток. Нодальная плоскость СВ простирается имеет крутое залегание ( $DP = 78-84^\circ$ ), тип движения – *взброс* с компонентой правостороннего сдвига. Вторая нодальная плоскость залегает полого и простирается с СЗ на ЮВ, тип движения – *надвиг* с компонентами левостороннего сдвига ( $DP = 17-19^\circ$ ).

На рис. 3 показана схема направлений смещений земной поверхности до (стадия А) и после (стадия Б) землетрясения Tohoku-Oki.

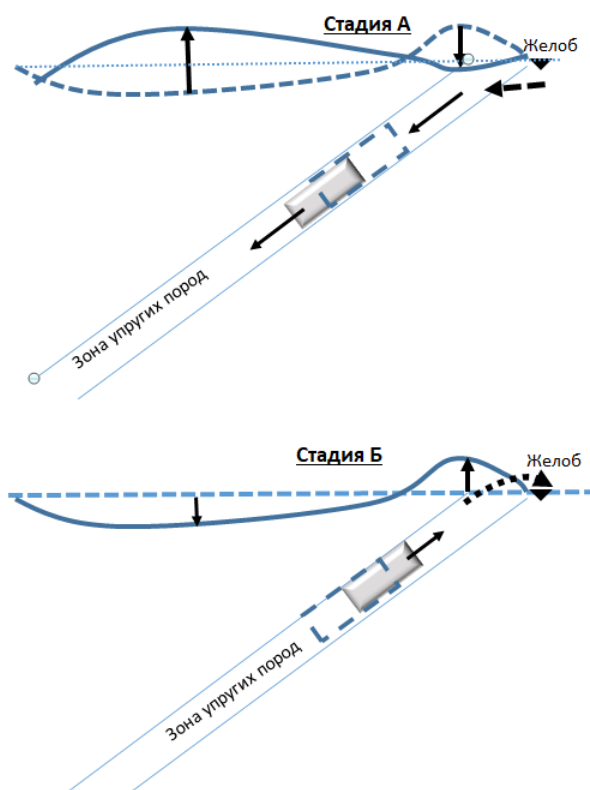


Рис. 3. Направления смещений земной поверхности до (стадия А) и после (стадия Б) землетрясения Tohoku-Oki

Анализ экспериментальных данных о сейсмичности, строении и деформировании литосферы, а также результатов тектонофизического моделирования и реконструкции напряжений по параметрам очагов землетрясений, позволил сделать следующие обобщения [Татаринов, 2015].

### 1. Сейсмичность.

- Землетрясения Японского типа происходят на глубинах до 700 км, при этом, чем глубже очаг землетрясения, тем больше площадь, на которой оно ощущается.

- Постсейсмические движения захватывают огромную территорию, так при землетрясении Tohoku-Oki смещения были зарегистрированы на трети территории Амурской плиты, с поперечными размерами до 1000 км, что свидетельствует о глубинном источнике землетрясения.

- Развитие очага носит ступенчатый характер и огромная площадь (нелинейного разлома) общей плоскости разрыва – около 200×400 км. Тип движения в очаге катастрофических землетрясений – взброс с надвигом.

- Расположение очагов землетрясений практически до границы астеносферы (700 км) в окраинной части континентальной плиты, позволяет сделать «крамольное» предположение о преобладании в этом районе горизонтальных компонент напряжений над вертикальной. И только ниже этой границы, породы находятся в гидростатическом напряженном состоянии. В краевой части океанической плиты граница перехода в гидростатическое состояние, вероятно, значительно выше и определяется границей Мохо, т.е. практически 10 км. Это предположение об ассиметричном поле напряжений участков сопряжения континентальной и океанической плиты положено в основу результатов моделирования, приведенных ниже.

### 2. Особенности строения литосферы.

- По данным сейсмической томографии по всей Тихоокеанской границе регистрируется участок относительно более упругих пород (до 5%), падающий под углом 50–60°, мощность которых в 5–7 раз больше толщины океанической коры. В верхней мантии Североамериканской плиты в активной зоне более упругой является глубинная часть (интервал глубин – 200–600 км), а в неактивной части плиты – только верхняя часть до глубины 400 км. Т.е. в тектонически активной зоне континентальных плит на глубине имеется обширная зона более напряженных (или более упругих) пород. Как предположение она может рассматриваться в качестве потенциального «канала», передающего напряжения из корневой части континентальной плиты и инициирующего разрушение среды на окраинах плит.

### 3. Постсейсмические горизонтальные и вертикальные движения.

- Характер постсейсмических движений по данным GPS-наблюдений следующий. Вертикальные движения: восточная часть опускается, западная поднимается (максимальные положительные движения в районе очага до 3 м). Горизонтальные движения: направлены в сторону очага (максимальные смещения до 24 м);

- При рассмотрении длительного периода отмечается приблизительное равенство величин смещений Тихоокеанской плиты между крупными землетрясениями в западном направлении и обратного «отката» в восточном при землетрясениях края Евразийской плиты за последние 100–120 лет;

- Отсутствие значимых положительных вертикальных движений края Евразийской плиты в условиях давления на нее Тихоокеанской плиты в периоды между землетрясениями.

#### 4. Реконструкция напряжений по очагам землетрясений.

- Океанический желоб является разделительной границей двух областей геодинамического режима: горизонтального сжатия (западнее желоба) и растяжения (восточнее);

- Ориентация осей главных напряжений сжатия изменяется с запада на восток от  $45^\circ$  до  $0^\circ$  и  $-90^\circ$  за глубоководным желобом. При этом за желобом землетрясениям соответствует ситуация горизонтального растяжения.

Анализ экспериментальных данных о сейсмичности, строении и деформировании литосферы, а также результатов тектонофизического моделирования, приведенный в [Tatarinov et al., 2014], позволяет выдвинуть дискуссионную альтернативную гипотезу источников землетрясений Японского типа (рис. 4).

1. Накопление упругой энергии происходит в глубинных частях континентальной плиты, где существуют наибольшие напряжения, а породы сохраняют свои упругие свойства. Эту глубину можно оценить по максимальной глубине землетрясений, т.е. 700–600 км. Косвенно это подтверждает землетрясение, происшедшее 24 мая 2013 г. в Охотском море на глубине 600 км  $M = 7,7$ .

2. Причины образования избыточной энергии могут быть разными и требуют отдельного рассмотрения. Можно лишь констатировать, что имеется несимметричное распределение соотношения горизонтальных и вертикальных компонент тензора напряжений, когда в некотором слое на глубине горизонтальные напряжения растут с большей скоростью, чем вертикальные. Это способствует созданию усилий, направленным вверх под углом около  $45\text{--}55^\circ$ .

3. Это силовое воздействие приводит к образованию наклонной зоны повышенных напряжений (установленной по данным сейсмотомографии). При превышении некоторых пороговых напряжений происходит разрушение среды на границе литосферных плит в виде взбросов и смещение крупных блоков в верхней части земной коры в направлении наименьшего сопротивления. По данным реконструкции очагов землетрясений следует, что оси главных сжимающих напряжений изменяют свою ориентацию, приблизительно на  $90^\circ$  за желобом.

4. На восточной границе континентальной плиты происходит взброс с компонентой правостороннего сдвига. При этом часть плиты «наваливается» на западную часть океанической, создавая в ней растягивающие субгоризонтальные напряжения. Такие разрушения происходят с периодичностью приблизительно раз в 40 лет. Континентальная плита как бы «пожирает» океаническую, заставляя погружаться вниз ее краевую часть. Этим можно объяснить серию сбросов и грабенов лежащей за желобом частью океанической плиты.



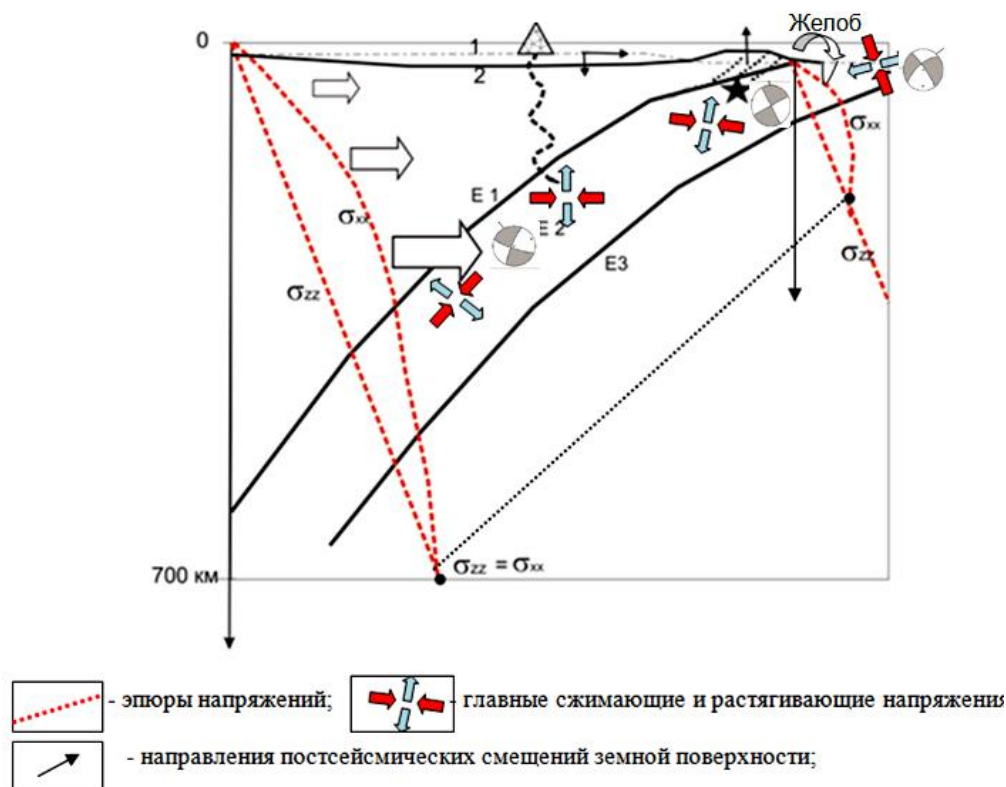


Рис. 4. Модель развития геодинамического процесса при землетрясении Tohoku-Oki  
1 – земная поверхность до землетрясения, 2 – после землетрясения. Пунктиром показаны эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений в континентальной плите и океанической. Модули упругости среды  $E_2 \gg E_1 > E_3$ , где индексы 1 – породы континентальной плиты, 2 – зона упругих пород по данным сейсмотомографии, 3 – квазивязкие породы верхней мантии.

С учетом изложенных тезисов было выполнено моделирование полей напряжений в данном регионе методом конечных элементов. Среда была разбита на четыре области, отличающиеся своими упругими характеристиками:  $E_1 = 3 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_1 = 0,24$ ;  $E_2 = 6 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_2 = 0,24$ ;  $E_3 = 20 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_3 = 0,2$ ;  $E_4 = 8 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_4 = 0,274$ .

Моделировались два варианта:

- вариант 1, когда заданы только горизонтальные усилия, увеличивающиеся до глубины 700 км до 45 МПа;
- вариант 2, дополнительно к первому варианту задаются вертикальные усилия, изменяющиеся с глубиной пропорционально плотности среды. Вычислялись интенсивность напряжений ( $\sigma$ ) и сдвиговые напряжения ( $\tau_{xy}$ ).

На рис. 5 показано распределение интенсивности напряжений для варианта 1. На рис. 6 для варианта 2, на рис. 7 сдвиговые напряжения, а на рис. 8 распределение векторов максимальных напряжений в конечных элементах.

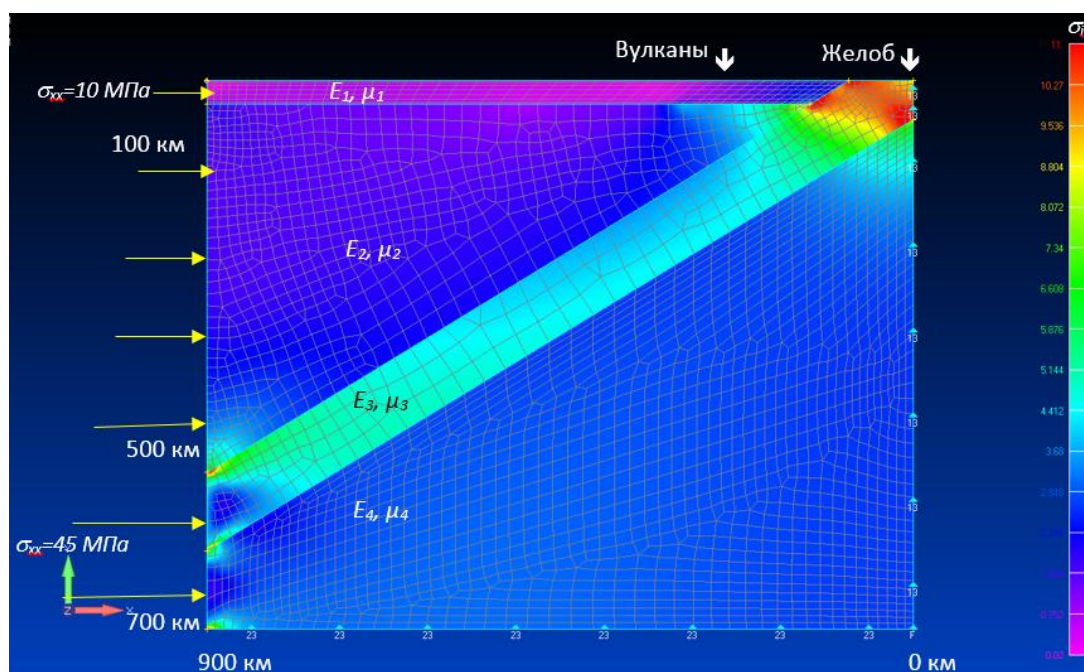


Рис. 5. Интенсивность напряжений. Заданы только горизонтальные усилия, увеличивающиеся с верху вниз от 10 до 45 МПа.  $E_1 = 3 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_1 = 0,24$ ;  $E_2 = 6 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_2 = 0,24$ ;  $E_3 = 20 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_3 = 0,2$ ;  $E_4 = 8 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_4 = 0,274$ .

Из рис. 2 видно, что максимальные значения интенсивности напряжений получены на контакте океанической и континентальных плит в верхней части наиболее упругой части среды, в том месте, где происходит большинство землетрясений. Там же получены и максимальные сдвиговые напряжения.

При этом, если допустить, что максимальные напряжения в конечных элементах соответствуют осям главных сжимающих напряжений, то из рис. 8 видно, как меняются направления осей, фактически совпадающие с направлениями осей, представленных в [Ребецкий и Полец, 2014].

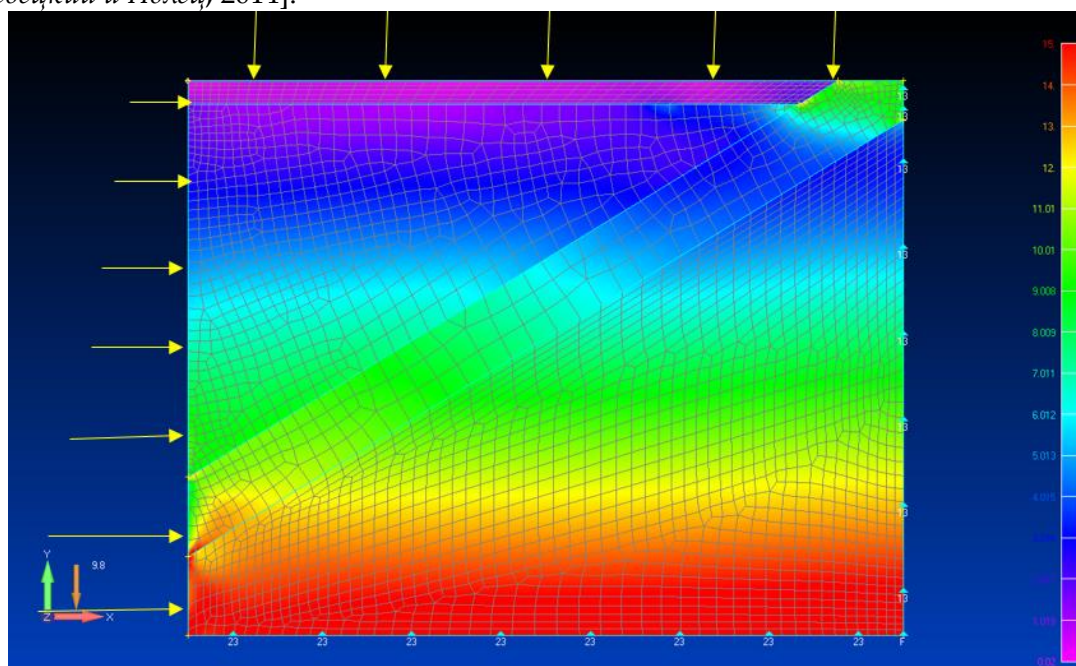


Рис. 6. Интенсивность напряжений. Заданы только горизонтальные усилия, увеличивающиеся сверху вниз от 10 до 45 МПа, и увеличивающаяся с глубиной пропорционально плотности вертикальная компонента.



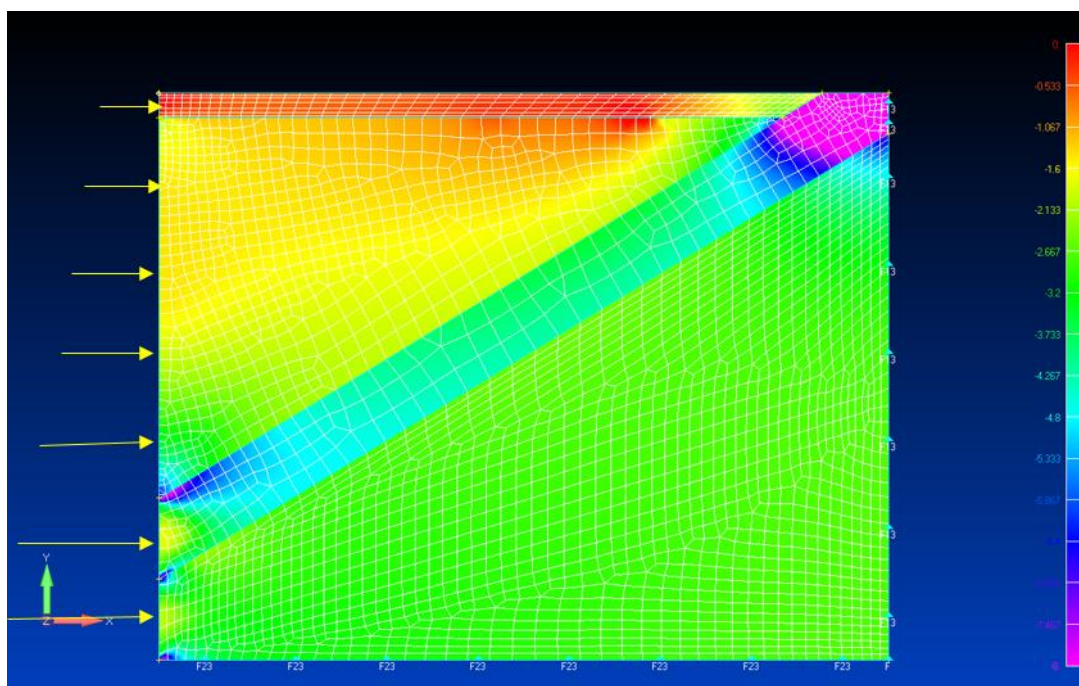


Рис. 7. Сдвиговые напряжения

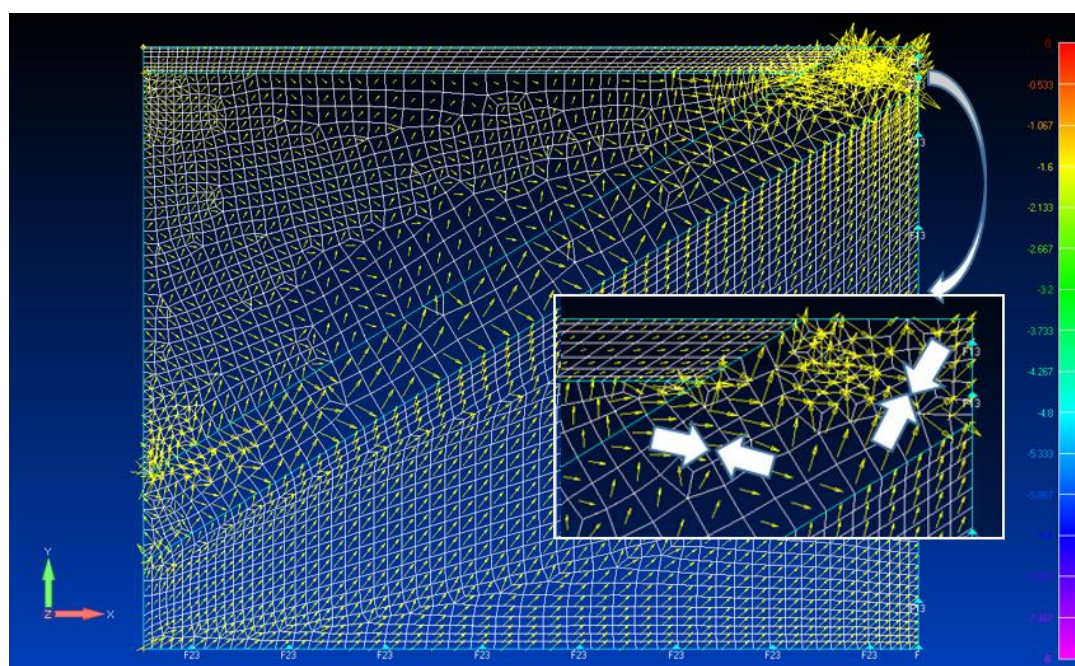


Рис. 8. Распределение векторов максимальных напряжений в конечных элементах

Конечно, представленная гипотеза носит дискуссионный характер и требует детального обоснования. Однако, уход от объяснения противоречий между теоретическими рассуждениями сторонников плейтектоники и существующими данными инструментальных наблюдений, а часто и просто с здравым смыслом, не является правильным.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН №19 «Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов».

### Список литературы

- Ребецкий Ю. Л., Полец А. Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика 2014. Т. 5, вып. 2. С. 469-506. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0137>
- Татаринов В. Н., Каган А. И. Гипотеза развития геодинамического процесса при катастрофическом землетрясении Tohoku-Oki 11 марта 2011 г. Науки о Земле. № 3. 2015. С.69-95.
- Трубицын В. П. Изгибные деформации плит в модели сильных субдукционных землетрясений // Физика Земли. №2. 2012. С.3.-13.
- Pollitz F. F., R. Bürgmann, P. Banerjee. Geodetic slip model of the 2011 M 9.0 Tohoku earthquake. Geophysical Research Letters, Vol. 38, Issue 7. 2011a. <https://doi.org/10.1029/2011GL048632>
- Pollitz Fred F., Roland Bürgmann and Paramesh Banerjee. Geodetic slip model of the 2011 M 9.0 Tohoku earthquake. Geophysical Research Letters, Vol. 38, L00G08, <https://doi.org/10.1029/2011GL048632>, 2011b.
- Shestakov N., Takahashi H., Ohzono M. and other. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // Tectonophysics. 524–525 (2012). P.76–86 <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.12.019>
- Simons M., Sarah E. Minson, A. Sladen and other. The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries. Science. Vol. 332. 2011. <https://doi.org/10.1126/science.1206731>
- Tatarinov V. N., A. I. Kagan, T. A. Tatarinova. Hypothesis of geodynamic processes in the lithosphere under catastrophic earthquake Tohoku-Oki. Extended Abstracts. 31 August - 5 September 2014, «GeoMod-2014 - Modelling in Geosciences», Potsdam: GFZ, pp. 49-51. <https://doi.org/10.2312/GFZ.geomod.2014.001>
- Tong, P., Zhao, D., and Yang, D.: Tomography of the 2011 Iwaki earthquake (M 7.0) and Fukushima nuclear power plant area, Solid Earth, 3, 43-51, <https://doi.org/10.5194/se-3-43-2012>, 2012.
- Tsuji Takeshi, Yoshihiro Ito, Kiichiro Kawamura and other. Seismogenic faults of the 2011 Great east Japan Earthquake: insight from seismic data and seafloor observations. Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012. Tokyo, Japan.