

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Публикуя мнение д-ра физ.-мат. наук Ю.Л. Ребецкого о некоторых аспектах статьи «О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии»*, а также отзыв на данное письмо в редакцию д-ра физ.-мат. наук М.В. Родкина, редакция приглашает читателей к дальнейшему обсуждению рассматриваемых вопросов на страницах нашего журнала.

Publishing this Letter by Doctor of Physics and Mathematics Yuriy L. Rebetsky *On some aspects of the article "On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy"*, as well a response by Doctor of Physics and Mathematics Michael V. Rodkin to this letter, the editorial board invites readers to further discuss the problems under consideration on the pages of our Journal.

УДК 550.34.094

<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.1.055-059>

О некоторых аспектах статьи «О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии»

© 2021 Ю. Л. Ребецкий

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

E-mail: reb@ifz.ru

В статье Н.А. Сычевой и Л.М. Богомолова предложено объединить взаимосвязанные данные по сброшенным напряжениям в очагах землетрясений, $\Delta\sigma$, и приведенной сейсмической энергии, e_{PR} , для анализа зависимости этих параметров от масштаба землетрясения с расширением статистики измерений (оценок). На примере Северного Тянь-Шаня (Бишкекский полигон с сетью KNET) установлена зависимость этих параметров очага от сейсмического момента или от магнитуды землетрясения в диапазоне магнитуд $2.2 \leq M \leq 4.0$. Автор письма в редакцию отмечает, что выводы статьи имеют ограничения: такая взаимосвязь проявляется только в более или менее узком интервале магнитуд. Обращено также внимание на смысловое различие параметров $\Delta\sigma$ и e_{PR} . Именно приведенная сейсмическая энергия отражает среднюю деформацию в зоне очага, и ее использование для анализа масштабных зависимостей очагов землетрясений более информативно.

Заключение статьи Н.А. Сычевой и Л.М. Богомолова начинается с фразы: «Для анализа весьма запутанного вопроса о наличии или отсутствии корреляций между сбросом напряжений в очагах землетрясений Северной Евразии и их энергетической характеристикой...».

В статье вопросу взаимосвязи напряжений, $\Delta\sigma$, сброшенных в очаге землетрясения, и скалярного сейсмического момента, M_0 , посвящено основное внимание. Аргументировано (формула (20) из статьи), что взаимосвязь между M_0 и приведенной сейсмической энергией $e_{PR} = E_s/M_0$ описывается регрессией, по форме пропорциональной $\Delta\sigma$ (M_0).

Что в этой связи хотелось бы отметить? Прежде всего то, что приведенная сейсмическая энергия и скалярный сейсмический мо-

мент определяются из разного типа исходных сейсмических данных, а характеристики очага землетрясения: сброшенные напряжения и сейсмический момент – имеют разную размерность ($\Delta\sigma$ [Па], а M_0 [Н м]).

Сейсмический момент определяется по низкочастотной составляющей спектра S -волны и не зависит от динамики развития разрыва, в то время как энергия землетрясений характеризует высокочастотную составляющую сейсмических волн. Именно это обстоятельство дает возможность рассматривать их как два независимых параметра очага землетрясения. Следствием этого является независимость размера очага и сброшенных напряжений. Детальные сейсмологические исследования показывают существование подобия сейсмического

* Сычева Н.А., Богомолов Л.М. О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 393–446. (На рус. и англ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>

Sycheva N.A., Bogomolov L.M. On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy. *Geosistemy pererodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 5(1), p. 393–446. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.393-416.417-446>

процесса только в некотором диапазоне магнитуд [Скоркина, 2017]¹. Следует отметить, что проблеме скейлинга (масштабная инвариантность) много внимания уделялось в работах А.А. Гусева [Гусев, 1984; Гусев, Гусева, 2014]².

Кроме отмеченного выше главного фактора существует еще ряд причин, влияющих на рассматриваемую проблему, способных осложнить получение корректного решения указанной проблемы. Так, только в последние десятилетия появилось достаточное число широкополосных сейсмических станций, удовлетворяющих этим требованиям.

Если напряжения характеризуют силу, деленную на площадь, то сейсмический момент по своему определению ($M_0 = G \cdot S \cdot D = G \cdot V \cdot \varepsilon$, что эквивалентно формуле (7) в статье) пропорционален средней упругой деформации ε , снимаемой в процессе реализации сейсмического смещения на разрыве – землетрясения. Здесь, как и в статье: G – модуль сдвига, D – амплитуда смещения в очаге, S – площадь поверхности разрыва. Объем очага $V = S \cdot L$ (L – характерный размер очага), а средняя деформация $\varepsilon = D/L$. Параметры $\Delta\sigma$ и M_0 не должны коррелировать между собой во всем диапазоне их изменений [Гусев, 1984], если только «не читать мантру» про самоподобие разрушения на всех масштабных уровнях.

Во-первых, вполне очевидно, что средним снимаемым упругим деформациям в масштабе магнитуд 2–4 (линейный масштаб приблизительно 200–2000 м) будет соответствовать свой эффективный модуль упругости G_{ef} , и, конечно, его значение отличается от модуля G для лабораторного образца, выпиленного из цельного участка породы. В масштабе усреднения сотен метров обязательное влияние на эффективное значение модуля упругости окажут трещины, существующие в горном массиве.

В масштабе усреднения первых десятков километров (масштаб земной коры), который отвечает землетрясениям магнитудой 6–8, обязательное влияние на модуль упругости окажут зоны разломов. Трещиноватость этих зон

многократно выше трещиноватости смежных с ними блоков коры. Таким образом, значения G_{ef} уменьшаются с ростом характерного размера задачи. В цитированной в статье монографии³ приведены результаты о снижении модуля G_{ef} в зависимости от линейного размера L на небольших масштабах усреднения (до сотен метров). Это уменьшение описывается слабой степенной зависимостью от L : $G_{ef} \sim L^{-0.06}$ (формула (4.27) на с. 233). Эта слабая зависимость при изменении энергии землетрясения в 10 и 100 раз определяет изменение усредненного модуля упругости на 15 и 30 % соответственно.

Второй важный момент, который определяет отсутствие прямой корреляции между указанными выше параметрами, заключается в независимости снимаемой деформации, ε , и объема очага, V . По сути, сравнивать между собой следует снимаемые напряжения, $\Delta\sigma$, и произведение $G_{ef} \cdot \varepsilon$. В этом случае с учетом слабой зависимости G_{ef} от масштаба усреднения деформаций (объем очага) корреляция должна существовать по крайней мере в некотором диапазоне магнитуд землетрясений.

На самом деле выражение $M_0 = G \cdot V \cdot \varepsilon$ после нахождения сброшенных напряжений $\Delta\sigma \sim G \cdot \varepsilon$ надо использовать для определения объема очага. Для случая сферического очага, который чаще всего рассматривается при оценках сброшенных напряжений, выражение для объема очага принимает форму $V \approx 1.8 \cdot M_0 / \Delta\sigma$ в соответствии с известной формулой Эшелби (выражение (11) из статьи).

Поскольку для сейсмической энергии имеется соотношение $Es = \sigma_a S D$ (σ_a – так называемое кажущееся напряжение), вполне очевидно, что отношение $Es/M_0 = \sigma_a/G$, т.е. приведенная сейсмическая энергия, e_{PR} , по физическому смыслу отвечает деформации. Поэтому и вполне логичен результат, полученный в работе, о взаимосвязи сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ и $e_{PR} = Es / M_0$. Но эта взаимосвязь будет проявляться для разных масштабов событий, только пока мы остаемся в определенном диапазоне магнитуд землетрясений (не более трех единиц).

Юрий Леонидович РЕБЕЦКИЙ,
доктор физико-математических наук
E-mail: reb@ifz.ru

¹ Скоркина А.А. 2017. Изучение спектральных свойств камчатских землетрясений магнитудного диапазона 3–6: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский, 130 с.

² Гусев А.А. 1984. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения. *Вулканология и сейсмология*, 1: 3–22; Гусев А.А., Гусева Е.М. 2014. Скейлинговые свойства характерных частот очаговых спектров землетрясений Камчатки. *Доклады РАН. Науки о Земле*, 458(1): 88–91.

³ Кочарян Г.Г. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.

Отзыв на Письмо в редакцию Ю.Л. Ребецкого «О некоторых аспектах статьи "О сброшенных напряжениях в очагах землетрясений Северной Евразии и приведенной сейсмической энергии"»

И статья, и письмо в редакцию, инициированное этой статьей, поднимают интересные и важные моменты, связанные с физикой очага землетрясения, а именно, в данном случае, с величинами сброса напряжений и приведенной сейсмической энергией. Заметим, что обсуждаемая приведенная сейсмическая энергия, с точностью до сомножителя равного упругому модулю, эквивалентна более традиционно обсуждаемой характеристике – величине кажущихся напряжений. Так как разброс величин сброса напряжений и приведенной сейсмической энергии весьма велик (в разы, иногда до 2 порядков величины), то вариации величины упругого модуля оказываются несущественны, и фактически речь идет о взаимосвязи величин сброса напряже-

ний и кажущихся напряжений. Из теоретических соображений и более детальных оценок (см., например, Annemarie Baltay et al. 2011. Variability in earthquake stress drop and apparent stress. *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L06303, doi:10.1029/2011GL046698) следует, что эти величины пропорциональны и, в первом приближении, обычно полагаются не зависящими от сейсмического момента (или магнитуды).

Важно, однако, что все обсуждаемые параметры сильно (и непонятно) вариабельны, и в разных случаях вполне могут наблюдаться специфические эффекты. Рассмотрение этих эффектов важно для понимания изменчивости характеристик очага землетрясения. Отсюда не вызывает сомнения, что обсуждение поднятых вопросов представляет существенный интерес.

*Михаил Владимирович РОДКИН,
доктор физико-математических наук
(Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики РАН, Москва).
E-mail: rodkin@mitp.ru*

LETTER TO THE EDITOR

УДК 550.34.094

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.055-059>

On some aspects of the article «On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy»

Yuryi L. Rebetsky

*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: reb@ifz.ru*

In the article by N.A. Sycheva and L.M. Bogomolov, the authors proposed to combine the interrelated data on the stress drop in the earthquake sources, $\Delta\sigma$, and reduced seismic energy, e_{PR} , to analyze the dependence of these parameters on earthquake scale along with expansion of the measurement statistics (assessments). The dependence of these parameters of a source on the seismic moment or on the earthquake magnitude within $2.2 \leq M \leq 4.0$ magnitude range has been determined using the example of the Northern Tien Shan (Bishkek geodynamic polygon with the KNET network). The author of the letter to the editor notes the article conclusions to be limited, because such relationship is only manifested within the more or less narrow range of the magnitudes. Attention is also drawn to the semantic difference between the $\Delta\sigma$ and e_{PR} parameters. It is the reduced seismic energy that reflects the mean strain in the source area, and its appliance to the analysis of scale dependences of earthquake sources is more informative.

Conclusion of the article by N.A. Sycheva and L.M. Bogomolov begins with the phrase: “To analyze the very knotty issue of the presence or

absence of correlations between the stress drop in the sources of earthquakes in Northern Eurasia and their energy characteristics...”. In the article,

the main focus is landing on the question of the relationship between the stress drop in the earthquake source, D_s , and the scalar seismic moment M_0 . It is argued (formula (20) from the article) that the relationship between M_0 and the reduced seismic energy $e_{PR} = Es/M_0$ is described by regression by the form proportional to $\Delta\sigma (M_0)$.

What should be mentioned in this regard? First of all, the fact that the reduced seismic energy and scalar seismic moment are determined based on the initial seismic data of different types, and the characteristics of the earthquake source: stress drop and seismic moment have the different dimensions ($\Delta\sigma$ [Pa], and M_0 [N m]).

The seismic moment is determined by the low-frequency component of the S -wave spectrum and does not depend on the dynamics of the fracture development, while the earthquake energy characterizes the high-frequency component of seismic waves. It is this circumstance that makes it possible to consider them as two independent parameters of the earthquake source. The consequence of this is the independence of the source size and the stress drop. Detailed seismological studies show the existence of similarity of a seismic process only in a certain range of magnitudes [Skorkina, 2017]¹. It should be noted that the problem of scaling (scale invariance) was given much attention in the works of A.A. Gusev [Gusev, 1984; Gusev, Guseva, 2014]².

In addition to the main factor noted above, there are a number of reasons that affect the problem under consideration, which can complicate the obtaining of a correct solution to this problem. Thus, only in recent decades a sufficient number of broadband seismic stations satisfying these requirements have appeared.

If the stresses characterize the force divided by the area, then the seismic moment, according to its definition ($M_0 = G \cdot S \cdot D = G \cdot V \cdot \varepsilon$, which is equivalent to formula (7) in the article) is proportional to the average elastic deformation ε , removed during the realization of seismic displacement at the fracture, i.e. earthquake. Here, as in the article: G – the shear modulus, D – the displacement amplitude in the source, S – the rupture area. The source volume is $V = S \cdot L$ (L is the

characteristic size of the source), and the average deformation is $\varepsilon = D/L$. Parameters $\Delta\sigma$ and M_0 should not correlate with each other in the entire range of their changes [Gusev, 1984], unless one “reads the mantra” about destruction self-similarity at all scale levels.

First, it is quite evident, that the average elastic released strains on a scale of magnitudes 2–4 (linear scale is approximately 200–2000 m) will correspond to their effective elastic modulus G_{ef} , and, of course, its value differs from the modulus G for a laboratory sample cut from an integral block of rock. On the averaging scale of hundreds of meters, cracks in the rock mass will obligatory affect the effective value of the elastic modulus.

On the averaging scale of the first tens of kilometers (the scale of the earth’s crust), which corresponds to earthquakes with a magnitude of 6–8, the fault zones will obligatory affect the elastic modulus. The fracturing of these zones is many times higher than the fracturing of the adjacent crustal blocks. Thus, the G_{ef} values decrease as the characteristic size of the problem grows. The monograph³ cited in the article presents the results on the decrease in the G_{ef} modulus as a function of the linear size L on the small averaging scales (up to hundreds of meters). This decrease is described by a weak power-law dependence on L : $G_{ef} \sim L^{-0.06}$ (formula (4.27) on p. 233). This weak dependence when the earthquake energy changes by 10 and 100 times determines the change in the averaged elastic modulus by 15 and 30 %, respectively.

The second important point, which determines the absence of a direct correlation between the above parameters, is the independence of the released strain, ε , and the volume of the source, V . In fact, it is necessary to compare the stress drop, $\Delta\sigma$, and the product $G_{ef} \cdot \varepsilon$ with each other. In this case, with regard to the weak dependence of G_{ef} on the scale of deformation averaging (volume of the source), the correlation should exist at least in a certain range of earthquake magnitudes.

In fact, when the stress drop is found $\Delta\sigma \sim G \cdot \varepsilon$, the expression $M_0 = G \cdot V \cdot \varepsilon$ should be used to de-

¹ Skorkina A.A. 2017. [Study of spectral properties of the Kamchatka earthquakes in the magnitude range of 3–6]: [dis. ... Cand. Sci. (Phys. and Math.)]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 130 p.

² Gusev A.A. 1984. [Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short-period strong motion]. *Volcanology and Seismology*, 1: 3–22; Gusev A.A., Guseva E.M. 2014. Scaling properties of corner frequencies of Kamchatka earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 458(1): 1112–1115. <https://doi.org/10.1134/s1028334x14090062>

³ Kocharyan G.G. *Geomechanics of faults*. Moscow: GEOS, 2016. 424 p.

termine the volume of the source. For the case of a spherical source, which is most often considered for evaluating the stress drop, the expression for the volume of the source takes the form $V \approx 1.8 \cdot M_0 / \Delta\sigma$ in accordance with the well-known Eshelby's formula (expression (11) from the article).

Since, there is a ratio $Es = \sigma_a S D$ for seismic energy (σ_a is the so-called apparent stress),

it is quite evident, that the ratio $Es/M_0 = \sigma_a/G$, i.e. the reduced seismic energy, e_{PR} , physically corresponds to deformation. Therefore, the result obtained in the work on the relationship between the stress drop $\Delta\sigma$ and $e_{PR} = Es/M_0$ is quite logical. But this relationship will manifest itself for different scales of events, only as long as we remain in a certain range of earthquake magnitudes (no more than three units).

*Yuri L. Rebetsky,
Doctor of Physics and Mathematics
E-mail: reb@ifz.ru*

Response to the letter to the editor by Yu. L. Rebetsky *On some aspects of the article "On the stress drop in North Eurasia earthquakes source-sites versus specific seismic energy"*

Both the article and the letter to the editor, initiated by this article, raise interesting and important questions related to the physics of the earthquake source, namely, in this case, with the magnitudes of stress drop and reduced seismic energy. Note that the discussed reduced seismic energy is equivalent to the more traditionally discussed characteristic – the magnitude of the apparent stress up to a factor equal to the elastic modulus. Since the spread in the values of stress drop and reduced seismic energy is very large (several times, sometimes up to 2 orders of magnitude), variations in the value of the elastic modulus turn out to be insignificant, and in fact, we are talking about the relationship between the values of stress drop and apparent stress. From theoretical

reasons and more detailed assessments (see, for example, Annemarie Baltay et al. 2011. Variability in earthquake stress drop and apparent stress. *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L06303, doi: 10.1029/2011GL046698) it follows that these values are proportional and, as a first approximation, are usually assumed to be independent of the seismic moment (or magnitude).

It is important, however, that all discussed parameters are highly (and incomprehensibly) variable, and specific effects may well be observed in different cases. Consideration of these effects is important for understanding the variability of the characteristics of an earthquake source. Hence, there is no doubt that the discussion of the raised issues is of significant interest.

*Michael V. Rodkin,
Doctor of Physics and Mathematics
(Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics RAS, Moscow).
E-mail: rodkin@mitp.ru*