

УДК 550.34.01

ВАРИАЦИИ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ ТОНГА В 2005–2022 ГОДАХ

© 2024 г. А. А. Шакирова*, В. А. Салтыков

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, бульвар Пуйна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: shaki@emsd.ru

Поступила в редакцию 21.08.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принята к публикации 22.04.2024 г.

Зона субдукции Тонга–Кермадек расположена между Тихоокеанской и Австралийской плитами и является местом самых высоких скоростей погружения Тихоокеанской плиты и ее доминирующего растяжения. В 2006 и 2009 гг. в этом регионе произошло два сильнейших землетрясения с магнитудами $M_w = 8.0$ и 8.1 . К зоне субдукции Тонга приурочено около 170 островов, представляющих собой вулканические центры, регулярно извергающиеся в течение последних нескольких десятилетий. В работе представлены результаты определения временных вариаций величины наклона графика повторяемости (значения b) в зоне субдукции Тонга за 2005–2022 гг. и вариаций b в зависимости от глубины. Временные вариации значения b отражают общую тенденцию возникновения наиболее сильных землетрясений на фоне понижения значений b только в поверхностном слое на глубинах 0–100 км. По сопоставлению вариаций значения b с глубиной с тектонической моделью зоны субдукции Тонга предполагается, что пониженные значения b могут отражать большее напряжение в верхней части погружающейся плиты из-за ее изгиба. Повышенные значения b , по-видимому, могут быть связаны с механизмами растяжения. Для зоны субдукции Тонга, как и для других зон субдукции, выявлена область повышенного значения b на глубине 90–100 км, что может быть связано с присутствием на этой глубине магматического фронта, с которым связан активный вулканизм.

Ключевые слова: землетрясение, зона субдукции Тонга, наклон графика повторяемости землетрясений, закон Гутенберга-Рихтера, представительность каталога

DOI: 10.31857/S0203030624040038, EDN: IYBDFE

ВВЕДЕНИЕ

Зона субдукции Тонга–Кермадек является частью протяженной границы Австралийско-Тихоокеанской плиты и простирается примерно на 2700 км между Новой Зеландией и южной частью Самоа (рис. 1а). Тонга–Кермадек – самая глубокая впадина в южном полушарии, сейсмичность здесь выражена от поверхности до глубины ~720 км [Bonnardot et al., 2007]. Эта зона субдукции обеспечивает конвергенцию между Тихоокеанской и Австралийской плитами и является местом самых высоких скоростей субдукции Тихоокеанской плиты и ее доминирующего растяжения [Bevis et al., 1995; Bonnardot et al., 2009]. Скорость конвергенции

составляет около 15–16 см/год [Kusky, 2022], увеличиваясь к северу до максимума ~24 см/год [Bevis et al., 1995]. Регион характеризуется высокой активностью как поверхностных, так и глубоких землетрясений (см. рис. 1б) [Penisoni et al., 2021]. Северный край зоны субдукции Тонга–Кермадек (зона Тонга) характеризуется разрывом Тихоокеанской плиты, которая постепенно прогибается по мере того, как входит в северную часть желоба [Bonnardot et al., 2007]. В 2006 и 2009 гг. в этом регионе произошло два сильнейших землетрясения с магнитудами $M_w = 8.0$ и 8.1 (см. рис. 1б).

К зоне субдукции Тонга приурочено около 170 островов, представляющих собой вулканические центры, регулярно извергающиеся

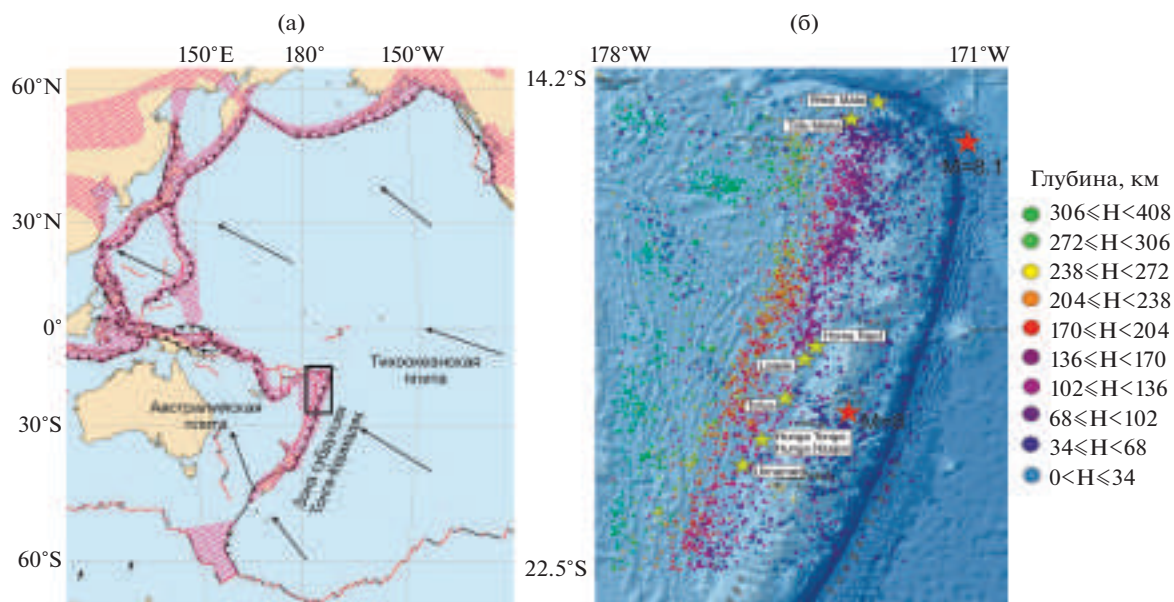


Рис. 1. Зоны субдукции тектонических плит.

а — зона субдукции Тонга (выделена прямоугольником) с фоновой карты [https://www.usgs.gov/media/images/pacific-plate-boundaries-and-relative-motion]. Стрелки указывают направление движения плит;

б — эпицентры землетрясений зоны субдукции Тонга за 2005–2022 гг.: вулканы в зоне субдукции, извергавшиеся в 2005–2022 гг. (оранжевые звездочки) и два сильнейших землетрясения с $M_w = 8$ и 8.1, произошедших в 2006 и 2009 гг. (красные звездочки).

в течение последних нескольких десятилетий [Kusky, 2022]. С 2006 по 2022 г. известно о десяти извержениях вулканов в этом районе — Хоум-Риф (Home Reef), Тафу-Мака (Tafu-Maka), Вест Мата (West Mata), Латеики (Lateiki), Хунга-Тонга–Хунга-Хаапай (Hunga Tonga–Hunga Haapai), Тофуа (Tofua) и Безымянный (Unnamed) (см. рис. 1б). Для количественной оценки извержения вулканов используется вулканический эксплозивный индекс VEI [Newhall, Self, 1982], связанный с объемом изверженного материала. Для извержения вулкана Хунга-Тонга–Хунга-Хаапай в 2022 г. этот индекс достиг $VEI = 5$, для остальных — $VEI = 0–2$.

Изменение состояния среды находит отражение в различных геофизических полях. В данной работе рассматриваются вариации наклона графика повторяемости (значение b). Закон повторяемости землетрясений — закон Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944] является одним из фундаментальных законов сейсмического режима, отражающим, в частности, соотношение числа слабых и сильных землетрясений в заданном временном

интервале на фиксированной территории и выражается формулой:

$$\lg N = a - bM, \quad (1)$$

где N — число землетрясений с магнитудой M и более, a и b — коэффициенты.

Наклон графика повторяемости связывается со строением среды в широком смысле. В монографии [Смирнов, Пономарев, 2020] рассмотрены две “научные школы”. Одна указывает на то, что вариации b контролируются напряжениями, другая говорит об обусловленности вариаций b структурой неоднородностей литосферы. Авторы монографии выдвигают гипотезу о том, что структура неоднородностей контролирует предельные значения b , а изменения напряжений отвечают за временные вариации b .

Известен ряд случаев, когда вариации наклона графика повторяемости соответствовали подготовке сильного землетрясения [Завьялов, 1984; Моги, 1988; и др.]. Такие предвестниковые вариации не противоречат известным моделям подготовки землетрясения лавинно-неустойчивого трещинообразования и дилатантно-диффузионной, в рамках которых обычно рассматривается процесс

трещинообразования. Также вариации значения b могут быть связаны с вариациями напряжений в среде [El-Isa, Eaton, 2014; Calderoni et al., 2019; Li et al., 2021].

Обычно значение b рассматривается как функция пространства или функция времени. Одним из факторов пространственно-временных вариаций значений b являются вариации напряжений, возникающие в окружающих породах, что подтверждается сопоставлением рассчитанных значений b с кажущимся напряжением [El-Isa, Eaton, 2014; Calderoni et al., 2019; Li et al., 2021]. Есть исследования, где говорится, что на вариации значения b влияют тектоническая обстановка, поровое давление, геотермический градиент, кластеризация землетрясений, метод расчета значения b и не полные данные из каталога [Wyss et al., 1997, 2001a]. Вариации значения b с глубиной также связывают с кажущимся напряжением [Zhu et al., 2005; Rodríguez-Pérez, Zuniga, 2018], с изменением физических свойств внутри погружающейся плиты [Enescu et al., 2011], с неоднородностью материала, структурой разломов, флюидонасыщенностью.

Значения b в целом для Земли варьируют в диапазоне 1.02 ± 0.03 [El-Isa, Eaton, 2014]. При этом для более локальных зон значения b испытывают значительные флуктуации от 0.3 до 2.5 [Gerstenberger et al., 2001; Nuannin, 2006; Wyss, Stefansson, 2006; Lin et al., 2007; Li, Chen, 2021].

Оценка значения b кажется тривиальной в теории, но не на практике. На рассчитанные значения b влияет качество данных (размер выборки), методика расчета значения b [Torgmann, 2011; Herrmann et al., 2022], состояние сейсмических сетей и совершенствование методов регистрации землетрясений [Потанина и др., 2011]. Возникновение форшоков и афтершоков кратковременно искажает региональную величину b , более того, если афтершоковая активность высока, это может привести к заметному уменьшению b [Коновалова, Салтыков, 2008]. Выбор величины представительной магнитуды M_c в качестве нижнего порога величины M также влияет на оценку значения b . Выбор M_c должен быть конкретным и осмысленным для получения надежных результатов, которые способствуют лучшему пониманию физических

процессов, лежащих в основе вариаций значения b .

Некоторые исследования поддерживают нулевую гипотезу, согласно которой кажущиеся вариации b являются артефактами [Marzocchi et al., 2020].

Для расчетов значений b выбиралась пространственная область, соответствующая разломной зоне, соотносящейся с магнитудой сильнейших землетрясений. Так, для землетрясения $M_w = 8.1$ линейные размеры очага составляют порядка 180 км, для $M_w = 8.0$ —160 км [Гусев, Мельникова, 1990]. Учитывая суммарную протяженность двух очагов землетрясений с $M_w = 8.0$ и 8.1 и землетрясений с $6.5 \leq M_w \leq 6.9$ выбран район исследования протяженностью ~900 км.

В данном исследовании полученные вариации значения b с глубиной в зоне субдукции Тонга сопоставляются с тектонической моделью этой зоны. А также в связи с высокой сейсмической и вулканической активностью региона (землетрясения с большими магнитудами до ~8, сильнейшие извержения вулканов, в частности, Хунга-Тонга в 2022 г.) оценивается перспектива использования вариаций b в качестве предвестника сильных землетрясений.

ДАННЫЕ

Район исследования включает зону субдукции Тонга с координатами 14° — 23° S, 171° — 178° W (см. рис. 16). Использовался каталог землетрясений Геологической службы США (USGS) за 2005—2022 гг. (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). Выборка из каталога содержит 7753 землетрясений с магнитудами $3.2 \leq M \leq 8.1$ и глубинами до 400 км¹ (рис. 2а). Величина землетрясений в каталоге представлена магнитудами m_b и M_w (рассчитанными по объемным волнам и по сейсмическому моменту соответственно). Каталог был приведен к единому магнитудному типу m_b путем пересчета по формуле [Scordilis, 2006]:

$$m_b = (M_w - 1.03) / 0.85. \quad (2)$$

По распределению землетрясений по глубине в каталоге выявлены артефакты, связанные с их группированием на глубинах 10 км (2789

¹ На глубинах более 400 км регистрируются единичные землетрясения.

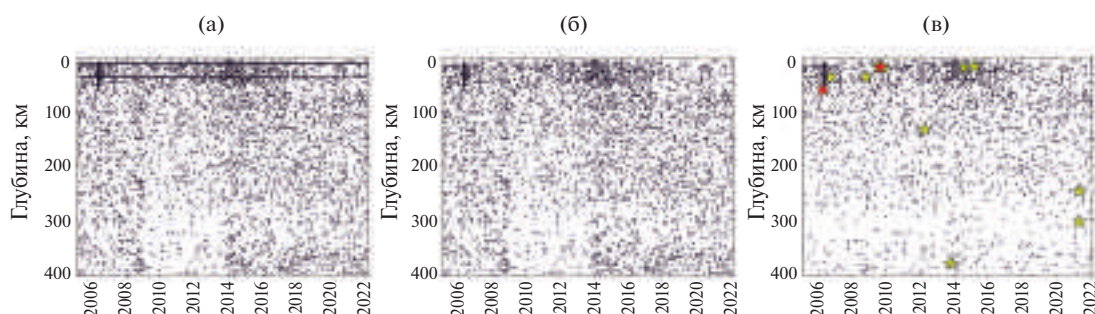


Рис. 2. Распределение землетрясений зоны субдукции Тонга по глубине за 2005–2022 гг.

а – выборка из каталога USGS; б – распределение землетрясений после удаления решений гипоцентров с $H = 10$ и 35 км; в – распределение землетрясений с ограничением по магнитуде $m_b \geq 4.5$. Красными звездочками отмечены землетрясения с магнитудами $m_b = 8.2$ и 8.3, желтыми – с $6.5 \leq m_b \leq 6.9$.

землетрясений, $3.8 \leq m_b \leq 6.8$) и 35 км (842 землетрясения, $3.5 \leq m_b \leq 6.1$). Эти землетрясения выделяются как две сплошные полосы на фиксированных глубинах 10 и 35 км (см. рис. 2а). Эти решения удалены из каталога и в дальнейшем не рассматриваются, предполагая, что на оценках b это не отразится.

Итоговая выборка из каталога содержит 4120 землетрясений с магнитудами $3.8 \leq m_b \leq 8.3$ и глубинами до 400 км (см. рис. 2б).

В 2005–2022 гг. в районе зоны субдукции Тонга произошло 12 наиболее сильных землетрясений с $6.5 \leq m_b \leq 8.3$ (табл. 1, см. рис. 2в), 8 из них являются поверхностными с глубинами очагов $11 \leq$

Таблица 1. Землетрясения с $m_b \geq 6.5$, произошедшие в зоне субдукции Тонга в 2005–2022 гг.

№	Дата	m_b^*	Координаты (S° , W°)	Глубина, км
1	3 мая 2006 г.	8.2	20.19, 174.12	55
2	28 сентября 2006 г.	6.9	16.59, 172.03	28
3	19 октября 2008 г.	6.9	21.86, 173.82	29
4	30 августа 2009 г.	6.6	15.22, 172.57	11
5	29 сентября 2009 г.	8.3	15.49, 172.10	18
6	24 ноября 2009 г.	6.8	20.71, 174.04	18
7	28 апреля 2012 г.	6.6	18.69, 174.71	135
8	23 ноября 2013 г.	6.5	17.12, 176.55	371
9	29 июня 2014 г.	6.7	14.98, 175.51	18
10	30 марта 2015 г.	6.5	15.5, 173.03	11
11**	4 ноября 2017 г.	6.8	15.32, 173.17	10
12**	4 ноября 2019 г.	6.6	18.58, 175.27	10
13	24 апреля 2021 г.	6.5	18.9, 176.27	301
14	25 апреля 2021 г.	6.5	21.61, 177.15	246
15**	21 мая 2021 г.	6.5	16.60, 177.37	10

Примечание. * – магнитуды землетрясений m_b пересчитаны из M_w ; ** – землетрясения имеют присвоенное значение глубины 10 км.

$\leq H \leq 55$ км. А также три землетрясения с $6.5 \leq m_b \leq 6.8$ с присвоенной глубиной $H = 10$ км (см. табл. 1).

МЕТОДЫ

Наклон графика повторяемости b вычисляется методом максимального правдоподобия, по [Куллдорф, 1966]:

$$b = \lg \left(1 + \frac{N_0}{\sum_{i=0} i \cdot n_{M_0} + 0.1i} \right) / 0.1, \quad (3)$$

где N_0 — число землетрясений магнитудой не менее M_0 , n — число землетрясений магнитудой M_0 . В этом выражении учтен шаг группирования землетрясений по магнитуде $\Delta M = 0.1$.

Среднеквадратичная ошибка σb вычисляется, по [Куллдорф, 1966]:

$$\sigma b = b / \sqrt{N}, \quad (4)$$

где N — количество землетрясений, для которых рассчитано значение b .

Корректная оценка значения b зависит от конфигурации сети сейсмических станций и полноты каталога землетрясений, которая определяется пороговым значением представительной магнитуды M_s . Формализации процедуры оценки представительной магнитуды M_s уделяется достаточно большое внимание исследователями. Как правило, представительность каталога определяется через пороговую оценку магнитуды M_s , выше которой

распределение числа землетрясений N по магнитуде M можно считать экспоненциальным для заданного уровня статистической значимости α [Писаренко, 1989; Смирнов, 2009]. В работах [Mignan, Woessner, 2012; Павленко, Завьялов, 2021] сравниваются различные методы оценки M_s . Причем в статье [Павленко, Завьялов, 2021] сделан вывод, что “замечательные результаты оценки M_s для выборок среднего и большого объема дает метод Писаренко”. В данной работе нами использован подход [Салтыков, 2019], опирающийся на упомянутый метод Писаренко [1989], но отличающийся от него методикой оценки статистической значимости.

Сравнение фактического числа землетрясений N_0 с его оценкой согласно аппроксимации позволяет оценить статистическую значимость α гипотезы экспоненциальности распределения рассматриваемой выборки из каталога с ограничением по нижнему уровню магнитуд M_0 [Салтыков, 2019]. Либо, задав необходимую значимость α , принять или отклонить гипотезу об экспоненциальности распределения и, соответственно, представительности каталога на уровне $M_s = M_0$.

Представительная магнитуда для каталога, приведенного к магнитуде m_b , оценивалась в скользящих окнах длиной от 400 до 50 представительных событий (рис. 3). Тенденции изменения совпадают для всех величин окон. Отметим, что применение меньших окон позволяет выявить короткие участки с лучшей представительностью, при этом статистическая

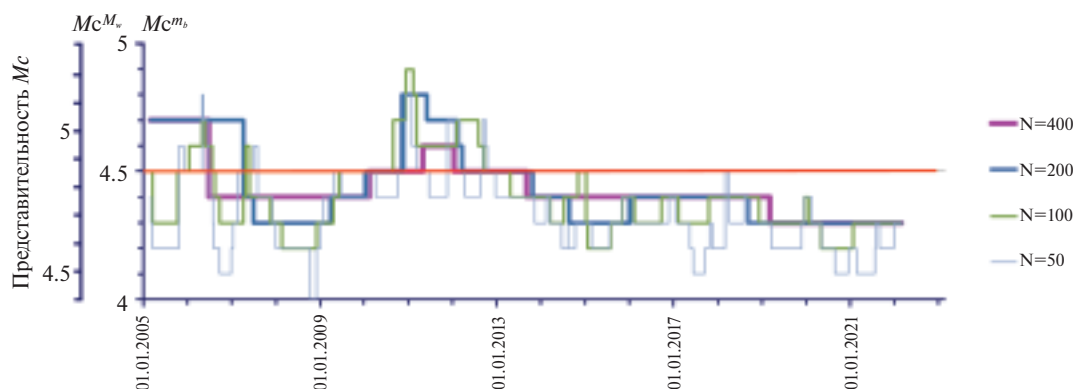


Рис. 3. Представительность каталога землетрясений M_s в 2005–2022 гг. в скользящих окнах шириной $N = 50–400$ представительных землетрясений.

Красная линия — оценка представительности каталога в целом. Приведены две оси магнитуд, соответствующие магнитудам M_w и m_b .

значимость остается заданной. Оценка представительности каталога в целом дала значение $=4.5$ (красная линия, см. рис. 3), дополнительно здесь показана шкала представительности каталога, приведенного к магнитуде M_w . Для магнитуды M_w представительность каталога варьировалась от 4.4 до 5.2.

После выбора порога $= 4.5$ каталог содержит 2435 землетрясений (см. рис. 2в).

С целью изучения временных вариаций значения $b(t)$ использовались скользящие временные окна, содержащие постоянное число N представительных событий с заданным перекрытием. Выбор количества событий в окне является компромиссом между точностью оценки b и временным разрешением (эффектом сглаживания широкими окнами). Чтобы подтвердить, что значение b является реальным и объективным, а не вызвано длинами временных окон, мы исследовали влияние различных N на результаты расчета. Убедившись в совпадении тенденций временных вариаций b (рис. 4, рис. 5а), было решено использовать далее скользящие окна, содержащие $N = 200$ событий со сдвигом в 20 событий.

Декластеризация каталога не проводилась, так как предварительный анализ показал относительно небольшое число зависимых событий (64 события, 17 кластеров, выявленные методом Резенберга [Reasenber, 1985; Wyss et al., 2001b]), и при анализе обращалось внимание на кратковременные аномалии b . Учитывая относительную кратковременность интенсивного афтершокового процесса, резкие скачки b были бы с неизбежностью идентифицированы. Однако подобных скачков мы не видели.

Оценка вариаций значения b с глубиной проводилась по аналогичной методике: рассматривались землетрясения с глубинами, попадающими в вертикальное скользящее окно, каждое окно содержало постоянное количество представительных событий $N = 200$ со сдвигом 20. Для каждого окна рассчитывалось значение b . На перекрывающихся участках последовательных окон рассчитывалось среднее b . При этом дисперсия сглаженных оценок b не корректировалась, принимая во внимание отсутствие независимости входных данных при расчетах в перекрывающихся окнах. Вариации значения с глубиной представлены

на рис. 4, который дополнен шкалой значения, пересчитанной из соотношения:

$$b^{M_w} = \frac{b^{m_b}}{0.85}, \quad (5)$$

где b — значение b , полученное для каталога землетрясений с магнитудами m_b , — для каталога землетрясений с магнитудами M_w .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для зоны субдукции Тонга для 2005–2022 гг. получены статистически значимые вариации значения b с глубиной. Отмечается особенность — минимальные значения $b = 0.71–0.75$ наблюдались на глубине 0–15 км (см. рис. 4), затем значение b монотонно возрастало и на глубине 94 км достигло максимального значения $b = 1.56$. После этого b снижалось до $b = 1.05$ на глубине 214 км. Далее b немного увеличилось

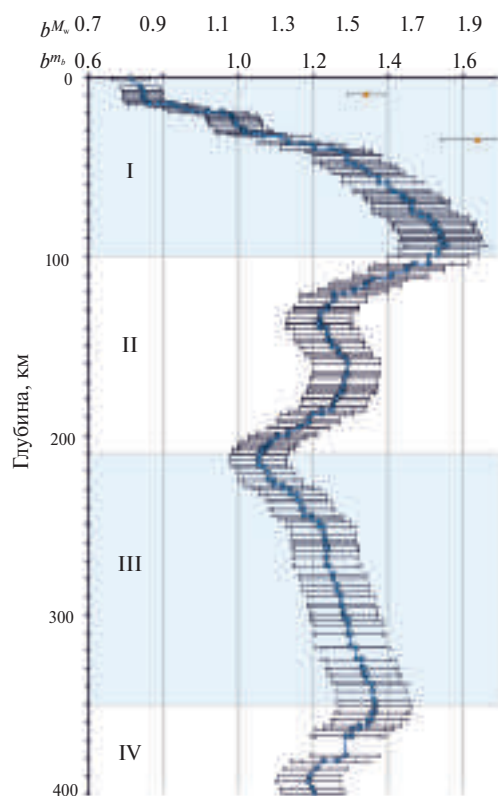


Рис. 4. Распределение значения b по глубине для зоны субдукции Тонга в итоговом каталоге за 2005–2022 гг. (синие точки) и для глубин 10 и 35 км (оранжевые точки).

Горизонтальные отрезки соответствуют стандартному отклонению значения b .

I–IV — номера выделенных интервалов глубин.

Приведены две оси b , соответствующие магнитудам M_w и m_b .

до $b = 1.36$ на глубине 340 км с последующим незначительным падением до $b = 1.18$ на глубине 400 км.

Отдельно рассмотрены значения b на глубинах 10 и 35 км, они равны $b = 1.35 \pm 0.06$ и $b = 1.64 \pm 0.1$ (см. рис. 4, оранжевые точки). Эти значения значительно отклоняются от рассчитанной зависимости b от глубины для итогового каталога, что свидетельствует в пользу гипотезы, что группирование землетрясений на глубинах 10 и 35 км в каталоге USGS является артефактом методики расчета гипоцентрии.

Исходя из тенденций изменения величины b с глубиной, выделены четыре интервала глубин (см. рис. 4), рассматриваемые ниже отдельно. Интервал I соответствует глубинам 0–100 км, II – 100–210 км, III – 210–350 км, IV – 350–400 км.

Временной ход значения b рассчитывался в окнах длиной 800, 400 и 200 событий со сдвигом 80, 40 и 20 событий соответственно (см. рис. 5а). Ниже приведены и обсуждаются данные для магнитуды m_b (для магнитуды M_w необходим пересчет согласно формулам (1), (2)).

На рис. 5 видно, что рассчитанные кривые имеют тенденцию к уменьшению значения b на начальной стадии с последующим увеличением с 2009 г. Полученные вариации значения b показывают хорошую стабильность для различных длин окон, поэтому тенденция вариации b , отраженная на рис. 5, не вызвана выбором ширины скользящего окна. При этом окно длиной 200 событий показывает лучшую детальность вариаций значения b при незначительном увеличении σb с сохранением тенденции к падению значения b в 2005–2009 и увеличению b в 2010–2022 гг. По вариациям значения b можно отметить, что большая часть наиболее сильных землетрясений с $6.5 \leq m_b \leq 8.3$ происходила при уменьшении значения b .

Для четырех диапазонов глубин (0–100 км, 100–210 км, 210–350 км, 350–400 км) (см. рис. 4) построен временной ход наклона графика повторяемости (рис. 6). Для поверхностного слоя (см. рис. 6а) выделяется статистически значимое падение значения $b(t)$ с 06.2005 по 12.2010 г. с 1.18 ± 0.1 до 0.88 ± 0.08 . На этом участке графика наиболее сильные землетрясения попадают на понижение кривой $b(t)$ и вблизи минимумов $b(t)$: два сильнейших

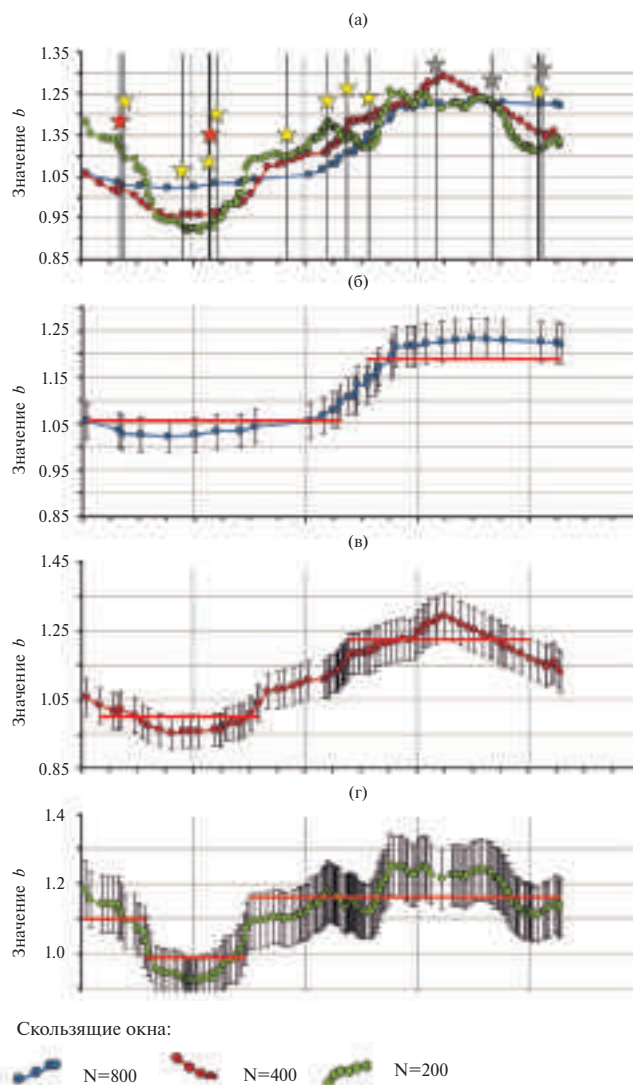


Рис. 5. Временной ход наклона графика повторяемости (здесь значение $b \equiv b^{m_b}$), рассчитанный в скользящих окнах шириной $N = 800, 400, 200$ землетрясений; вертикальные полосы – момент возникновения сильных землетрясений с $m_b \geq 6.5$ (а). Временной ход наклона графика повторяемости (значение b), рассчитанный в скользящих окнах разной ширины; вертикальные отрезки – стандартное отклонение значения b ; красная горизонтальная линия – временной интервал, в пределах которого значение b постоянно (б–г).

Красными звездочками отмечены землетрясения с магнитудами $m_b = 8.2$ и 8.3 , желтыми – $6.5 \leq m_b \leq 6.9$, серыми – $6.5 \leq m_b \leq 6.8$, $N = 10$ км (см. табл. 1).

землетрясения 3 мая 2006 г. с $m_b = 8.2$, $N = 55$ км и 29 сентября 2009 г. с $m_b = 8.3$, $N = 18$ км, а также четыре землетрясения с $m_b = 6.6–6.9$ (см. табл. 1). Поверхностные землетрясения в 2014 и 2015 гг. произошли на участке графика, где ошибка σb была значительной для определения трендов b .

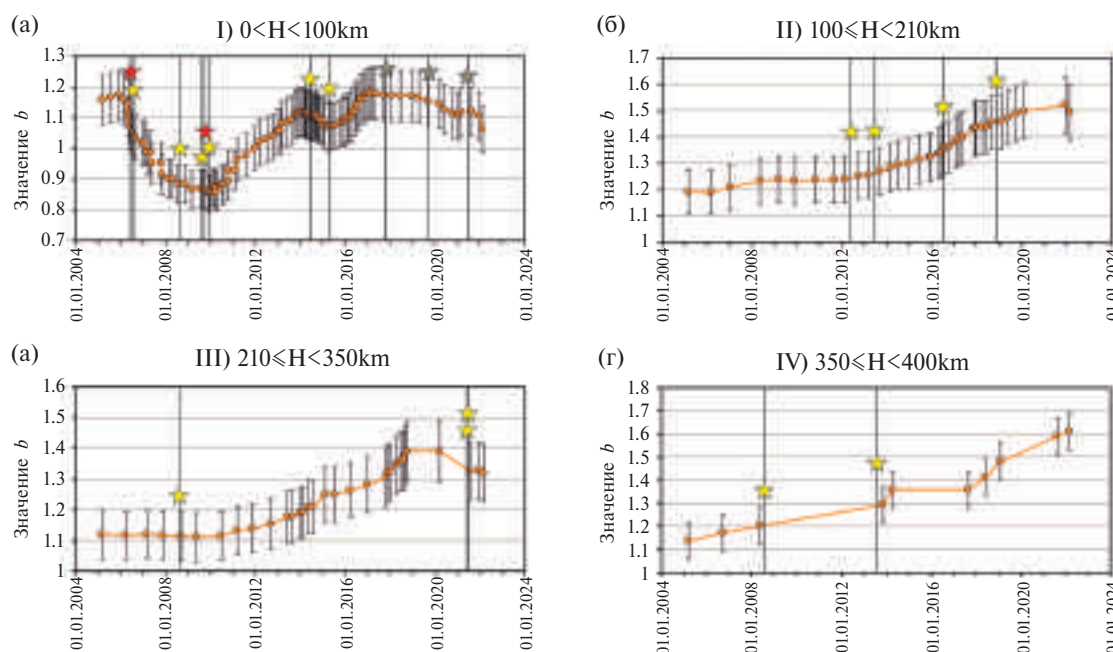


Рис. 6. Временной ход наклона графика повторяемости (значение b), рассчитанный в скользящих окнах шириной $N = 200$ землетрясений с перекрытием 20.

Четыре графика соответствуют обозначенным интервалам глубин (H). Вертикальные отрезки – стандартное отклонение значения b .

Обозначение землетрясений см. рис. 5.

Дополнительно на график вариации значений b для диапазона глубин 0–100 км (см. рис. 6а) нанесены упомянутые выше три землетрясения с $m_b = 6.5–6.8$ с присвоенной глубиной $H = 10$ км (серые звездочки), исключенные из расчетного каталога (см. табл. 1). В связи с тем, что мы не знаем их истинную глубину, вариации значений b на этом участке графика не обсуждаются.

Для глубин 100–210 км и 350–400 км выражена обратная тенденция, землетрясения с $m_b \geq 6.5$, в основном, происходили на участке графика, где значение b возрастало (см. рис. 6б, 6г). Для глубины 210–350 км землетрясения с $m_b \geq 6.5$ происходили на участке графика, где значение b было постоянным, а в 2021 г. после снижения значения b , но величина ob для этих участков не позволяет уверенно констатировать этот эффект (см. рис. 6в).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интерпретации вариаций значений b в зонах субдукции уделяется значительное внимание в литературе, но в большинстве случаев их можно связать с двумя факторами: 1) тектоническими характеристиками, увеличением

или уменьшением напряжения, действующего на систему разломов [Amelung, King, 1997; Kulhanek, 2005; Enescu et al., 2011; El-Isa, 2013], 2) дегидратацией субдуцируемой коры [Wyss et al., 2001a; Schorlemmer et al., 2003; Legrand et al., 2012].

В работе [Morales-Yáñez et al., 2022] отмечается, что более низкие значения b характерны для глубин до 60 км, а для более глубоких сегментов плиты характерны более высокие значения b . Сопоставимая тенденция вариации значений b наблюдалась для зоны субдукции Тонга. Минимальные статистически значимые значения $b = 0.71–0.75$ наблюдались на глубине 0–15 км, затем значение b монотонно возрастало и на глубине 94 км достигло максимального значения $b = 1.56$. После этого значение b варьировалось в диапазоне 1.05–1.36 на глубинах 100–400 км.

Рассмотрим вариации значений b с глубиной для разных зон субдукции. Исходя из рассчитанных значений b для зоны субдукции Тонга, выделена область с самыми высокими значениями на глубине 94 км (см. рис. 4), что также отмечено для других зон субдукции. Вариации

значений b с глубиной были выявлены для распределения землетрясений в регионе Вранча, Румыния [Enescu et al., 2011]. Значение b было большим в верхней части плиты на глубинах 60–120 км и меньшим в нижней части плиты (глубины 130–160 км). Сделано предположение, что изменение значения b с глубиной для землетрясений связано с изменением напряжения в погружающейся плите. Это предположение основано на обнаруженном повышенном среднем кажущемся напряжении в нижнем сегменте погружающейся плиты Вранча (глубины 110–220 км) по сравнению с верхним сегментом (глубина 60–110 км) для 28 землетрясений с $3.1 \leq M_D \leq 6.2$ (M_D – магнитуда по длительности сотрясения [Nassir et al., 2012]) с 1997 по 2000 гг. [Popescu et al., 2003].

Для зоны субдукции Чили обнаружены более высокие значения b (1.02) для сегмента плиты 70–150 км [Morales-Yáñez et al., 2022], промежуточные для глубин 0–30 км (0.89) и самые низкие для 30–70 км (0.76). Вариации значения b могут быть связаны с сегментацией плиты по падению.

Для региона Шумагинских островов (Алеутская гряда, США) максимальные значения $b = 1.12$ отмечены для глубин 95–110 км, что также отмечено для региона Новой Зеландии (максимальные значения $b = 1.45$ отмечены на глубине 90–100 км) [Wiemer, Benoit, 1996; Schorlemmer et al., 2003] выявили аномалию с высоким значением b для Южно-Тирренской зоны (Италия), простирающуюся от 90 км до ~200 км. В центре плиты на глубине 120–150 км наблюдалось $b = 2.3 \pm 0.2$, на глубинах 150–300 км $b = 1.5 \pm 0.4$. Эта зона характеризуется многочисленными наложенными друг на друга вулканическими постройками, а аномалия высокого значения b на глубине 90–200 км под вулканическим районом в данном исследовании связывается с происхождением магмы.

Высокое значение b обнаружено в зоне субдукции в районе Тохоку (северная Япония) на глубине 150 км [Wyss et al., 2001a], и оно также связывается с дегидратацией субдуцируемой плиты.

Низкие значения b (0.6–0.8) наблюдались в районах, разрушенных сильными землетрясениями с $M_w \geq 7.5$ [Legrand et al., 2012], повышенные значения b наблюдались в кластерах

сейсмичности, залегающих внутри погружаемой плиты под Центральной вулканической зоной Анд, и могли свидетельствовать об обширной термической дегидратации океанической литосферы, которая способствовала плавлению мантии и, следовательно, магмагенезу, питающему вулканическую цепь.

Вариации значения b с глубиной выявлены также для западного края зоны субдукции Рюкю, Тайвань [Lin et al., 2008]. Значения $b = 1.0$ наблюдались между глубинами 90 и 110 км над зоной Вадати–Беньофа, они на 20% выше, чем в соседних объемах, что также соответствует широко распространенной концепции о том, что дегидратация погружающейся океанической коры на глубине около 100 км, приносящая флюиды, мигрирующие в вышележащую мантию, может быть причиной повышения порового давления и снижения эффективного напряжения. Более низкие значения b обнаружены внутри погружающейся плиты на глубинах от 70 до 90 км и могут быть связаны с механизмами сжатия в этой части плиты.

В зонах субдукции на глубинах менее 60 км большинство землетрясений происходит на границе контактирующих плит или вблизи нее, часть в континентальной коре, в то время как сейсмичность, происходящая ниже 60 км, характеризуется внутриплитными землетрясениями [Morales-Yáñez et al., 2022]. Граница плит в зонах субдукции проходит как минимум через два отчетливых реологических перехода – на глубинах 20–50 км происходит переход к пластическому сдвигу, а на глубинах 80 ± 20 км пластичная сдвиговая зона переходит в мантийный клин [Abers et al., 2020].

По комплексной компьютерной модели распределения вещества зона субдукции разбита на сегменты [Васильев, 2010]. Верхний сегмент (<30 км) характеризуется незначительной дегидратацией. Следующий сегмент (30–50 км) характеризуется более интенсивной дегидратацией. Сегмент 50–100 км – интенсивной дегидратацией и частичным плавлением. На глубине ~100 км захватывается область полного плавления погружающейся плиты – возможного источника расплава для вулканизма. Поэтому повышенные значения b на глубине 90–100 км могут быть связаны с общим явлением, вызванным субдукцией

[Wiemer, Benoit, 1996] и дегидратацией плиты с последующей магмогенерацией [Stiphout et al., 2009].

Таким образом, вариации значения b по глубине связаны как с тектонической обстановкой, увеличением или уменьшением напряжения, так и с дегидратацией субдуцируемой плиты.

Океаническая плита Тонга испытывает значительное искривление как минимум до глубин 15 км [Millen, 1998]. Таким образом, можно предположить, что статистически значимые значения $b = 0.71–0.75$ на глубине 0–15 км связаны с искривлением плиты и, соответственно, большим напряжением. По распределению напряжений внутри северной части плиты Тонга ($17^{\circ}\text{S}–22^{\circ}\text{S}$, рассмотренная в данной работе область) [Bonnardot et al., 2009] установлено, что для нее характерен режим двойного напряжения. В диапазоне глубин 60–300 км наблюдается растяжение вниз по падению [Bonnardot et al., 2009]. Нижняя часть плиты глубже 400 км находится в режиме сжатия с дополнительной сдвиговой деформацией, вызванной, главным образом, мантийным течением. Растяжение плиты Тонга можно объяснить характером напряженного состояния, характерного, в целом, для зон субдукции: одной из главных причин движения плит следует рассматривать силу тяги со стороны погруженной и утяжеленной части литосферы, находящейся на глубинах более 100 км [Ребецкий, 2020]. Соотнося полученные значения b с напряженным состоянием плиты, можно сделать вывод, что повышенные $b = 1.05–1.56$ на глубинах ~60–300 км связаны с режимом растяжения плиты. В то же время вариации значения b с глубиной могут служить отражением реологических особенностей погружающейся плиты – максимальные значения $b = 1.56$ получены для глубины 94 км.

Рассмотрим временные вариации значения b для различных зон субдукции. По исследованию временных вариаций значения b сейсмически активного района вдоль побережья Тихого океана, включающего погружающиеся плиты Кокос и Наска (рассмотрены землетрясения с $0 \leq H \leq 70$ км), обнаружено, что восемь сильнейших землетрясений с $M_w \geq 7.0$ в 2000–2010 гг. произошли на фоне низких значений b [Kulhanek et al., 2018]. Временные вариации

значения b перед землетрясением 11 марта 2011 г. с $M_w = 9$ в районе Тохоку-Оки, Япония, показали монотонное снижение b с 1.26 до 0.99 с 2003 г. по 2011 г. [Li et al., 2021]. Уменьшение значения b соотносится с увеличением кажущегося напряжения в окрестности очага землетрясения с 0.65 до 1.64 Мпа в 2003–2011 гг.

По исследованию временных вариаций значения b в течение пятилетнего интервала для тектонических землетрясений региона о. Суматра с магнитудами $3.8 \leq M_w \leq 7.1$ [Nuannin, 2006] $b(t)$ варьировал в широком диапазоне от 1.10 до 1.78 и наблюдались статистически значимые падения значения b , соответствующие по времени двум крупным событиям – гигантскому землетрясению 26 декабря 2004 г. с $M_w = 9.0$ и землетрясению 28 марта 2005 г. с $M_w = 8.7$. В исследовании отмечено, что падение значений b показывает U-образную кривую на диаграммах $b(t)$, а наиболее сильные землетрясения сосредоточены вблизи минимумов на кривой $b(t)$. Реализованная аномалия низкого значения b подтверждает гипотезу о том, что будущий разрыв происходит в областях с высоким напряжением. Анализ временных вариаций значения b показал, что они оставались низкими после регистрации афтершоков, что позволяет предположить, что низкие значения b на небольших глубинах могут быть связаны с сохраняющимися во времени неровностями в сейсмогенной зоне.

Для зоны субдукции Тонга связь наиболее сильных землетрясений с $m_b \geq 6.5$ на глубинах 0–400 км с пониженными значениями b не столь очевидна. Но если рассмотреть глубины 0–100 км, то окажется, что часть наиболее сильных землетрясений сопровождалась падением значения b . Для больших глубин такой закономерности не выявлено. Тем не менее, по полученным результатам очевидно, что использование вариаций значения b в качестве самостоятельного предвестника сильных землетрясений пока не предоставляется возможным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценки значений b для зоны субдукции Тонга, полученные в настоящем исследовании, следуют общей тенденции предыдущих работ по исследованию вариаций значений b в зонах субдукции с глубиной, обнаруживая

более низкие значения $b = 0.71–0.75$ на глубинах 0–15 км, а максимальные значения $b = 1.56$ на глубине 94 км. Изменение значения b с глубиной для зоны субдукции Тонга интерпретируется с точки зрения изменения напряжения в погружающейся плите. По сопоставлению с тектонической моделью Тонга меньшие значения b в приповерхностном слое могут соответствовать повышенному напряжению, а для больших глубин до 400 км характерно растяжение плиты. Следует отметить, что область повышенного значения b на глубине 90–100 км также может являться результатом фундаментального процесса, связанного с дегидратацией плиты, на этой глубине залегает магматический фронт, с которым связано присутствие активного вулканизма.

Временные вариации значения b зоны субдукции Тонга отражают общую тенденцию возникновения наиболее сильных землетрясений на фоне понижения значений b , но такая закономерность наблюдается только в поверхностном слое на глубинах до 100 км. Для больших глубин такой закономерности не выявлено.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев В.И.* Дегидратация субдуцируемой коры как индикатор плавления (по результатам численного физико-химического моделирования) // Тезисы докладов XI Всероссийского петрографического совещания с международным участием “Магматизм и метаморфизм в истории земли”, 24–28 августа 2010 г. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2010. Т. 1. С. 100–101.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Завьялов А.Д.* Наклоны графика повторяемости как предвестник сильных землетрясений на Камчатке // Прогноз землетрясений. Душанбе, М.: Дониш, 1984. Вып. 5. С. 173–184.
- Коновалова А.А., Салтыков В.А.* Различия в наклоне графика повторяемости независимых землетрясений и афтершоковых последовательностей // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 74–81.
- Кулдорф Г.* Введение в теорию оценивания. М.: Физматлит, 1966. 176 с.
- Моги К.* Предсказание землетрясений / Перевод с англ. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Павленко В.А., Завьялов А.Д.* Сравнительный анализ методов оценки магнитуды представительной регистрации землетрясений // Тезисы докладов II Всероссийской конференции с международным участием “Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений”. М.: ИТПЗ РАН, 2021. С. 82–83.
- Писаренко В.Ф.* О законе повторяемости землетрясений // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 47–60.
- Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П.* Особенности развития сейсмической роевой активности в коринфском рифте в 2000–2005 гг. // Физика Земли. 2011. № 7. С. 54–66.
- Ребецкий Ю.Л.* Поле глобальных коровых напряжений Земли // Геотектоника. 2020. № 6. С. 3–24. <https://doi.org/10.31857/S0016853X20060119>
- Салтыков В.А.* О возможных проблемах оценки пространственно-временных особенностей представительства каталога землетрясений (на примере Камчатского каталога Единой Геофизической службы РАН) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 66–74. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-66-74>
- Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Физика переходных режимов сейсмичности / Под ред. В.Б. Смирнова, А.В. Пономарева. М.: РАН, 2020. 412 с.
- Abers G.A., Keken P., Wilson C.R.* Deep decoupling in subduction zones: Observations and temperature limits // Geosphere. 2020. V. 16. P. 1408–1424. <https://doi.org/10.1130/GES02278.1>
- Amelung F., King G.* Earthquake scaling laws for creeping and non-creeping faults // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. Iss. 5. P. 507–510. <https://doi.org/10.1029/97GL00287>
- Bevis M., Taylor F.W., Schutz B.E. et al.* Geodetic observations of very rapid convergence and

- back-arc extension at the Tonga arc // *Nature*. 1995. V. 374. P. 249–251.
- Bonnardot M.A., Régnier M., Ruellan E. et al.* Seismicity and state of stress within the overriding plate of the Tonga-Kermadec subduction zone // *Tectonics*. 2007. V. 26. № 5. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1029/2006TC002044>
- Bonnardot M.A., Régnier M., Christova C. et al.* Seismological evidence for a slab detachment in the Tonga subduction zone // *Tectonophysics*. 2009. V. 464. № 1–4. P. 84–99.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.10.011>
- Calderoni G., Rovelli A., Giovambattista R.D.* Stress Drop, Apparent Stress, and Radiation Efficiency of Clustered Earthquakes in the Nucleation Volume of the 6 April 2009, M_w 6.1 L'Aquila Earthquake // *J. of Geophys. Res. Solid Earth*. 2019. V. 124. Iss. 10. P. 10360–10375.
<https://doi.org/10.1029/2019JB017513>
- El-Isa Z.H.* Continuous-cyclic variations in the b -value of the earthquake frequency-magnitude distribution // *Earthquake Science*. 2013. V. 26. P. 301–320.
<https://doi.org/10.1007/s11589-013-0037-9>
- El-Isa Z.H., Eaton D.W.* Spatiotemporal variations in the b -value of earthquake magnitude–frequency distributions: Classification and causes // *Tectonophysics*. 2014. V. 615–616. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.001>
- Enescu B., Enescu D., Ito K.* Values of b and p : their variations and relation to physical processes for earthquakes in Japan and Romania // *Rom. Journal Phys.* 2011. V. 56. № 3–4. P. 590–608.
- Gerstenberger M., Wiemer S., Giardini D.* A systematic test of the hypothesis that the b value varies with depth in California // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28(1). P. 57–60.
- Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of Earthquakes in California // *Bull. Seismol. Soc. of Am.* 1944. V. 34. P. 185–188.
- Herrmann M., Piegari E., Marzocchi W.* Revealing the spatiotemporal complexity of the magnitude distribution and b -value during an earthquake sequence // *Nature Communications*. 2022. V. 13. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-32755-6>
- Kulhanek O.* Prague Centre of Mathematical Geophysics, Meteorology and their Applications // Seminar on b -value. Seminar paper. Prague, Czech: Department of Geophysics, Charles University, 2005.
- Kulhanek O., Persson L., Nuannin P.* Variations of b -values preceding large earthquakes in the shallow subduction zones of Cocos and Nazca plates // *J. of South American Earth Sciences*. 2018. V. 82. P. 207–214.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.01.005>
- Kusky T.M.* Déjà vu: Might Future Eruptions of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano be a Repeat of the Devastating Eruption of Santorini, Greece (1650 BC)? // *J. of Earth Science*. 2022. Pre-print.
<https://doi.org/10.1007/s12583-022-1624-2>
- Legrand D., Tassara A., Morales D.* Megathrust asperities and clusters of slab dehydration identified by spatiotemporal characterization of seismicity below the Andean margin // *Geophysical Journal International*. 2012. V. 191(3). P. 23–931.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05682.x>
- Li Y., Chen X.* Variations in Apparent Stress and b Value Preceding the 2010 M_w 8.8 Bio-Bío, Chile Earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 2021. V. 178. P. 4797–4813.
- Li Y., Chen X., Chen L.* Joint analysis of b -value and apparent stress before the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki, Japan earthquake // *Earthquake Science*. 2021. V. 34. Iss. 4. P. 232–333.
<https://doi.org/10.29382/eqs-2021-0036>
- Lin J., Sibueti J., Lee C. et al.* Special variations in the frequency–magnitude distribution of earthquakes in the southwestern Okinawa trough // *Earth Planet. Space*. 2007. V. 59. P. 221–225.
- Lin J.-Y., Sibuet J.-C., Hsu S.-K.* Variations of b -values at the western edge of the Ryukyu Subduction Zone, north-east Taiwan // *Terra Nova*. 2008. V. 20. P. 150–153.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2008.00801.x>
- Marzocchi W., Spassiani I., Stallone A., Taroni M.* How to be fooled searching for significant variations of the b -value // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 220(3). P. 1845–1856.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggz541>
- Mignan A., Woessner J.* Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs // *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*. 2012.
<https://doi.org/10.5078/corssa-00180805>
- Millen D.W., Hamburger M.W.* Seismological evidence for tearing of the Pacific plate at the northern termination of the Tonga subduction zone // *Geology*. 1998. V. 26(7). P. 659–662.
<https://doi.org/10.1130/0091-7613>
- MoralesYáñez C., Bustamante L., Benavente R. et al.* B value variations in the Central Chile seismic gap assessed by a Bayesian transdimensional approach // *Scientific Reports*. 2022. 12: 21710. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-25338-4>
- Nassir S., Al-Humidan S., Lashin A.* Duration magnitude calibration of Kuwait national seismic network // *Scientific Research and Essays*. 2012. V. 7(4). P. 453–459.
<https://doi.org/10.5897/SRE11.1096>

- Newhall C.G., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism // *J. of Geophys. Res.: Oceans*. 1982. V. 87. № C2. P. 1231–1238.
<https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Nuannin P.* The potential of *b*-value variations as Earthquake precursors for small and large events / PhD thesis, Uppsala University. 2006. P. 1–48.
- Penisoni M., Suetsugu D., Hara T.* Determination of focal mechanism of the Tonga Fiji earthquakes with a sparse regional seismic network // *Synopsis of IISSE-GRIPS Master's Thesis*. 2021.
- Popescu E., Grecu B., Popa M. et al.* Seismic source properties: indications of lithosphere irregular structure on depth beneath Vrancea region // *Rom. Rep. Phys.* 2003. V. 55(3). P. 303–321.
- Reasenber P.* Second-order moment of central California seismicity 1969–1982 // *J. of Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 3–18.
- Rodríguez-Pérez Q., Zuñiga F.R.* Imaging *b*-value depth variations within the Cocos and Rivera plates at the Mexican subduction zone // *Tectonophysics*. 2018. V. 734–735. P. 33–43.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.03.019>
- Schorlemmer D., Neri G., Wiemer S., Mostaccio A.* Stability and significance tests for *b*-value anomalies: Example from the Tyrrhenian Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30(16). P. 1–4.
<https://doi.org/10.1029/2003GL017335>
- Scordilis E.M.* Empirical global relations converting *M_s* and *m_b* to moment magnitude // *J. of Seismology*. 2006. V. 10. P. 225–236.
<https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Stiphout V.T., Kissling E., Wiemer S., Ruppert N.* Magmatic processes in the Alaska subduction zone by combined 3-D *b* value imaging and targeted seismic tomography // *J. of Geophys. Res.: Solid Earth*. 2009. V. 114. № B11. P. 1–16.
<https://doi.org/10.1029/2008JB005958>
- Tormann T.* *B*-values as Stress Meters in the Earth's Crust // Doctoral dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETN. Nr. 19594. Zurich, 2011.
- Wiemer S., Benoit J.P.* Mapping the *b*-value anomaly at 100 km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. № 13. P. 1557–1560.
<https://doi.org/10.1029/96GL01233>
- Wyss M., Shimazaki K., Wiemer S.* Mapping active magma chambers by *b* values beneath the off-Ito volcano, Japan // *J. of Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 20413–20422.
- Wyss M., Hasegawa A., Nakajima J.* Source and path of magma for volcanoes in the subduction zone of northeastern Japan // *Geophys. Res. Lett.* 2001a. V. 28(9). P. 1819–1822.
<https://doi.org/10.1029/2000GL012558>
- Wyss M., Wiemer S., Zuniga F.R.* ZMAP a Tool for Analyses of Seismicity Patterns. Typical Applications and Uses: A Cookbook. 2001b. 64 p.
- Wyss M., Stefansson R.* Nucleation points of recent main shocks in southern Iceland, mapped by *b*-values // *Bull. Seismol. Soc. of Am.* 2006. V. 96(2). 599 p.
- Zhu A., Xu X., Hu P. et al.* Variation of *b* value with hypocentral depth in Beijing area: Implications for earthquake nucleation // *Chinese Science Bulletin*. 2005. V. 50. P. 691–695.

VARIATIONS IN THE SLOPE OF THE EARTHQUAKES RECURRENCE CURVE IN THE TONGA SUBDUCTION ZONE IN 2005–2022

A. A. Shakirova*, V. A. Saltykov

*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences,
bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: shaki@emsd.ru*

The Tonga–Kermadec subduction zone is located between the Pacific and Australian plates and is the site of the highest rates of Pacific plate subduction and dominant extension. In 2006 and 2009 in this region, two strong earthquakes occurred with magnitudes $M_w = 8.0$ and 8.1. There are about 170 islands in the Tonga region. They are volcanic centers that have erupted regularly over the past few decades. The paper presents the results of determining temporal variations in the slope of the earthquakes recurrence curve (b -value) in the Tonga subduction zone for 2005–2022 and variations in b depending on depth. Temporal variations in the b -value reflect the general tendency for the most powerful earthquakes to occur against the background of a decrease in b -value only in the surface layer at depths of 0–100 km. By comparing the variation of b -value with depth with a tectonic model of the Tonga subduction zone, it suggested that lower b -value might reflect greater stress at the top of the subducted slab due to its bending. Elevated b -value can apparently be associated with stretching mechanisms. For the Tonga subduction zone, as for other subduction zones, the increased b -value identified at a depth of 90–100 km, which may be due to the presence at this depth of a magmatic front, which is associated with active volcanism.

Keywords: earthquake, Tonga subduction zone, slope of the earthquakes recurrence curve, Gutenberg-Richter law, representativeness of the catalog