УДК 550.34.01

ХАРАКТЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИН КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮЖНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. П. А. Малютин^{1,2,3,} *, А. А. Скоркина¹, И. А. Воробьева^{1,4}, С. В. Баранов^{1,5}, С. Д. Маточкина^{1,2}, А. П. Молокова^{1,2}, П. Н. Шебалин^{1,4}

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики Земли, г. Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

⁴Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

⁵Кольский филиал ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Апатиты, Россия

**E-mail: pavel@mitp.ru* Поступила в редакцию 14.01.2024 г. После доработки 06.02.2024 г.

Принята к публикации 13.02.2024 г.

Основными параметрами землетрясения являются магнитуда, координаты эпицентра и глубина, которая нередко оказывает определяющее влияние на макросейсмический эффект от тех или иных землетрясений. В связи с этим, например, для оценки сейсмического риска, важной информацией является именно статистика возникновения землетрясений на определенных глубинах. В данной работе анализировались каталоги континентальных коровых землетрясений в регионе Южная Сибирь. Сравнивались варианты аппроксимации распределения глубин землетрясений разными функциями. Показано, что распределение Вейбулла с максимумом на 8 км наиболее точно описывает распределение глубин для коровых землетрясений Южной Сибири. При раздельном рассмотрении западной (Алтай–Саяны) и восточной (зона Байкальского рифта) частей региона распределение Вейбулла также оказалось предпочтительным. Максимум распределения для зоны Байкальского рифта оказался на 9 км, для зоны Алтай–Саяны – на 7 км, соответственно.

Ключевые слова: землетрясение, глубина землетрясения, гипоцентр, распределение Вейбулла, синтетический каталог землетрясений, сейсмогенный слой.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0002333724040046, EDN: FWVLJX

введение

В результате обработки сейсмограмм конкретных землетрясений наиболее стандартными и рутинно определяемыми параметрами являются время в очаге, координаты и магнитуда. Примечательно, что при локации событий в первую очередь внимание уделяется координатам без определения глубины (другими словами, определяется эпицентр с фиксированной глубиной). Во-первых, такой подход позволяет точнее оценить координаты, поскольку в процессе решения обратной задачи невязки распределяются между меньшим количеством переменных [Павлов, Абубакиров, 2021]. Во-вторых, выделению глубины в особую категорию параметров существуют и исторические предпосылки. Например, первоначально считалось, что все землетрясения происходят на сопоставимой

глубине (так, например, самые первые локации японских землетрясений определяли их местоположение на сотни километров "в сторону", а не на глубину). То есть само становление методов определения глубины землетрясений тесно связано с формированием представлений о геолого-тектонических процессах и строении земной коры.

Глубина землетрясения является таким же важным параметром, как и его магнитуда, когда речь идет об оценке сейсмического риска и сейсмической опасности, а именно, об оценке вероятного макросейсмического эффекта от возможных сильных землетрясений. Именно небольшая глубина — одна из основных причин тяжелых последствий от таких землетрясений как Спитакского 1988 г. с $M_w = 6.9$ (глубина — 10 км), Нефтегорского 1995 г. с $M_w = 7.6$ (глубина – 9 км), Гаити 2010 г. с $M_w = 7.0$ (глубина – 13 км) или пары землетрясений на границе Турции и Сирии 2023 г. с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.7$ (глубины оцениваются как 10 ± 1.8 км) и других катастрофических землетрясений.

С целью повышения точности оценок глубин за последние годы было предложено много разных методик. Наиболее популярными среди них стали – метод главного события (master event) [Klein, 2002], метод, использующий характерные (глубинные) фазы на записях удаленных землетрясений [Engdahl et al., 1998] и записях региональных землетрясений [Ма, 2010], метод двойных разностей [Waldhauser, 2001], метод, использующий спектры поверхностных волн [Tsai, Aki, 1970], привлечение отношения скоростей (V_p/V_s) для локации гипоцентров [Nicholson, Simpson, 1985]. К сожалению, ни один из методов в настоящее время не входит в стандартный алгоритм обработки сейсмических данных, и, чаще всего, применяется только локально (например, [Dorbath et al., 2008] – для Чуйского землетрясения 2003 г. с $M_w = 7.3$ и его афтершоков, [Кустова, Радзиминович, 2006] – для афтершоков Куморского землетрясения 2003 г. с $M_w = 5.6$, [Deverchere et al., 1993] – перелокация отдельных очагов Байкальской рифтовой зоны методом главного события и т.п.).

Таким образом, умеренный рост количества сейсмических станций в Южной Сибири, а также применение усовершенствованных методик локации землетрясений, хоть и позволило уточнить глубины очагов землетрясений в отдельных районах, однако точность таких оценок на территории Южной Сибири все еще не велика (один из примеров возможностей современной сети сейсмических станций на территории – [Skorkina, 2023]). Особенно точность оценок глубин в современных каталогах недостаточна для неглубоких или коровых землетрясений, где вариации глубин сопоставимы с погрешностью определения самих глубин, которые обычно составляют 3, 5, 10 км в зависимости от расстояния до ближайшей станции, набора азимутов для каждого отдельного землетрясения и метода локации.

С точки зрения методики определения глубины, как показывает практика, высокая точность определения параметра возможна только в случае плотной трехмерной сети наблюдений (например, в шахтах и на месторождениях полезных ископаемых с плотной сетью скважинных наблюдений или на отдельных вулканах), то есть в случае, когда гипоцентр землетрясения располагается непосредственно под станцией, а эпицентр при этом располагается в плотном окружении станций сейсмической сети, расположенных не только на разных азимутах, но и на разной глубине/высоте [Bondár et al., 2004].

С другой стороны, методы определения глубины существенно зависят от априорной информации о глубинном скоростном строении и границах сейсмогенного слоя. С точки зрения геомеханики разлома такие границы должны локализовать потенциальную область хрупкой деформации от области пластичного течения материала [Scholz, 1998].

В ранних реологических моделях [Sibson, 1977; Kirby, 1980], максимально возможная глубина землетрясения жестко связывалась с хрупким трением скольжения верхней коры и асейсмично деформированной через температурнозависимые (слабочувствительные к давлению) пластичные процессы, такие как дислокационная ползучесть и диффузная ползучесть, нижней коры [Kohlstedt et al., 1995].

В настоящее время предполагается, что существует достаточно широкая переходная зона между различными режимами в диапазоне глубин 13-18 км, где деформация материала осуществляется полухрупким или полупластичным способом. Эта зона получила название "зона хрупко-пластичного перехода" [Dragoni, 1993; Amitrano, 2003; Gueydan et al., 2003; Cole et al., 2007; Handy et al., 2007; Doglioni et al., 2011; и др.]. Считается, что верхняя часть такой зоны связана с пластичным течением кварца и хрупким течением полевого шпата внутри сейсмического цикла в отсутствии разрушительного землетрясения и косейсмического разрушения минералов, сопровождающего такое землетрясение. Нижняя часть переходной зоны предположительно связана с пластичным течением кварца и хрупким течением полевого шпата и отсутствием косейсмической деформации. Ниже зоны хрупко-пластичного перехода кварц и полевой шпат оба пластичны [Cole et al., 2007].

Также, в последнее время широко признаются и другие факторы, которые существенно влияют на распределение глубин континентальных коровых землетрясений, особенно в первых километрах земной коры. К ним относятся тепловое состояние [Doser, Канамори, 1986], пористость и флюидонасыщенность горных пород [Shebalin, Narteau, 2017], и "зрелость" разломных зон [Marone, Scholz, 1988].

Согласно работе [Лукк, Леонова, 2020], концентрация слабых землетрясений на малых

глубинах обусловлена тем, что в силу относительно высокой степени неоднородности и малой прочности хрупкого разрушения материала коры процесс разрушения останавливается чаще, и меньше вероятность развития очага землетрясения в крупное сейсмическое событие, в то время, как на больших глубинах (9–15 км) любое начало разрыва сплошности с большей вероятностью перерастет в более крупное землетрясение, поскольку материал горной породы на этих глубинах становится более однородным и более прочным. Такая же гипотеза обсуждается и в работе [Abercrombie, Mori, 1996], на примере каталога Калифорнии, где показано, что практически все умеренные и сильные землетрясения на глубинах до 6 км сопровождаются форшоками, только около 50% землетрясений на глубинах около 10 км и практически отсутствуют форшоки на глубинах около 15 км, что авторы также связывают с высокой концентраций неоднородностей на малых глубинах, которые чаще останавливают разрывной процесс, мешая единовременному сбросу накопившихся напряжений.

В связи с этим, в реальных каталогах для случаев, когда глубину невозможно определить с достаточной точностью по сейсмическим записям, параметру присваивают фиксированные значения, связанные с априорной информацией о преобладающих глубинах землетрясений в том или ином регионе (наиболее распространенные значения – 0, 10 и 35 км). И как показывает практика, нередко такой подход в итоге приводит к ошибочным представлениям о рапределении глубин в регионе, а главное, такие значения совершенно не подходят, например, для задач оценки сейсмической опасности, моделирования синтетического каталога и других задач, ориентированных на получение максимально достоверной оценки макросейсмических проявлений и вероятных воздействий на инфраструктуру.

Территория Южной Сибири характеризуется высокой сейсмической активностью [Шебалин и др., 2022], по некоторым оценкам [Писаренко и др., 2022] максимальные возможные магнитуды могут даже несколько превышать M = 8, при этом сейсмичность здесь приурочена к геолого-тектоническим процессам именно в земной коре, а значит, наиболее вероятные значения глубин невелики. Поэтому определение распределения глубин землетрясений для данной территории является значимой как с точки зрения понимания реологических свойств земной коры в данном регионе, так и с практической точки зрения — для оценки сейсмического риска и сейсмической опасности, моделирования синтетического каталога землетрясений.

Важно также отметить, что в задачах оценки сейсмической опасности возможные глубины очагов землетрясений обычно моделируются равномерным распределением в некотором слое, задаваемым экспертами [Пояснительная записка.... 2017]. Здесь мы предлагаем перейти к более объективному подходу, основанному на анализе фактически определенных оценок глубины очага. Очевидно, что индивидуальные оценки глубин могут иметь большую ошибку относительно истинного значения. Но в предположении. что такие ошибки не имеют систематической составляющей, можно утверждать, что эмпирическое распределение глубин вполне отражает истинное распределение глубин. Эмпирическое распределение, помимо фиксированных значений. может иметь значительные выбросы, обусловленные большими кластерами событий. В работе проводится сглаживание эмпирических распределений путем аппроксимации малопараметрическими функциями.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

С целью описания распределения глубин землетрясений Южной Сибири анализировался каталог землетрясений с 1982 по 2022 гг., ограниченных 47-60° с.ш. и 75-110° в.д. (рис. 1). Каталог состоит из 10141 событий, полученных объединением каталогов из ежегодников "Землетрясения в СССР" за 1982-1991 гг. (отцифрованная версия доступна по ссылке http://www. wdcb.ru/sep/seismology/cat USSR.ru.html), exeгодников "Землетрясения Северной Евразии" (1992–2017 гг.) (http://www.gsras.ru/zse/contents. html) [Землетрясения..., 2022] и "Землетрясения России" (2018-2021 гг.) (http://www.gsras.ru/zr/ contents.html) [Землетрясения России..., 2023] и каталога Международного сейсмологического центра ISC (http://www.isc.ac.uk). Дубли в каталоге выявлены и удалены по методике работы [Vorobieva et al., 2022]. Проведена также декластеризация каталога по методике работы [Shebalin et al., 2020].

Отметим, что основные каталоги ("Землетрясения Северной Евразии"), имеющиеся для данной территории, получены разными филиалами Единой Геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН), а именно Алтае-Саянским (53 станции) и Байкальским (21 станция) филиалами [Виноградов, 2023]. В Алтае-Саянском филиале обработка осуществляется в программе SeisComp

[Weber et al., 2007] (гипоцентральные решения рассчитываются в рамках двухслойной региональной модели с заданной средней глубиной очагов в 15 км). В Байкальском филиале локализация гипоцентров проводится по программе "Регион", основанной на работах С.И. Голенецкого [Голенецкий, 1990]. В расчетах используются следующие параметры: мошность земной коры 40 км, начальная глубина гипоцентров 10 км, скорости прямых продольных и поперечных волн 6.15 и 3.58 км/с соответственно [Radziminovich, 2022]. Кроме этого, в Байкальском филиале для релокации гипоцентров для некоторых землетрясений привлекаются дополнительные программы – HYPOINVERSE [Klein, 2002], HYPOELLIPSE [Lahr, 1999], HYPOCENTER [Lienert, 1994].

Несмотря на то, что задача определения глубины по сейсмическим данным сводится к минимизации суммы взвешенных квадратов невязок между наблюденными и теоретическими временами прихода волн, использование разных программных пакетов приводит к тому, что методика реализуется по-разному (например, используются разные типы волн, весовые коэффициенты, методы интерполяции и т.п.), а также, конечно, отличаются годографы (скоростные модели), по которым рассчитываются теоретические времена пробега сейсмических волн. Поэтому оценки глубин в исследуемом районе не однородны по методике (например, неоднородность оценок глубин для Байкальского рифта подробно рассмотрена в работе [Радзиминович, 2010]).

В настоящей работе для анализа распределения глубин не рассматривались события с отсутствующим значением глубины или фиксированным (табл. 1, табл. 2). Фиксированные значения были определены по распределению глубин по широте, долготе и по годам (рис. 2).



Рис. 1. Карта с эпицентрами землетрясений (основных толчков) Южной Сибири с 1982 по 2022 гг., где радиус круга соответствует магнитуде землетрясения.



Рис. 2. Распределение глубин землетрясений Южной Сибири по долготе (а) и по годам (б), (в).

Стандартные оценки глубин равны: 5, 10, 15, 35 и 9, 11 км для западной части региона (рис. 26) и 10 и 35 км для восточной части (рис. 2в). При этом большее количество оценок зафиксированы именно на 10 км ($18\%^1$ – на западе и 22% – на востоке), значительно меньшее количество – на 35 км (5% – на западе и 1% – на востоке). Доли оценок 5, 9, 11 и 15 км составляют 4, 2, 5, 8% соответственно. Отметим, что определения глубин неравномерны по времени в западной части региона (см. рис. 26). Поэтому мы проводим анализ распределения глубин как для всего региона, так и отдельно для его западной (до 100° в.д.) и восточной частей.

В связи с большим количеством артефактов в региональных каталогах, были также проанализированы каталоги ANSS (USGS), с 1982 по 2022 гг., ограниченных 47-60° с.ш. и 75-110° в.д., с представительной магнитудой 4.5 для района исследования (399 землетрясений, табл. 3) и ISC с представительной магнитудой 4 (795 землетрясений, табл. 4). Например, преимуществом каталога ANSS является наличие подробного комментария к оценке глубины в каталоге, определенной с помощью глубинных фаз ("constrained by depth phases"), определенной при локации землетрясения ("from location"), определенной при моделировании *P*-волн ("from modeling of broad-band p waveforms"), в том числе с указанием расстояния до ближайшей станции. Однако поскольку количество надежных определений глубин крайне недостаточно в обоих рассмотренных каталогах, в дальнейшем анализе они не участвуют.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИН И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Как обсуждалось выше, существует ряд задач, когда распределение наблюдаемых глубин необходимо описать функцией, например, чтобы независимо переносить наблюденный параметр на другой период времени — ретроспективно или с целью оценки вероятности проявлений параметра в будущих интервалах времени. С этой целью были рассмотрены распределения глубин основных толчков и полного каталога (включая афтершоки) в дифференциальном и интегральном виде (рис. 3, рис. 4).

В каждом случае рассматривались несколько вариантов аппроксимации, а именно: обратное распределение Гаусса, логлогистическое распределение, логистическое распределение, нормальное распределение, логнормальное распределение, гамма-распределение, распределение Вейбулла. Оценки проведены методом максимального правдоподобия для распределений, усеченных в значении 0.5 км. Выбор значения для усечения распределения обусловлен тем, что значения глубины 0 исключены из рассмотрения.

Полученные оценки параметров рассматриваемых распределений представлены в табл. 5, табл. 6 — независимо для западного (Алтай— Саяны) и восточного (Байкальский рифт) районов.

Наилучшую сходимость результатов показало распределение Вейбулла (табл. 5, табл. 6). В рассматриваемых случаях максимумы распределений приходятся на глубины в 7—9 км. Интересно, что согласно работе [Weibull, 1951] распределение Вейбулла изначально предлагалось применять к задачам подобного рода, а именно,

¹ Доля фиксированных глубин определена от общего количества землетрясений в каталоге, в том числе включающих эпицентры без глубины.

Магнитудный	Количество событий	Количество событий	Процент
диапазон	в каталоге	с глубиной	"потери", %
3.5-4	1911	238	88
	995*	149	85
4-5	869	205	76
	417	132	68
5-6	60	49	18
	35	31	11
6-7.2	8	8	0
	4	4	0
Всего	2848	500	82
	1451	316	78

Таблица 1. Количество подходящих оценок глубин в разных магнитудных группах для западного региона (Алтай–Саяны)

Примечание: * — значения первой строки соответствуют количеству землетрясений для каталога с афтершоками, значения второй строки соответствуют количеству землетрясений для варианта без афтершоков.

Магнитудный диапазон	Количество событий в каталоге	Количество событий с глубиной (нефиксированной)	Процент "потери", %
3.5-4	589	301	49
	395*	251	36
4-5	268	170	37
	176	125	29
5-6	19	17	11
	15	13	13
6-6.8	2	2	0
	2	2	0
Всего	878	490	44
	588	391	34

Таблица 2. Количество подходящих оценок глубин в разных магнитудных группах для восточного региона (Байкальская рифтовая зона)

Примечание: * — значения первой строки соответствуют количеству землетрясений для каталога с афтершоками, значения второй строки соответствуют количеству землетрясений для варианта без афтершоков.

задачам определения статической и динамической прочности, нарушения электроизоляции, и т.п., которые предлагается решить по принципу нахождения "слабого звена" в цепи.

Следует отметить, что ни одна из рассмотренных аппроксимаций формально не является однородной с фактическим распределением: во всех случаях гипотеза об однородности отвергается по критерию Колмогорова—Смирнова на уровне значимости менее 0.05. Это связано с определенной неоднородностью данных — мы исключили из рассмотрения фиксированные значения глубины.

Магнитудный диапазон	Количество событий в каталоге	Количество событий с глубиной (нефиксированной)	Процент "потери", %
4.5-5	227	54	76
	79*	17	78
5-6	60	19	68
	23	8	65
6–7.3	8	2	75
	2	0	100
Всего	295	75	75
	104	25	76

Таблица 3. Количество подходящих оценок глубин в разных магнитудных группах в каталоге ANSS

Примечание: * — значения первой строки соответствуют количеству землетрясений для западного региона (Алтай—Саяны), значения второй строки соответствуют количеству землетрясений для восточного региона (Байкальская рифтовая зона).

Магнитудный диапазон	Количество событий в каталоге	Количество событий с глубиной (нефиксированной)	Процент "потери", %
4-4.5	372	97	74
	132*	73	45
4.5-5	149	79	47
	58	48	17
5-7.3	63	57	10
	21	19	10
Всего	584	233	60
	211	140	34

Таблица 4. Количество подходящих оценок глубин в разных магнитудных группах в каталоге ISC

Примечание: * — значения первой строки соответствуют количеству землетрясений для западного региона (Алтай—Саяны), значения второй строки соответствуют количеству землетрясений для восточного региона (Байкальская рифтовая зона).

Для проверки устойчивости получаемых оценок мы провели дополнительный тест. На рис. 5 представлены гистограммы глубин и аппроксимация для объединения двух регионов (афтершоки не исключались) в двух вариантах с исключением фиксированных значений и без их исключения. В первом варианте распределение Вейбулла, как и в случае отдельных регионов, оказалось предпочтительным. Во втором варианте лучшими и близкими по значению функции правдоподобия оказались логлогистическое, гамма-распределение и распределение Вейбулла. При этом параметры распределения Вейбулла во втором варианте изменились незначительно по сравнению с первым. В табл. 7 приведены оценки параметров распределения Вейбулла для двух вариантов использования фиксированных значений и вариантов каталога:



Рис. 3. Распределение глубин очагов землетрясений Алтай—Саяны и варианты аппроксимации. Слева – дифференциальные распределения, справа – интегральные распределения и рассмотренные варианты аппроксимации. Снизу – по полному каталогу землетрясений, сверху – по каталогу основных толчков (афтершоки удалены). Варианты аппроксимации – усеченные распределения: обратное распределение Гаусса, логлогистическое распределение, логистическое распределение, нормальное распределение, логнормальное распределение, гаммараспределение, распределение Вейбулла.

полного и с исключенными афтершоками. Как видно из таблицы, параметры распределения Вейбулла в четырех вариантах различаются несущественно, что говорит о высокой устойчивости полученных оценок.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как было упомянуто ранее, в настоящее время не существует единой точки зрения о наиболее вероятных глубинах для землетрясений Южной Сибири (где разные методы оценки глубины дают большие невязки в связи с недостаточно плотной сетью сейсмических станций в регионе).

Вариации экстремумов распределения глубин землетрясений иногда интерпретируется в соответствии с разным составом — горными породами, преимущественно слагающими слои [Albaric et al., 2014; Déverchère et al., 2001]. Например,

ФИЗИКА ЗЕМЛИ №4 2024

разрезы, где в составе чаще встречается кварц (то есть, более слабый в терминах прочности материал), склонны иметь пики распределения на меньших глубинах (10–15 км), чем разрезы с преимущественным наличием диабазов (20– 35 км в зависимости от наличия флюидов).

В работе [Лукк, Леонова, 2020] изучены распределения коровых землетрясений для семи различных в геотектоническом отношении районов мира (Южной Калифорнии, Турции, Фенноскандии, Гармского полигона, Ирана, Кавказа и Греции). Так, для Южной Калифорнии были получены четко выраженные экстремумы на глубинах 5 и 8–10 км (в образовании экстремумов участвуют землетрясения с разными магнитудами). Два экстремума также выделены для Гармского полигона (5 и 10 км). При этом для более сильных землетрясений (с $M \ge 3$) экстремум на глубине 10 км несколько преобладает



Рис. 4. Распределение глубин очагов землетрясений Байкальского рифта и варианты аппроксимации. Слева – дифференциальные распределения, справа – интегральные распределения и рассмотренные варианты аппроксимации. Снизу – по полному каталогу землетрясений, сверху – по каталогу основных толчков (афтершоки удалены). Варианты аппроксимации – усеченные распределения: обратное распределение Гаусса, логлогистическое распределение, нормальное распределение, логнормальное распределение, гаммараспределение, распределение Вейбулла.

над первым экстремумом. Авторы показали, что слабые землетрясения приурочены к двум горизонтам в континентальной коре на глубинах 5 и 10 км ($\pm 2-3$ км) и предполагают, что концентрация слабых землетрясений вблизи глубины 5 км обусловлена тем, что в силу относительно высокой неоднородности и малой прочности хрупкого разрушения материала коры разрывообразование останавливается раньше, чем оно разовьется в крупное землетрясение, в то время, как на больших глубинах (9–15 км) любое начало разрыва с большей вероятностью перерастет в более крупное событие, поскольку материал горной породы на этих глубинах становится более однородным и более прочным.

Однако согласно работе [Радзиминович, 2010] результаты переопределения глубин гипоцентров с применением дополнительных методов и программ свидетельствуют о том, что наибольшая сейсмическая активность в Байкальском регионе характерна для диапазона глубин 10–25 км. При этом в работе также отмечается, что согласно работе [Голенецкий, 1990], большинство очагов располагается в верхнем слое земной коры (до 15 км).

В другом исследовании [Déverchère et al., 2001], также территориально приуроченному к Байкальской рифтовой зоне, по результатам релокации 632 землетрясений (1971–1997 гг.): 7–15% событий имеет глубину в диапазоне 0–10 км; 50% – 15–25 км; 9–15% – 25–30 км; 7–13% – 30–40 км, и совсем немного – ниже границы Мохо. В работе также сделано предположение о литологическом составе на соответствующих глубинах.

В работе для западного региона ([Dorbath et al., 2008] — для Чуйского землетрясения 2003 г. с $M_w = 7.3$ и его афтершоков) пересчет

Распределение	Параметры функции	Мода (км)	Логарифмическая функция правдоподобия
Обратное Гауссово	$\begin{array}{l} \mu = 13.76, \lambda = 11.38 \\ \mu = 12.88, \lambda = 11.54* \end{array}$	4.02 3.82	-1701.07 -1083.39
Логлогистическое	$\begin{array}{l} \mu = 2.27, \sigma = 2.42 \\ \mu = 2.27, \sigma = 2.34 \end{array}$	6.76 6.57	-1661.72 -1060.53
Логистическое	$\begin{array}{l} \mu = 10.71, \sigma = 3.84 \\ \mu = 10.71, \sigma = 4.00 \end{array}$	10.71 10.71	-1678.47 -1076.55
Нормальное	$\begin{array}{l} \mu = 11.38, \sigma = 7.29 \\ \mu = 11.54, \sigma = 7.72 \end{array}$	11.39 11.53	-1702.53 -1094.32
Логнормальное	$\begin{array}{l} \mu = 2.20, \sigma = 0.76 \\ \mu = 2.19, \sigma = 0.79 \end{array}$	5.01 4.79	-1672.99 -1066.89
Гамма-распределение	a = 2.27, b = 5.02 a = 2.12, b = 5.44	6.37 6.10	-1638.92 -1046.62
Вейбулл	a = 12.72, b = 1.62 a = 12.84, b = 1.55	7.04 6.61	-1637.87 -1046.68

Таблица 5. Варианты аппроксимации наблюденного распределения глубин землетрясений западного региона (Алтай–Саяны)

Примечание: * — значения первой строки соответствуют количеству землетрясений для каталога с афтершоками, значения второй строки соответствуют количеству землетрясений для варианта без афтершоков.

Таблица 6. Варианты аппроксимации наблюденного распределения глубин землетрясений восточного региона (Байкальский рифт)

Распределение	Параметры функции	Мода (км)	Логарифмическая функция правдоподобия
Обратное Гауссово	$\begin{array}{l} \mu = 14.02, \lambda = 12.28 \\ \mu = 15.94, \lambda = 12.99* \end{array}$	4.14 4.64	-1724.57 -1392.89
Логлогистическое	$\begin{array}{l} \mu = 2.38, \sigma = 2.40 \\ \mu = 2.45, \sigma = 2.51 \end{array}$	7.45 8.25	-1674.48 -1348.37
Логистическое	$\begin{array}{l} \mu = 11.99, \sigma = 4.02 \\ \mu = 12.73, \sigma = 4.11 \end{array}$	11.99 12.73	-1653.38 -1327.77
Нормальное	$\begin{array}{l} \mu = 12.28, \sigma = 7.02 \\ \mu = 12.99, \sigma = 7.17 \end{array}$	12.28 12.99	-1650.01 -1325.05
Логнормальное	$\begin{array}{l} \mu = 2.28, \sigma = 0.78 \\ \mu = 2.35, \sigma = 0.75 \end{array}$	5.36 5.99	-1688.24 -1361.98
Гамма-распределение	a = 2.35, b = 5.23 a = 2.51, b = 5.18	7.06 7.81	-1637.80 -1320.51
Вейбулл	a = 13.75, b = 1.77 a = 14.58, b = 1.84	8.59 9.52	-1623.22 -1307.56

Примечание: * — значения первой строки соответствуют количеству землетрясений для каталога с афтершоками, значения второй строки соответствуют количеству землетрясений для варианта без афтершоков.

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 4 2024



Рис. 5. Гистограммы глубин очагов землетрясений Южной Сибири и рассмотренные варианты аппроксимации. Использован полный каталог землетрясений без исключения афтершоков. Варианты аппроксимации – как на рис. 3 и рис. 4. Слева – фиксированные значения глубины исключены, справа – без исключения фиксированных значений.

Таблица 7. Результаты аппроксимации наблюденного распределения глубин землетрясений Южной Сибири распределением Вейбулла

Вариант	Параметры распределения Вейбулла		Мола (км)
	а	Ь	
Полный каталог, фиксированные значения исключены	13.23	1.69	7.77
Каталог без афтершоков, фиксированные значения исключены	13.81	1.69	8.13
Полный каталог, фиксированные значения не исключены	14.12	1.77	8.84
Каталог без афтершоков, фиксированные значения не исключены	15.45	1.62	8.52

глубин, полученных при выполнении томографии (то есть, при параллельном уточнении скоростной модели и глубин землетрясений) показал, что преобладающие глубины также располагаются в верхних 10–15 км, однако, средние глубины для зоны Алтай–Саян меньше, чем для Байкальского рифта, в том числе богаче макросейсмические проявления землетрясений, связанные с выходом разломов на поверхность.

Аппроксимации распределения глубин, предложенные в этой работе, с одной стороны, согласуются с имеющимися представлениями о преобладающих глубинах в регионе, прогнозируя наиболее вероятное значение около 8 км. С другой стороны, примененная методика позволила выделить региональные особенности (для западного региона наиболее вероятное значение глубины — 7 км, для

восточного — 9 км), при этом оба значения расходятся с наиболее распространенным фиксированным значением в 10 км.

В задачах оценки сейсмической опасности и риска от глубины землетрясений существенно зависит ожидаемый эффект воздействия, поэтому моделирование распределения глубины очагов в таких задачах является важной составляющей. До сих пор основным подходом для этого являлись экспертные оценки: распределение глубин считается равномерным в некотором слое с заданными верхней и нижней границами (см., например, работу [Пояснительная записка..., 2016]). Поскольку выбор границ зависит от мнения конкретных экспертов, оценки, основанные на расчетах, обладают очевидным преимуществом. В предложенном здесь подходе распределение глубин также задается двумя параметрами (в данном случае, определяющими распределение Вейбулла), но их значения определены методом максимального правдоподобия. Важным свойством этих оценок является их устойчивость — оценки параметров мало меняются в зависимости от того, включать или исключать фиксированные значения глубин.

С практической точки зрения, например, при генерации синтетического каталога. все рассматриваемые распределения не состоятельны без введения дополнительного ограничения, связанного с высокой вероятностью реализации сильного землетрясения на небольшой глубине. Так, значительное количество очагов землетрясений располагаются в области верхних 15 км. а максимальные возможные магнитуды в регионе превышают M = 7 [Писаренко и др., 2022], что по paботе [Wells, Coppersmith, 1994] соответствует ширине очага вглубь 15 км. Таким образом, чтобы избежать ситуации, при которой очаг моделируемого землетрясения будет большей частью выходить на поверхность (что, в принципе, невозможно), предлагается для всех землетрясений ограничивать глубину гипоцентра половиной ширины очага (downdip rupture width):

 $\Delta h = 10^{-1.01 + 0.32M}/2.$

выводы

В работе показано, что в двух сейсмически активных регионах Южной Сибири – Алтае-Саянском и Байкальском – распределение глубины очагов землетрясений может быть аппроксимировано функцией с двумя параметрами – распределением Вейбулла. Это распределение, как оказалось, в обоих регионах и в их объединении лучше соответствует распределению фактически определенных значений глубины очага по сравнению с другими рассмотренными двухпараметрическими функциями.

Установлено, что максимум распределения аппроксимирующей функции для коровых землетрясений Южной Сибири находится на глубине 8 км (7 км для зоны Алтай—Саяны и 9 км для Байкальского рифта).

Распределение Вейбулла может использоваться для задания глубин событий в модели сейсмического режима в целях оценки сейсмической опасности и риска, например, для генерации синтетического каталога землетрясений. В этом случае целесообразно ограничивать глубину очага сверху оценкой половины ширины очага землетрясения соответствующей магнитуды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 20-17-00180п "Развитие сценарного подхода в задачах оценки сейсмической опасности и риска".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абубакиров И.Р., Павлов В.М. Определение тензора момента двойного диполя для землетрясений Камчатки по волновым формам региональных сейсмических станций // Физика Земли. 2021. №. 3. С. 45–62.

Виноградов Ю.А. Состояние системы сейсмологических наблюдений в России и перспективы ее развития. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. 2023. С. 3.

Землетрясения России в 2021 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2023. 224 с. ISSN 1819-852Х.

Землетрясения Северной Евразии. 2022. Вып. 25 (2016–2017 гг.). 392 с. ISSN 1818–6254.

Кустова М.Г., Радзиминович Н.А. Результаты релокализации гипоцентров афтершоков землетрясения 16.09. 2003 г. с $M_S = 5.8$ с эпицентром на северо-восточном фланге БРЗ. Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований. 2006. С. 24–28.

Лукк А.А., Леонова В.Г. Распределение с глубиной очагов землетрясений как проявление природы деформирования континентальной коры // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19. № 1. С. 30–50.

Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Скоркина А.А., Левина Е.А. Структура сейсмического поля Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2022. № 3. С. 37–55.

Пояснительная записка к комплекту карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР 2016 / В.И. Уломов, М.И. Богданов (ред.) // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122.

Радзиминович Н.А. Глубины очагов землетрясений Байкальского региона: обзор // Физика Земли. 2010. № 3. С. 37–51.

Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Докл. РАН. 2022. Т. 507(1). С.91–97.

Abercrombie R. E., Mori J. Occurrence patterns of foreshocks to large earthquakes in the western United States // Nature. 1996. V. 381. \mathbb{N} 6580. P. 303–307.

Albaric J., Deverchere J., Perrot J., Jakovlev A., Deschamps A. Deep crustal earthquakes in North Tanzania, East Africa: Interplay between tectonic and magmatic processes in an incipient rift // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. V. 15. \mathbb{N} 2. P. 374–394.

Bondár I., Myers S.C., Engdahl E.R., Bergman E.A. Epicentre accuracy based on seismic network criteria // Geophysical Journal International. 2004. V. 156. № 3. P. 483–496.

Cole J., Hacker B., Ratschbacher L., Dolan J., Seward G., Frost E., Frank W. Localized ductile shear below the seismogenic zone: Structural analysis of an exhumed strike-slip fault, Austrian Alps // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. B12304. https://doi.org/10.1029/2007JB004975

Deverchere J., Houdry F., Solonenko N.V., Solonenko A.V., Sankov V.A. Seismicity, active faults and stress field of the North Muya region, Baikal rift: new insights on the rheology of extended continental lithosphere // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 19 895–19 912.

Déverchère J., Petit C., Gileva N., Radziminovitch N., Melnikova V., San'kov V. Depth distribution of earthquakes in the Baikal rift system and its implications for the rheology of the lithosphere // Geophysical Journal International. 2001. V. 146. № 3. P. 714–730.

Doglioni C., Barbab S., Carminatia E., Riguzzi F. Role of the brittle–ductile transition on fault activation // Phys. Earth Planet. Inter. 2011. V. 184. № 3–4. P. 160–171. https://doi. org/10.1016/j.pepi.2010.11.005

Dorbath C., Van der Woerd J., Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Aptekman J.Y. Geological and seismological field observations in the epicentral region of the 27 September 2003 M_w 7.2 Gorny Altay earthquake (Russia) // Bulletin of the Seismological Society of America. 2008. V. 98. No 6. P. 2849–2865.

Doser D.I., Kanamori H. Depth of seismicity in the Imperial Valley region (1977–1983) and its relationship to heat flow, crustal structure and the October 15, 1979, earthquake // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1986. V. 91. \mathbb{N} B1. P. 675–688.

Dragoni M. The brittle-ductile transition in tectonic boundary zones // Ann. di Geofis. 1993. V. XXXVI. \mathbb{N} 2. P. 37–44.

Engdahl E.R., van der Hilst R., Buland R. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination // Bulletin of the Seismological Society of America. 1998. V. 88. \mathbb{N}_{2} 3. P. 722–743.

Gueydan F., Leroy Y.M., Jolivet L., Agard P. Analysis of continental midcrustal strain localization induced by microfracturing and reaction-softening // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № B2. P. 2064. https://doi.org/10.1029/2001JB000611

Handy M.R., Hirth G., Hovius N. Continental fault structure and rheology from the frictional-to-viscous transition downward. Tectonic Faults: Agents of Change on a Dynamic Earth. MIT Press. 2007. P. 139–182.

Kirby S.H. Tectonic stresses in the lithosphere: Constraints provided by the experimental deformation of rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1980. V. 85. № B11. P. 6353–6363.

Klein F.W. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes. US Geological Survey. 2002. №. 2002. p. 171.

Kohlstedt D.L., Evans B., Mackwell S.J. Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1995. V. 100. № B9. P. 17587–17602.

Lahr J.C. HYPOELLIPSE/version 2.0; a computer program for determining local earthquake hydrocentral parameters,

magnitude, and first motion pattern. US Geological Survey. 1989. №. 89-116.

Lienert B.R. HYPOCENTER 3.2. A computer program for locating earthquakes locally, regionally and globally (user's manual). 1994. ftp://elepaio.soest.hawaii.edu

Ma S. Focal depth determination for moderate and small earthquakes by modeling regional depth phases sPg, sPmP, and sPn // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100. \mathbb{N} 3. P. 1073–1088.

Marone C., Scholz C.H. The depth of seismic faulting and the upper transition from stable to unstable slip regimes // Geophysical Research Letters. 1988. V. 15. \mathbb{N} 6. P. 621–624.

Nicholson C., Simpson D.W. Changes in Vp/Vs with depth: Implications for appropriate velocity models, improved earthquake locations, and material properties of the upper crust // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75. № 4. P. 1105–1123.

Radziminovich N.A. Earthquake depth frequency distribution in the Baikal Rift System // Pure and Applied Geophysics. 2022. V. 179. № 2. P. 619–639.

Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // Nature. 1998. V. 391. № 6662. P. 37–42.

Shebalin P., Narteau C. Depth dependent stress revealed by aftershocks // Nature communications. 2017. V. 8. \mathbb{N}_{2} 1. P. 1317.

Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // Geophysical Journal International. 2020. V. 222. I. 2. P. 1264–126913. DOI: 10.1093/gji/ggaa252

Sibson R.H. Fault rocks and fault mechanisms // Journal of the Geological Society. 1977. V. 133. № 3. P. 191–213.

Skorkina A.A. Modeling of strong ground motion within the Baikal Rift Zone: The Irkutsk case. RJES. 2023

Tsai Y. B., Aki K. Precise focal depth determination from amplitude spectra of surface waves // Journal of Geophysical Research. 1970. V. 75. № 29. P. 5729–5744.

Vorobieva I., Gvishiani A., Dzeboev B., Dzeranov B., Barykina Y., Antipova A. Nearest neighbor method for discriminating aftershocks and duplicates when merging earthquake catalogs // Front. Earth Sci. 2022. V. 10. P. 820277. DOI: 10.3389/ feart.2022.820277

Waldhauser F. hypoDD – A program to compute double-difference hypocenter locations (hypoDD version 1.0-03/2001). US Geol. Surv. Open File Rep. 01. 2001. V. 113.

Weber B., Becker J., Hanka W., Heinloo A., Hoffmann M., Kraft T., Thoms H. SeisComP3—Automatic and interactive real time data processing // Geophys. Res. Abstr. 2007. V. 9. N_{0} 09. P. 219.

Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // Journal of applied mechanics. 1951.

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. V. 84. \mathbb{N}_{2} 4. P. 974– 1002.

Characteristic Depth Distribution of Crustal Earthquakes in Southern Siberia

P. A. Malyutin^{*a,b,c,*}*, A. A. Skorkina^{*a*}, I. A. Vorobieva^{*a,d*}, S. V. Baranov^{*a,e*}, S. D. Matochkina^{*a,b*}, A. P. Molokova^{*a,b*}, and P. N. Shebalin^{*a,d*}

^aInstitute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia ^bFaculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^cSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow, 123242 Russia

^dGeophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia

^eKola Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia *e-mail: pavel@mitp.ru

> Received January 14, 2024 revised February 6, 2024 accepted February 13, 2024

Abstract – The key parameters of an earthquake are magnitude, epicenter coordinates, and depth. Depth often has a decisive influence on the macroseismic effect of certain earthquakes. In this regard, for example, to assess seismic risk, one should know information on the statistics of earthquake occurrence at certain depths. In this work, catalogs of continental crustal earthquakes in the Southern Siberia are analyzed. The distributions of earthquake depths are approximated by various functions. The Weibull distribution, with a maximum at 8 km, is shown to describe the depth distribution of these crustal earthquakes most accurately. When the western (Altai–Sayan) and eastern (Baikal Rift Zone) parts of the region are considered separately, the Weibull distribution is also preferable. The maximum of the distribution is found to be at 9 km for the Baikal rift zone and at 7 km for the Altai–Sayan zone.

Keywords: earthquake, depth of an earthquake, hypocenter, Weibull distribution, synthetic earthquake catalog, seismogenic layer