

УДК 550.34.06.013.3

Модель очаговой зоны и глубины коровых сейсмических событий

© 2022 г. А.Г. Епифанский, Л.Г. Дуленцова

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 05.05.2022 г.

Аннотация. На основании анализа станционных невязок и зависимости среднеквадратичной невязки от глубины показана невозможность представить модель очага тектонического корового события в виде непрерывно развивающегося разрыва сплошности материала коры, имеющего начало в одной точке. Показано, что в наборе первых вступлений каждого сейсмического события присутствуют вступления, порождаемые движением сдвига на различных глубинах. Точки, в которых порождаются первые вступления сейсмических волн, выстраиваются в виде некоторых линейных структур в пространстве-времени. Все первые вступления для каждого события приурочены к указанным линейным структурам данного события. Вследствие чего данные структуры названы линиями вспарывания. Скорость распространения разрыва вдоль линий разрыва превышает скорость P -волн. Откуда следует причинно-следственная независимость движений в соседних областях, непосредственно прилегающих друг к другу, порождённых вдоль указанных линейных структур. Линии вспарывания начинаются от свободной поверхности, пересекают кору и продолжают в верхней мантии. Предложена новая модель очаговой зоны, состоящей из набора мелких очагов, которые, в свою очередь, могут быть представлены в виде традиционных очагов. Линии вспарывания в таком случае являются огибающими указанных очагов в пространстве-времени. Данная статья является первой из четырёх частей, описывающих алгоритм и программную реализацию, позволяющие определять глубины коровых сейсмических событий в полностью автоматическом режиме.

Ключевые слова: сейсмическое событие, линия вспарывания, очаговая зона, определение глубины.

Для цитирования: Епифанский А.Г., Дуленцова Л.Г. Модель очаговой зоны и глубины коровых сейсмических событий // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 24–41. DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.02. – EDN: HJAMWX

Введение

Сложности с определением глубин коровых событий известны всем сейсмологам. Вопрос о причинах, вызывающих сложности с определением параметра глубины, до сих пор остаётся без ответа. И в то же время определение глубины событий, источник которых располагается в мантии, например, в зонах субдукции, осложнений не вызывает.

Настоящая работа была проведена с целью выявить причины, мешающие определению глубин коровых событий, и попытаться устранить их. Дополнительным требованием является условие полностью автоматической процедуры определения параметров гипоцентров, что исключает вмешательство оператора на этапе локации.

Объектом исследования является очаговая зона сейсмического события. Инструментом исследования является программа локации.

Методом исследования является детальный анализ процесса и результатов локации коровых тектонических и техногенных событий. В дальнейшем для краткости будем называть зарегистрированное сейсмическое событие просто событием.

Но для начала нам предстоит понять, что, собственно, представляет собой процесс локации, что представляет собой с физической точки зрения гипоцентр события и какие данные являются исходным материалом для определения не только глубины, но и остальных параметров гипоцентра.

Действительно, начало сейсмического события ассоциируется с точкой в пространстве-времени, в которой начинается разрушение материала горной породы. Причём не просто начинается разрушение, а разрушение, связанное с выделением максимальной сейсмической энергии или энергии движения. Мы не ассоциируем

энергию, высвобождающуюся в начале разрушения, с энергией самого события.

Именно начинающееся движение, приводящее в дальнейшем к развитию процесса разрушения, вызывает явление под названием землетрясение. Термин гипоцентр, который также связывают с началом движения, не есть синоним термина фокус. Гипоцентр определяется четырьмя параметрами: абсолютное время и три координаты — широта, долгота и глубина, т.е. является расчётной величиной. Фокус — точка пространства, в которой началось движение берегов разрыва. Фокус всегда принадлежит очагу. Фокус является источником первых вступлений, гипоцентр — некоторой оценкой положения фокуса в пространстве.

Хорошо известно, что исходными данными для процедуры локации, т.е. определения параметров гипоцентров, являются первые вступления сейсмических волн. Сейсмические волны называют фазами, если известен путь распространения данной волны в среде. Фазы, как правило, имеют названия. При локации иногда используются также времена вступления последующих за первыми сейсмических фаз. Здесь именно фаз, поскольку природа данной волны (вступления) должна быть известна.

Следует отметить, что на сейсмограммах сейсмические волны представляют собой колебания, как правило, имеющее полный период. Для использования в процедуре локации используется время максимума амплитуды колебания. Указанные колебания происходят на фоне других колебаний, называемых шумом. Поэтому не всегда удаётся точно измерить время начала колебания (предполагаемое пересечение нулевой линии), что очевидно вносит ошибку в значение времени вступления.

Второе замечание, которое требуется сделать: в качестве первого вступления выбирается не максимальное по амплитуде, а просто первое вступление, превышающее предварительный шум на определённую величину. Таким образом, вступление определяется по динамическому критерию, а время в очаге впоследствии уточняется.

Первые вступления обычно определяют либо оператором (при обработке аналоговых сейсмограмм и визуальном отображении цифровых сейсмограмм) либо в автоматическом режиме обработки цифровых сейсмограмм. В случаях визуальной и автоматической обработки критерием выделения вступления является превышение амплитуды волны над уровнем предыдущего шума. При этой обработке подвергается анали-

зу только одна сейсмическая запись [Кондорская и др., 1981; Акимов, Красилов, 2020].

После определения первых вступлений последние проходят процедуру ассоциации. Процедура ассоциации может также проводиться оператором или автоматически программным инструментом WSG [Акимов, Красилов, 2020].

Как видим, с момента первичной обработки сейсмограмм до начала процедуры локации исходные данные (записи) подвергаются двум стадиям обработки. На первой стадии выделяются первые вступления из записей, и далее записи не используются. На второй стадии первые вступления по значению их времён группируются в наборы, предположительно относящиеся к одному сейсмическому событию.

Вообще говоря, как в случае ручной процедуры ассоциации, так и в случае автоматической, как правило, процедура ассоциации имеет (должна иметь) итерационный характер. Другими словами, операторы или алгоритмы ассоциации несколько раз обращаются к наборам не ассоциированных данных и данных, ассоциированных с каким-либо событием, для уточнения набора ассоциированных вступлений, возврату ошибочно ассоциированных событий в число не ассоциированных и дополнения набора ассоциированных событий новым из числа не ассоциированных. Пересмотр набора ассоциированных событий для одного события может выполняться и выполняется, как правило, после процедуры локации.

Данная статья является первой частью публикации результатов исследования под общим названием «Модель очаговой зоны и глубины коровых событий». В дальнейших публикациях будут рассмотрены вопросы обоснования термина глубина сейсмического события в рамках предлагаемой модели среды, алгоритм дополнительного определения первых вступлений, определения глубин. Кроме того, планируется проанализировать алгоритм и программную реализацию, использованную в данной работе, а также применение разработанных программных средств для анализа техногенных событий, вызванных взрывами.

Следует заметить, что мы не первые, кто предлагает рассматривать сейсмическое событие состоящим из большего числа субочагов. Об этом написано в статье [Brune, 1968], об этом рассуждали Ю.В. Ризниченко [Ризниченко, 1965], Б.В. Костров [Kostrov, Das, 1988]. Об этом же со ссылкой на Б.В. Кострова сказано в работах К. Аки и П. Ричардса [Аки, Ричардс, 1983]. Во всех указанных работах сделаны попытки рассматривать

субочаги распределёнными в некотором объёме. Ю.В. Ризниченко ввёл термин «течение горных масс» для обоснования упорядоченности субочагов. В работе К. Аки и П. Ричардса совокупность субочагов рассматривается в качестве совокупного источника сейсмической энергии в очаговой зоне. То же самое можно сказать и о статье Бруно. Но там речь идёт об оценке площади разрыва в очаговой зоне. Эти и другие результаты послужили основанием для проведения рассматриваемого исследования. И если говорить об источниках идей, лежащих в основе исследования, следует упомянуть работы Б.В. Кострова и С. Даса о вспарывании зацепок (*asperity*) [Das, Aki, 1977; Das, Kostrov, 1983; Das, Kostrov, 1985; Kostrov, Das, 1988] как основной модели субочагов, составляющих очаговую зону.

Алгоритм локации сейсмических событий

Рассмотрим некоторые аспекты алгоритма локации сейсмических событий. В частности, обратим внимание на построение некоторых вычисляемых параметров, на основании значений которых и строится решение.

Одним из показателей для выбраковки каких-либо первых вступлений является большая невязка, величина, определяемая как:

$$r_m = t_m^O - t_m^C, \quad (1)$$

где r_m — станционная невязка или просто невязка, m ($m=1, \dots, M$) — индекс сейсмической фазы, M — число использованных сейсмических фаз. Обращаем внимание: указанный индекс относится именно к сейсмической фазе.

Здесь следует сделать важное для дальнейшего замечание. Наименование «станционная» невязка — не совсем удачный термин. Лучше использовать термин «фазовая» невязка. Хотя этот термин звучит не слишком удобно для чтения, но он лучше передаёт смысл параметра.

Кроме того, для определения глубин коровых событий часто используются так называемые глубинные фазы [Murphy, Barker, 2006]. Однако определение времён вступления глубинных фаз до определения параметров эпицентра тоже представляет собой непростую задачу.

Нас в данной статье будут интересовать только первые вступления.

С началом аналоговой регистрации первичная обработка сейсмических записей в части выделения сигналов о сейсмических событиях происходила на сейсмических станциях. Результаты — вступления сейсмических волн,

снятые с сейсмограмм, — пересылались в центры обработки. Следует обратить внимание, что в это время с сейсмограмм «снимались» не только первые, но и некоторые последующие вступления.

В центрах обработки полученные с сейсмических станций сообщения обрабатывались — происходила их предварительная ассоциация с предполагаемыми сейсмическими событиями. Процедура выполнялась вручную.

Отметим, что в начале «эры» автоматической цифровой обработки в процедуре локации использовались только времена первых вступлений и координаты станций, их зарегистрировавших [Акимов, Красилов, 2020].

Очевидно, что количество исходных данных в начале появления автоматической локации было намного большим, чем искомое число параметров. Указанные выше четыре параметра определяются по данным первых вступлений M , которых намного больше. С математической точки зрения, задача локации является переопределённой [Епифанский, 1983].

Основной процедурой решения задачи вычисления параметров гипоцентра являлся метод градиентного спуска. Термин «градиентный спуск» происходил из задачи поиска точки в пространстве-времени, для которой некоторая величина, являющаяся целевой функцией задачи, достигла минимума. Процедура градиентного спуска заключалась в определении в пространстве направления изменения координат предполагаемого решения в зависимости от величины невязки, которое уменьшает значение целевой функции. В качестве целевой функции при решении переопределённой системы условных уравнений методом Коши используется величина среднеквадратичной невязки [Епифанский, 1983].

Следует заметить, что метод Коши применяется для поиска только координат, переменными при этом являются невязки (1). Время происхождения события — время в очаге — определяется отдельно.

Целевая функция в программах локации имеет вид:

$$R = \frac{1}{M - n} \sqrt{\sum_{m=1}^M r_m^2}, \quad (2)$$

где R — среднеквадратичная невязка, n — число степеней свободы или, что то же, число определяемых в процедуре параметров, r_m — станционная невязка, $m=(1, \dots, M)$ — индекс станции.

Большинство программных реализаций алгоритмов локации телесеизмических событий

основано на описанных алгоритмах решения переопределённых задач. Хотя имеется и существенное отличие. При решении переопределённой задачи ищется точка в пространстве-времени, которая соответствует минимальному значению целевой функции. При этом каждое первое вступление, как отмечено выше, может иметь ошибку измерения.

И снова следует заметить, что разность наблюдаемого и теоретического времени вступления не может интерпретироваться как ошибка. Другими словами, формула (1) в уточнённом виде выглядит так:

$$t_m = t_m^0 - t_m^C + \varepsilon_m, \quad (1')$$

где ε_m – ошибка измерения вступления фазы m .

Иногда указанные ошибки оказываются слишком большими. В этом случае данные с большими ошибками тем или иным способом изымаются из счёта или их влияние на решение уменьшается. Способом ослабления влияния данных с большими ошибками на окончательное решение и отличается большинство программных реализаций задач локации телесейсмических событий.

Большие значения невязок, согласно (1'), могут вызывать ошибки измерения, а могут быть результатом отклонения аргументов теоретического времени запаздывания:

$$t_m^C = t_m^C(D, h), \quad (3)$$

где D – эпицентральный расстояние, h – глубина очага. Зависимость функции в выражении (3) от значения её аргументов полностью определяется годографом.

В силу (3) можно переписать выражение для параметра $R(2)$ в виде:

$$R(h) = \frac{1}{M - n} \sqrt{\sum_{m=1}^M r_m^2(D, h)}, \quad (4)$$

где $r_m(D, h) = r(D_m, h)$ есть

$$r(D_m, h) = t_m^0 - t_m^C(D_m, h) + \varepsilon_m, \quad (5)$$

а величина D_m – эпицентральный расстояние от фокуса очага до станции m , h – глубина гипоцентра.

Процедуры локации, как правило, позволяют задавать в качестве начального значения координат нулевые значения. При этом, когда координаты пробного гипоцентра далеки от окончательного решения, невязки будут иметь боль-

шое значение. Но на самом деле, согласно (1'), это большое значение получается от неверного значения аргументов выражения $t_m^C(D, h)$, они далеки от окончательного значения, которое будет получено в результате вычислений. Это и означает, что невязка является рабочей переменной в вычислениях. При этом ошибка измерения остаётся величиной постоянной.

Тем не менее, в большинстве реализаций именно невязка подвергается дискриминации по признаку большой (абсолютного значения) величины, как описано выше. И в этом вопросе нам предстоит разобраться [Flinn, 1965].

В используемый в данной работе инструмент (программная реализация алгоритма LSE v.5) были внесены изменения по сравнению с ранее использовавшимися реализациями, что позволило увеличить устойчивость процедуры локации. Дело в том, что результат применяемого уже более полувека метод градиентного спуска зависит от начального приближения. Это выражается, в частности, в том, что если, как указано выше, начальным приближением являются нулевые значения параметров или какие-нибудь другие, но постоянно используемые значения, то и результаты пересчёта параметров гипоцентра оказываются с достаточной степенью точности близкими. Однако, если в качестве начального приближения выбирать произвольный набор значений, то и результаты повторных вычислений оказываются различными. Более того, чем ближе начальное приближение к окончательному решению, тем величина разброса оказывается больше.

Внесённые в инструмент локации изменения не требуют вычисления производных при определении очередного шага в процессе итераций. Это главное отличие от метода градиентного спуска. Указанные изменения увеличивают время вычисления, но делают процесс сходимости решения более гладким. Метод, применяемый в данной работе, называется симплекс-метод. В дальнейшем все модификации, введённые в программу, будут подробно описаны. Здесь заметим, что применяемая программная реализация процедуры локации позволяет достигнуть точности при задании в качестве начального приближения уже окончательно посчитанных координат гипоцентра по времени 10^{-4} с и по координатам 10^{-5} угловых градусов. Следует отметить, что указанная «точность» определяет точность расчётов, а не точность определения координат гипоцентра. Указанная точность достигается только при условии постоянства набора первых вступлений и для любого нулевого приближения

гипоцентра. Напомним, что часто применяемая процедура браковки данных из-за больших невязок является процедурой, изменяющей набор первых вступлений.

Глубина в методике исследования, применённой в данной работе, задаётся константой для каждого расчёта параметров гипоцентра. Тем не менее, точность вычисления глубины, если таковая потребуется, составляет не ниже пересчитанной в метры точности координат. Отметим, что точность угловых градусов для координат в пересчёте на метры составляет величину порядка одного метра (1.119 м).

Авторы считают, что одновременный расчёт координат и глубины – трудно реализуемая вычислительная процедура из-за разницы в единицах представления значений переменных: координаты в вычислительных процедурах используются в угловых градусах, в то время как глубины – в метрах. Поэтому алгоритмы построены таким образом, чтобы вычисления координат и глубин производились отдельно: сначала для заданной глубины вычисляются координаты, затем изменяется глубина и процедура вычисления координат повторяется до достижения необходимой точности по величине шага среднеквадратичной невязки (2) итерационным методом.

Модель очаговой зоны и очаг сейсмического события

Рассмотрим теперь модель очага для того, чтобы понять, откуда берутся первые вступления и как с ними работает процедура локации не в математическом, а в физическом смысле.

Изначально существовало представление очага как начинающегося в точке процесса разрушения материала Земли и развивающегося по некоторой поверхности, что и приводит в результате к землетрясению. При этом всегда считалось, что все точки указанного разрыва связаны напрямую причинно-следственной связью. Другими словами, разрушение, происходящее в каждой заданной точке, возможно только в том случае, если есть набор уже разрушенных точек, образующих сплошную линию между заданной и начальной точкой. И начальная точка единственна [Аптекман и др., 1989].

Данное представление чрезвычайно схематично и не объясняет происхождения землетрясения как физического явления. Но указывает, что все первые вступления данного сейсмического события порождены излучением из указанной единственной точки.

Указанная модель до сих пор является основной для построения алгоритмов и программных реализаций процедур локации. В работе Д.А. Сторчака [Storchak, 2011], посвящённой достижениям в части увеличения точности локации сейсмических событий, неявно присутствует всё то же представление об очаге.

В результате проведённой работы оказалось, что представление очага в виде развивающегося из точки разрыва, причём единственного разрыва, для коровых событий неверно.

Объект исследования

По причине, высказанной выше, мы понятие очага разбили на два термина: очаговая зона, т.е. зона, где происходит взаимное перемещение участков материала коры и верхней мантии (берегов разрыва), и сами очаги. Очаг или очаги мы здесь понимаем как нарушение сплошности материала земли в результате разрушении неровностей берегов при их взаимном перемещении. Это обсуждается достаточно подробно в работе [Kostrov, Das, 1988]. Сам разрыв в рассматриваемой модели состоит из большого числа мелких, по сравнению с размером очаговой зоной, очагов (субочагов) разрывов. Каждый очаг порождает свой набор первых вступлений, которые формируют начальную часть сейсмограмм, регистрируемых сейсмическими приборами.

Основанием для такой модели является ниже отмечаемый факт высокой скорости развития разрушения материала земли вдоль очаговой зоны, которая превышает скорость продольных волн. Дополнительным подтверждением предлагаемой модели является факт наличия среди набора первых вступлений таких, которые имеют минимум невязки на глубинах, распределённых по всей толщине коры и верхней мантии. Последнее вообще требует отдельного исследования.

Несмотря на кажущуюся независимость первых вступлений, порождаемых на различных глубинах, все они оказываются расположены по времени и глубине на линиях, показанных на рис. 1 (отображённые линии являются проекциями на плоскость время-глубина огибающих, рассчитанных через 250 м по глубине гипоцентров для каждого рассматриваемого сейсмического события). Это свидетельствует об их связи через ненарушенный материал двигающихся тектонических плит, что, собственно говоря, и вызывает разрыв горных пород в месте соприкосновения движущихся с разной скоростью плит.

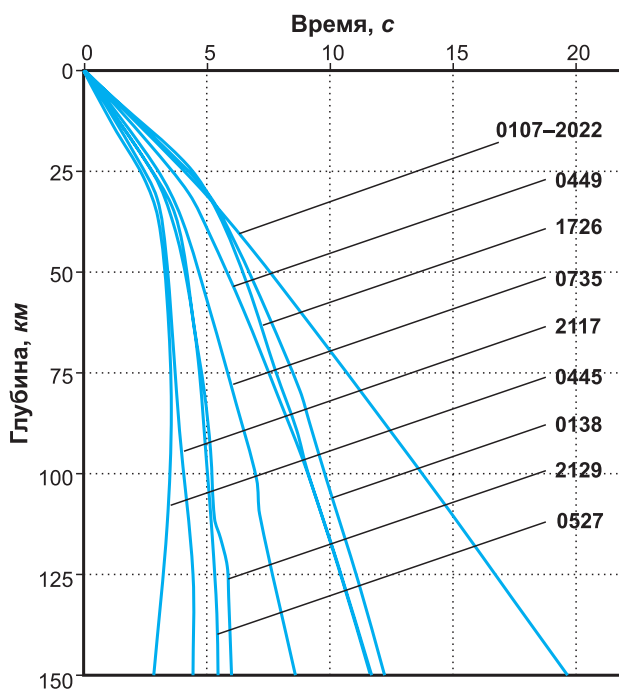


Рис. 1. Сводный график относительных времён в очаге для всех событий.

Справа указаны коды использованных событий. Все события, упомянутые в статье, представлены в табл. 1

Таблица 1. Код события и соответствующий ему регион с параметрами землетрясения, определёнными в Службе срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН

Код	Регион Дата, дд.мм.гггг	Время в очаге, чч:мм:сс	φ , °N	λ , °E	h , км	m_b/MS
0107-2022	Цинхай, Китай 07.01.2022	17:45:31	37.84	101.35	10	$m_b=6.5$ $MS=6.9$
0449	Восточный Кавказ 04.09.2015	04:49:39	41.15	47.50	15	$m_b=5.6$ $MS=5.1$
1726	Восточный Кавказ 29.06.2014	17:26:09	41.62	46.75	10	$m_b=5.5$ $MS=4.9$
0735	Восточный Кавказ 10.08.2019	07:35:12	41.83	46.79	10	$m_b=5.2$
2117	Восточный Кавказ 13.05.2016	21:17:47	43.16	46.49	63	$m_b=5.4$ $MS=3.7$
0445	Восточный Кавказ 20.10.2021	04:45:42	43.10	45.53	10	$m_b=4.9$ $MS=3.9$
0138	Восточный Кавказ 29.09.2014	01:38:11	41.44	48.08	21	$m_b=5.6$ $MS=5.0$
2129	Восточный Кавказ 12.12.2020	21:29:50	43.08	45.52	10	$m_b=4.7$ $MS=4.1$
0527	Каспийское море 07.06.2019	05:27:14	42.24	48.98	78	$m_b=4.6$

На основе анализа изменения станционных невязок по глубине мы приходим к выводу, что очаг корового сейсмического события распадается на несколько отдельных очагов, каждый из которых может быть представлен своим фокусом.

Ниже приводится доказательство высказанного утверждения на основе анализа поведения с глубиной среднеквадратичной невязки для каждого события, а также станционных невязок.

Таким образом, мы можем сформулировать понятие объект исследования, которым является очаговая зона, движения в которой и порождают явление землетрясения.

Линии, отображённые на рис. 1, представляют относительные времена в очаге для каждого сейсмического события. Кроме относительных времён в очаге аналогично можно построить графики для относительных координат. На рис. 2 представлены графики относительных координат для события 7 января 2022 года.

Такие же графики можно построить для каждого обработанного события. Мы не приводим такие графики за исключением двух случаев по той причине, что мы не будем ссылаться на них. Тем не менее, кривые на графиках относительных величин времени в очаге и координат представляют собой четырёхмерную кривую в пространстве-времени. Всюду в дальнейшем, когда мы будем указывать зависимость какого-либо параметра от глубины, мы подразумеваем значение параметра вдоль этой четырёхмерной кривой.

Ниже мы рассмотрим физический смысл этой кривой.

Метод исследования

Предварительно сделаем некоторые замечания по методике проведённого исследования.

В данной работе основой технологии обработки данных являлось сканирование по глубинам

в заданном интервале глубин от нуля до 150 км с шагом по глубине от 100 до 250 м. Выбор максимальной глубины был сделан, чтобы иметь более полное представление о зоне перехода от коры к верхней мантии, тем более, что граница перехода зависит от географического положения эпицентра.

Сканирование по глубине не является чем-то новым. Часто в целях определения поведения результатов расчёта в некоторой окрестности решения прибегают к указанной процедуре. Новое заключается в том, что мы рассматриваем интервал сканирования в сотни километров, а шаг порядка сотни метров. В этом случае нам удастся выделить малые изменения параметров решения на достаточно большой базе с высокой точностью.

На этом основано требование, предъявляемое к программе локации в рамках данного исследования, а именно устойчивость расчётов при малых изменениях начальных параметров.

При всяком вариационном методе поиска решения, а локация относится к таким методам, основным критерием устойчивости являются малые вариации решения при малых изменениях входных параметров.

Упомянутый выше критерий состоит в том, что при малом изменении начального значения какого-либо параметра начального положения гипоцентра рассчитанные значения параметров гипоцентра будут отличаться на малую величину

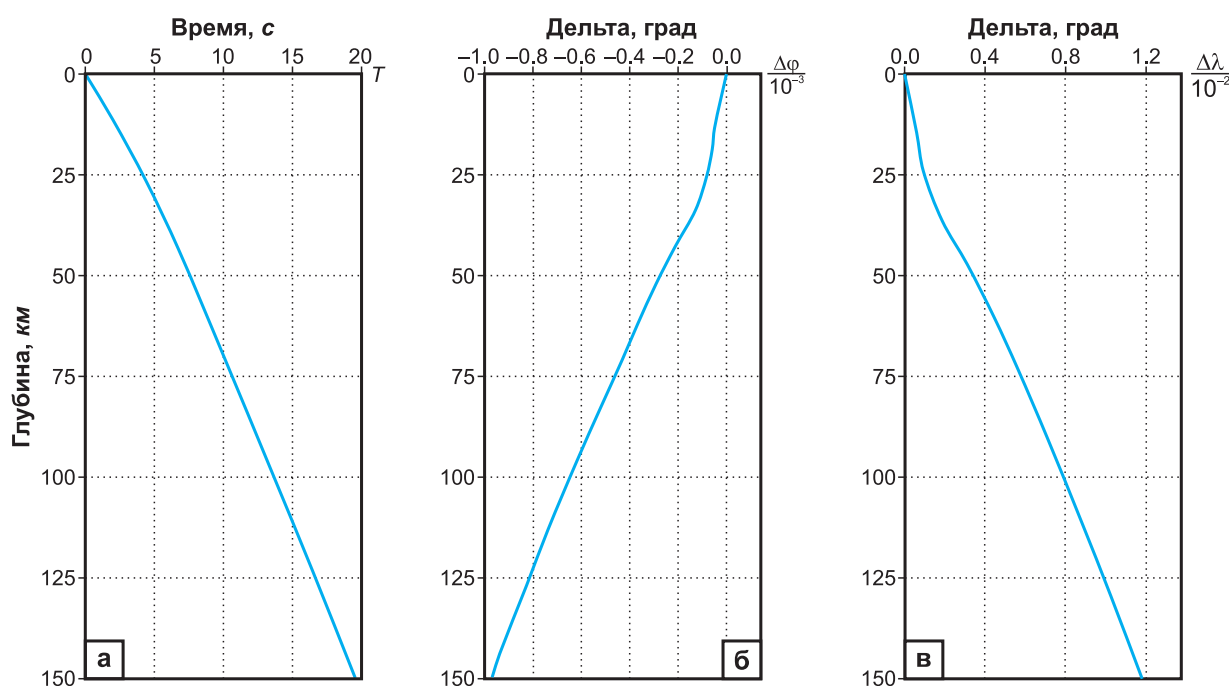


Рис. 2. Относительные координаты сканирования по глубине для события в Китае 7 января 2022 г.: а – время в очаге; б – широта; в – долгота

каждый. В пределе, при задании в качестве начальных значений уже рассчитанного гипоцентра, мы получаем в результате расчёта те же самые значения с заранее заданной точностью.

На рис. 2 представлены два варианта разностей времён в очаге гипоцентров на заданной и нулевой глубине при сканировании по глубине. На рисунке представлены две кривые — с использованием симплекс-метода (а) и без (б). Кривые получены при обработке данных (вычислении координат гипоцентров) для недавнего сейсмического события в Китае 7 января 2022 года.

Для удобства сравнения результатов различных параметров гипоцентров при сканировании по глубине на графиках строятся не абсолютные значения, а относительные, получаемые при вычитании значения соответствующего параметра на нулевой глубине. Графики так построенных величин далее называются относительными.

На рис. 3 отчётливо видны скачки времени в очаге для некоторых глубин — кривая б. Применение симплекс-метода позволяет добиться гладкости кривой.

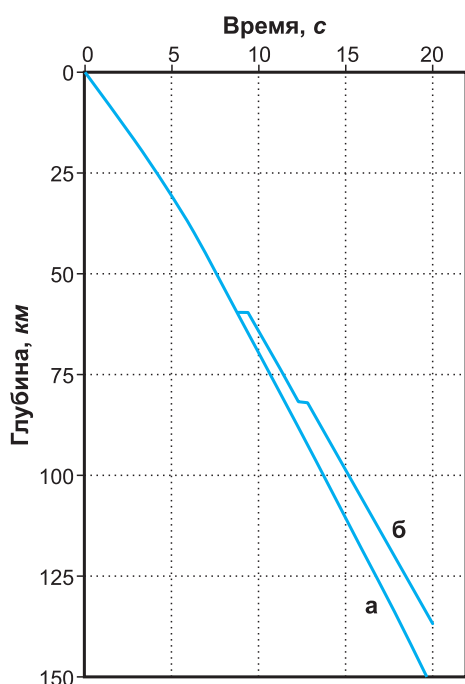


Рис. 3. Линия относительного времени в очаге для набора глубин от 0 до 150 км с шагом 250 м: а — с применением симплекс-метода; б — без применения симплекс-метода.

Событие 7 января 2022 г. в Китае

На рис. 4 представлены графики среднеквадратичной невязки в зависимости от глубины. На графиках также видны скачки нарушения гладкости, но более отчётливо, чем на рис. 3. Глуби-

ны, на которых происходят нарушения гладкости, совпадают с глубинами скачков на рис. 3.

На рис. 4 видна разница в применении симплекс-метода и нарушении устойчивости счёта без использования симплекс-метода. Далее все результаты расчётов параметров гипоцентров получены с использованием симплекс-метода за завершающей стадии расчёта.

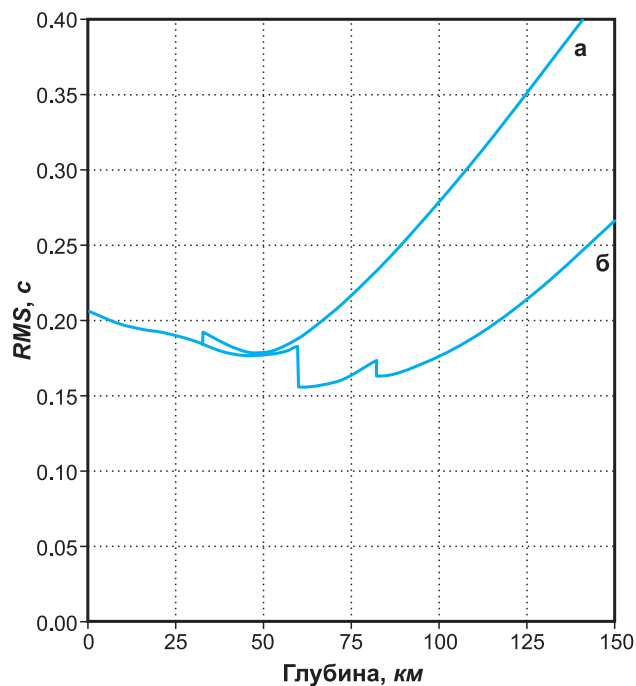


Рис. 4. Графики зависимости среднеквадратичной невязки от глубины для события 7 января 2022 г. в Китае: а — с применением симплекс-метода, б — без применения симплекс-метода

Анализ результатов обработки реальных событий

На рис. 1 представлен график, показывающий изменение относительного времени в очаге по глубине для каждого события.

Далее в большинстве случаев мы будем представлять некоторые графики не в абсолютных значениях параметров, а в относительных. А именно, в виде разности значений параметра на заданной и нулевой глубине. Такое представление позволяет сравнивать результаты для различных событий, отображая их на одном графике.

Показанный результат на рис. 3 (а) для события 7 января 2022 г. в Китае представляет зависимость времени в очаге от глубины. В результате мы имеем гладкую кривую. Возникает вопрос — это случайный или закономерный результат. Кроме того, вопрос — как следует интерпретировать происхождение указанной особенности,

если оказывается, что результат закономерен. Рассмотрением этих вопросов мы сейчас и займёмся.

Графики относительных координат гипоцентров аналогично графику относительного времени в очаге представляют достаточно гладкие кривые.

На рис. 2 (а, б, в) представлены относительные время в очаге (а), координаты широты (б) и долготы (в) для события 7 января 2022 года. Графики представляют распространение во времени и пространстве гипоцентров в зависимости от глубины. Как видно, с глубиной изменяются все три оставшиеся координаты. То есть представленная линия – четырёхмерный объект в пространстве-времени.

Из графиков видно, что для каждого события повторяется общая закономерность изменения относительного времени в очаге от глубины. В то же время каждое событие имеет свои индивидуальные отклонения. Аналогичные отклонения от общей закономерности наблюдаются и для пространственных координат.

Здесь следует задаться вопросом – что собой представляют с физической точки зрения указанные четырёхмерные кривые.

Кривые на рис. 1 получены локацией гипоцентров выбранных событий. В каждом случае использовались одни и те же наборы первых времён вступления для всех глубин.

При этом в качестве исходных данных использовались только первые вступления сейсмических волн, которые были получены из уже опубликованных данных Службы срочных донесений (ССД) ФИЦ ЕГС РАН. Для события 7 января 2022 г. использовались данные СТВО в Вене.

Таким образом следует признать, что указанные выше закономерности поведения приведённых кривых относительных времён в очаге рассмотренных сейсмических событий заложены в самих данных о первых вступлениях.

Заметим, что при анализе поведения невязок, как фазовых, так и среднеквадратичных, мы рассматриваем их значения на указанных четырёхмерных кривых.

Зависимость среднеквадратичной невязки от глубины

Дальше мы рассмотрим, как изменяется основной параметр – среднеквадратичная невязка (параметр $R(h)$) – в зависимости от глубины. Результаты, представленные на графиках рис. 5, 6, 7 и 8, разбиты на две группы. На рис. 5

и 6 представлены события, для которых правая и левая ветви графика относительно минимума представляют собой монотонные функции. Графики на рис. 7 и 8 представляют зависимости.

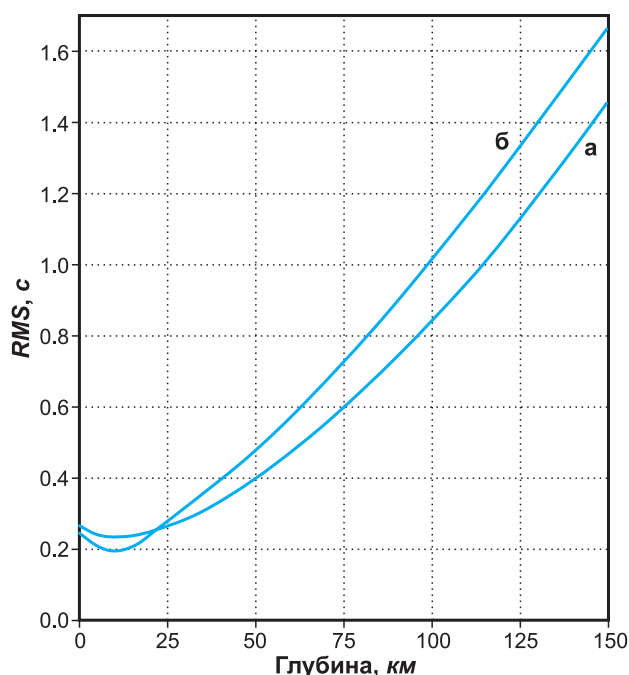


Рис. 5. Графики среднеквадратичных невязок для двух событий, произошедших в одном месте (табл. 1): а – 2129; б – 0445

В начале статьи указано, что традиционная модель очага тектонического события предполагает единственную глубину начала движения в очаге. Если придерживаться указанной модели, то все времена в очаге должны указывать на эту единственную глубину. Конечно, во временах вступления могут содержаться и действительно, как показывает анализ, содержатся ошибки (1'). Из выражений (1) и (1') с учётом выражения (3) мы видим, что каждая стационарная невязка достигает минимума при совпадении глубины h с той глубиной, на которой была порождена соответствующая волна.

В заданной геометрии расположения станции и гипоцентра, если изменяемой величиной является только глубина, то, согласно годографу, с увеличением глубины время распространения возмущения от очага до регистрирующего сенсора на телесеизмических расстояниях монотонно уменьшается. Отсюда следует, что если положить в выражении (1') $\epsilon=0$, то при достижении значения глубины, на которой данное возмущение было эмитировано, значение невязки должно равняться нулю. Назовём эту глубину истинной для данного вступления. Если наше предположение

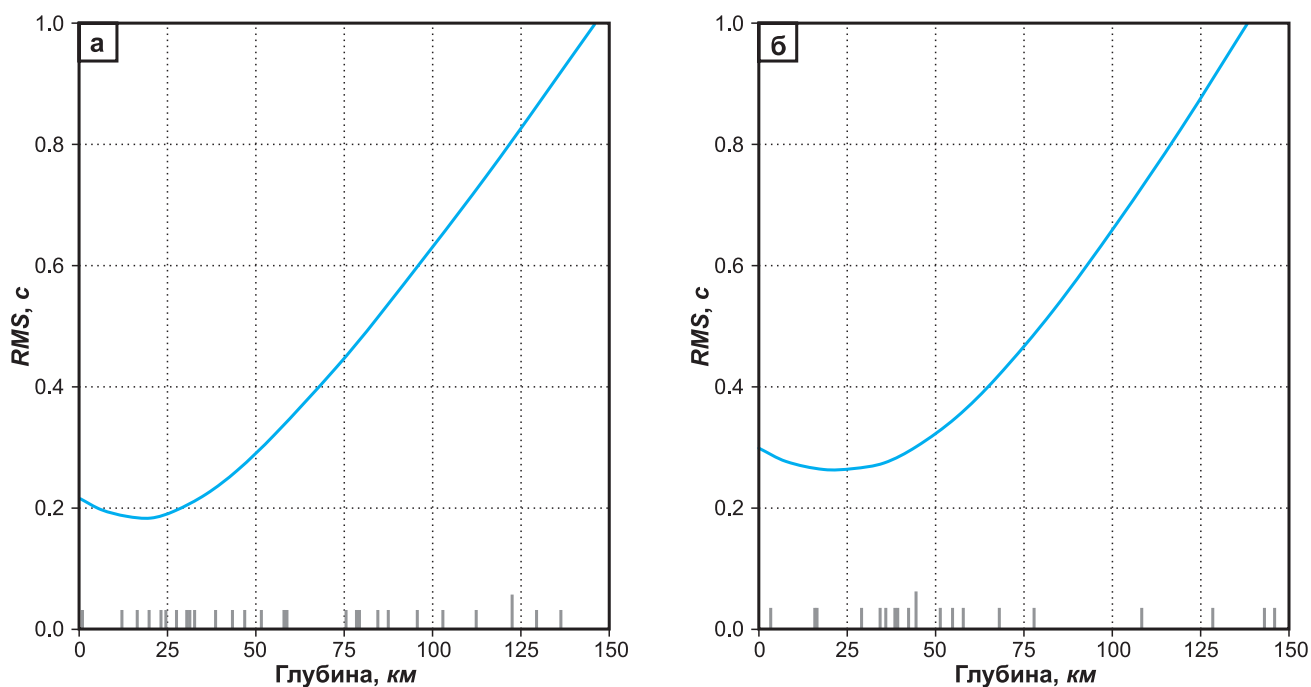


Рис. 6. График среднеквадратичной невязки по глубине для событий (табл. 1): а – 0138; б – 0449.

Вдоль оси глубин нанесены марки на тех глубинах, на которых стационарные невязки обращаются в ноль

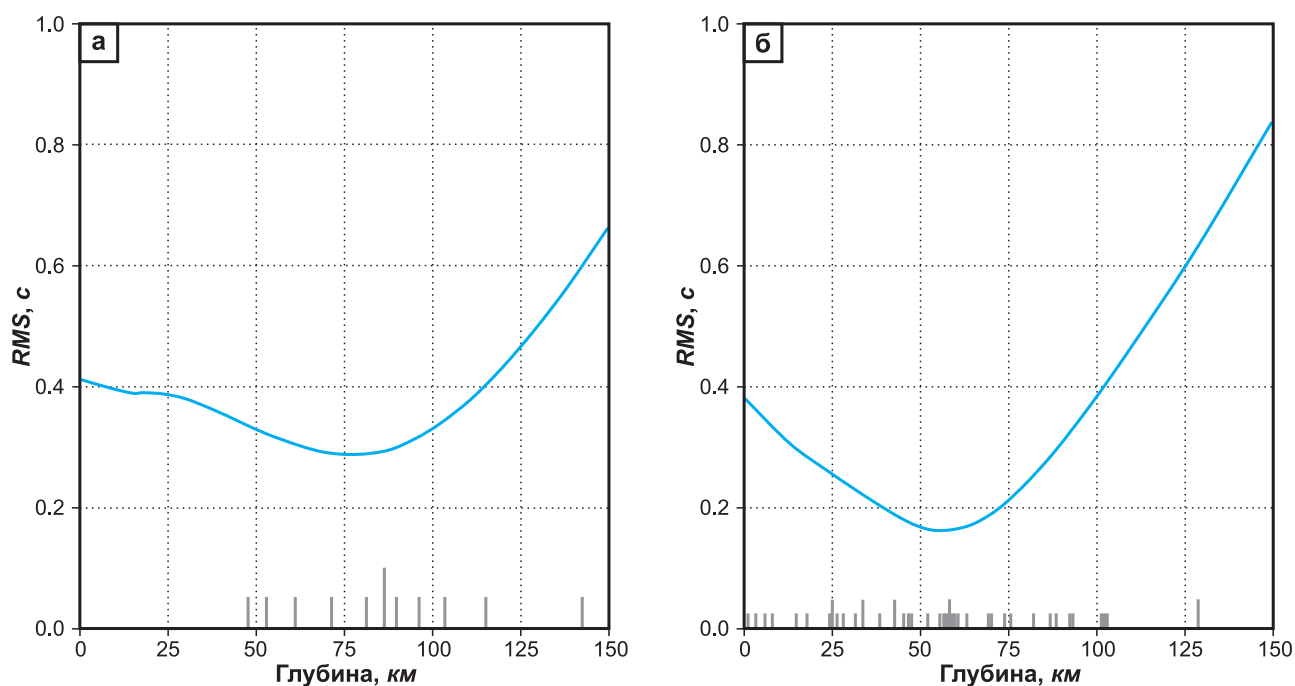


Рис. 7. График среднеквадратичной невязки по глубине для событий (табл. 1): а – 0527; б – 2117.

Вдоль оси глубин нанесены марки на тех глубинах, на которых стационарные невязки обращаются в ноль

относительно ошибки не выполнено, то пересечение значения стационарной невязки нулевого уровня будет смещено относительно истинного значения глубины.

Следовательно, с учётом эпицентрального расстояния D_m для каждой станции среднеква-

дратичная невязка будет достигать минимума, указывая на глубину корового землетрясения.

Напомним, что приведённые рассуждения были сделаны в предположении единственной глубины источника, зарегистрированного всеми первыми вступлениями.

Рассмотрим теперь поведение значения выражения для среднеквадратичной невязки (4).

В предположении, что:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon_m = 0 \\ r_m(h_0) = 0 \end{array} \right\} m = (1, \dots, M), \quad (6)$$

среднеквадратичная невязка в форме (4) принимает значение $R=0$ при истинной глубине. Обозначим её как h_0 . Зависимость среднеквадратичной невязки от глубины можно представить в виде:

$$R(h) = a \cdot |(h - h_0)|, \quad (7)$$

где величина a — некоторая константа. Таким образом мы видим, что в идеальном случае отсутствия ошибок в стационарных невязках (6), график величины $R(h)$ представляет собой две линейные положительно определённые функции, совпадающие при значении глубины $h=h_0$.

Нетрудно видеть, что из-за положительной определённости $R(h)$, при нарушении условия (6) вместо выражения (7) мы получим для графика параметра $R(h)$ некоторое подобие параболы. Термин «подобие параболы» связан с тем, что функция (7) при нарушении обоих условий (6) не имеет никакого отношения к параболе, а только выглядит похожей. Подчёркнём, что это верно для случая, когда модель очага представляется разрывом, распространяющимся из одной точки.

Величина $t_m^c(D, h)$ ($m = 1, \dots, M$) не является линейной функцией по аргументу h . Кроме того, это не будет симметричная функция относительно вертикальной оси, проведённой через точку h_0 . Но отклонение от монотонности и отмеченная несимметричность будут величинами малы ввиду слабой зависимости отклонения значений годографа от прямой линии по глубине. А в силу монотонности указанных отклонений значений годографа, ветви «подобной параболы» функции будут также монотонны.

На рис. 5 представлены графики среднеквадратичных невязок в зависимости от глубины двух кавказских событий, произошедших в одном месте. На графиках видны описанные выше особенности параметра R по глубине. То же самое можно сказать о кривых $R(h)$ на графиках рис. 6.

Заметим, мы получили демонстрируемые на графиках зависимости параметра $R(h)$, используя, хотя и модифицированный, алгоритм локализации, которым пользуется большинство сейсмологических агентств при расчётах параметров

гипоцентров только по временам первых вступлений. Времена первых вступлений доступны каждому на сайтах соответствующих служб.

Графики на рис. 5 и 6 — гладкие без каких-либо дополнительных деталей.

На графиках рис. 7 и 8 отчётливо видны локальные минимумы. В некоторых случаях локальные минимумы отчётливо присутствуют на графиках, иногда только слегка намечаются нарушением общего хода кривой.

В начале применения компьютеров для локализации наличие локальных минимумов являлось артефактом по мнению большинства сейсмологов, так же, как и разработчиков алгоритмов. Артефактами локальные минимумы объявлялись по причине того, что их физическое существование противоречит гипотезе очага с единственной глубиной. И это тем более удивительно, что гипотеза об очаге с единственной глубиной излучения сигнала всё это время оставалась гипотезой. А локальные минимумы являлись наблюдаемыми фактами [Луанкаре, 2018]. Очень много усилий было затрачено на поиск математического обоснования и алгоритмического решения, позволяющего исправить отмеченное несоответствие между гипотезой и наблюдаемыми фактами [Engdahl et al., 1998].

Значение фазовых невязок в зависимости от глубины

В начале статьи мы рассмотрели, какие зависимости теоретически могут иметь среднеквадратичные и фазовые невязки по глубине.

Мы видим, что кроме ожидаемых зависимостей параметра $R(h)$ — монотонного изменения с глубиной и одним минимумом — иногда присутствуют и нарушения монотонности. Мы их интерпретировали как локальные минимумы. Но локальные минимумы могут существовать на графиках зависимости параметров $R(h)$ только в том случае, если среди первых вступлений присутствует некоторое количество порождённых на отличной от основного минимума глубине.

Действительно, математические выражения (1) и (1') для невязок ясно показывают, что последние при изменении фиксированной глубины гипоцентра могут меняться чрезвычайно слабо в силу слабого отклонения от линейности времён запаздывания с глубиной. А минимум невязок может соответствовать только той глубине, на которой был порождён соответствующий импульс первого вступления, в условиях, когда определения ошибки времени первых вступлений $\varepsilon_m=0$, чего ожидать сложно.

В данном разделе мы рассмотрим, какова в действительности зависимость невязок от глубины. Как часто различные невязки одного и того же события имеют различные глубины, на которых они принимают нулевое значение.

В табл. 2 приведены значения фазовых невязок для пяти станций для шести глубин, более или менее равномерно расположенных в заданном диапазоне. Это землетрясение, которое произошло в Китае 7 января 2022 года.

На рис. 8 представлен график зависимости параметра $R(h)$ для того же события. Кроме того, на оси абсцисс нанесены марки, которые соответствуют глубинам, на которых соответствующие невязки принимают нулевые значения.

Очевидно, смена знака есть признак того, что при некотором значении глубины модуль значе-

ния невязки обращается в ноль. Другими словами, данные этой станции указывают на значение глубины, на которой возмущение, зарегистрированное данной станцией, было порождено. Из графика видно, что большинство смен знака не совпадает со значением глубины, при которой параметр $R(h)$ достигает минимума.

Число станций, для которых невязки меняют свой знак, меньше, чем общее число станций, использованных в счёте.

Среди приведённых в табл. 2 результатов присутствуют три типа зависимостей невязок от глубины:

- увеличение значения невязок с глубиной;
- уменьшение значения невязок с глубиной;
- наличие минимума в середине интервала глубин (в таблице помечены цветом).

Таблица 2. Распределение фазовых невязок по глубине

Код станции	Время вступления, чч:мм:сс.ссс	Азимут (событие–станция)	Глубина, км					
			5.0	18.5	45.0	75.0	105.0	135.0
ААК	17:50:15.841	290	0.069	-0.109	-0.617	-1.330	-2.032	-2.740
КІR	17:50:52.823	53	0.194	0.153	0.050	-0.090	-0.244	-0.396
ОВN	17:53:53.827	313	-0.743	-0.689	-0.508	-0.251	-0.010	0.228
МА2	17:52:49.571	39	0.662	0.704	0.847	1.059	1.234	1.406
КВZ	17:53:37.794	296	0.207	0.200	0.150	0.084	0.044	0.016

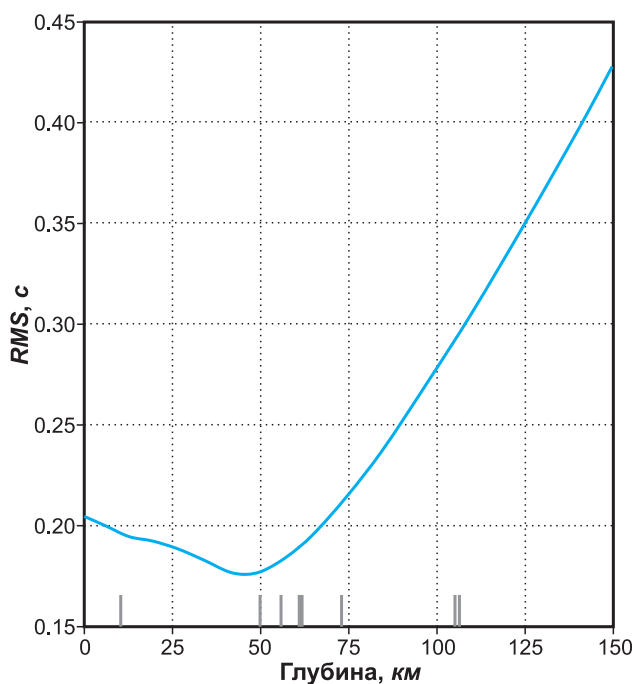


Рис. 8. График среднеквадратичной невязки по глубине для события в Китае 7 января 2022 г.

Дополнительно вдоль оси глубин нанесены марки на тех глубинах, на которых станционные невязки обращаются в ноль

В табл. 2 приведены три станции из восьми (выделены жёлтым цветом), принимающих нулевые значения в исследуемом интервале. Станции выбраны так, чтобы представить различные варианты зависимостей. На рис. 8 марки соответствуют всем восьми станциям. Представленные результаты находятся в полном соответствии с выражениями (1) или (1').

Обратимся теперь снова к рис. 6 и 7, к той их части, где проставлены марки, соответствующие пересечению значениями невязок нулевой линии. Из графиков видно, что в районе расположения минимума функции $R(h)$ в представлении (4) наблюдается сгущение марок. Сгущение марок, очевидно, соответствует минимуму функции $R(h)$ по глубине на рис. 6а, но оказывается смещено на рис. 6б и нарушается на рис. 7а и 7б. Вообще говоря, отмеченное совпадение обладает слабой устойчивостью. Нельзя утверждать, что оно случайно, но выбрать его в качестве критерия глубины тоже нет основания.

Минимум невязок может соответствовать только той глубине, на которой был порождён соответствующий импульс первого вступления, но в условиях, когда ошибки определения времени первых вступлений близки к нулю, чего при обработке реальных данных ожидать сложно.

Вообще следует заметить, что наличие ошибок смещает глубину, при которой невязка обращается в ноль. И это, как показано в следующем разделе, связано с зависимостями времён вступления от глубины, показанным на графиках рис. 1.

Тем не менее, результаты, приведённые выше в таблице распределения невязок (здесь именно невязок, а не ошибок), и распределение марок на глубинах, где невязки обращаются в ноль, однозначно свидетельствуют о наличии первых вступлений, порождённых первыми движениями в очаговой зоне на различных глубинах.

Линия вспарывания и её физический смысл

Рассмотрим теперь, что же собой представляет линия, образуемая временами в очаге при сканировании гипоцентров по глубине.

Как мы указывали ранее, все графики, которые построены по глубине, строились для времён в очаге, координат и глубин, соответствующих рассчитанным значениям параметров гипоцентров. Другими словами, соответствовали минимуму невязок для заданных глубин. И это крайне важно.

Если вернуться к разбору алгоритмов процедуры локации, в нём было декларировано и уже более полувека эксплуатируется положение, что

минимум невязки нивелирует ошибки измерения времён первых вступлений, которые являются входными данными для вычислительной процедуры.

Повторимся, в случае, когда модель очаговой зоны предполагает, что очаговая зона содержит один очаг, развивающийся из одной точки, минимум параметра $R(D_m, h)$ также должен иметь единственный минимум. И никакой линии, никакого направления в пространстве, вдоль которых выстраиваются локальные минимумы в зависимости от данного параметра, быть не может. Следовательно, величины ошибок ε_m являются строго скалярными величинами. Возникает вопрос: что даёт нам в качестве модели неопределённости (uncertainty) параметров гипоцентра возможность строить эллипсоид ошибок. Это противоречит заключению о скалярности величины ошибок ε_m — эллипсоид ошибок в этом случае есть «разложение» параметров ε_m по трём координатам: двум географическим и глубине.

Однако, как мы видели выше, вместо некоторого распределения ошибок параметров гипоцентра в виде эллипсоида мы имеем вполне определённую трёхмерную структуру, вдоль которой выстраиваются гипоцентры, при сканировании по глубине.

Обратим внимание на физическое значение линии, вдоль которой сосредоточены гипоцентры при сканировании по глубине. Как нетрудно видеть, все первые вступления, на базе которых мы вели расчёты, сосредоточены вдоль некоторой четырёхмерной линии, для которой мы строили проекции на плоскости (рис. 2):

- время—глубина;
- широта—глубина;
- долгота—глубина.

Назовём эту линию «линией вспарывания», так как вдоль этой линии находятся точки, которые должны интерпретироваться как начала движения в процессе вспарывания материала коры и верхней мантии.

Следует заметить, что несмотря на расположение фокусов на линии вспарывания, первые вступления представляют собой объекты, не связанные непосредственно причинно-следственной связью. Иначе нам следовало бы признать передачу информации со скоростями выше скорости продольных возмущений. Из рис. 1 видно, что в некоторых местах линий вспарывания скорость «передачи информации» приближается к бесконечности.

Но субочаги и генерируемые ими первые вступления являются объектами одного механического

процесса — подвижки берегов некоторого разрыва. Подвижка вызвана перемещением значительных масс материала горных пород, например, тектонических плит, движение которых за счёт разрушения имеющихся неровностей и вызывает образование субочагов, которые в совокупности обеспечивают продвижение берегов разрыва. Другими словами, субочаги в большинстве случаев представляют собой зацепки (*asperity*, [Das, Aki, 1977; Das, Kostrov, 1983; Das, Kostrov, 1985; Kostrov, Das, 1988]).

Обратимся к вопросу о скорости передачи информации вдоль линии вспарывания. Кривые на рис. 1 показывают, что в рамках традиционно существующей модели отдельного субочага, развивающегося из точки в виде поверхности разрыва внутри материала «непрерывной сплошности», объяснить их невозможно. Выше приведены ссылки на несколько источников, в которых развивается другая модель субочага — модель зацепки или *asperity*. Указанная модель позволяет легко объяснить и поведение кривых на рис. 1, и кажущуюся независимость процесса вспарываний отдельных элементарных субочагов вдоль линии вспарывания.

Действительно, если представить всю очаговую зону в целом как две шероховатые поверхности, то взаимное движение образуемых ими берегов, находящихся под гидростатическим давлением, с неизбежностью приведёт к разрушению неровностей. Т.е. работает модель *asperity* в чистом виде. Но момент разрушения каждой зацепки (*asperity*) определяется не столько разрушением соседних зацепок, сколько скоростью передвижения основных прилегающих масс горных пород. Другими словами, если мы представим скорость передвижения материала горных пород в виде вектора, то очевидно, этот вектор не будет совпадать с вектором, касательным к кривой вспарывания. Более того, эти векторы будут близки к ортогональности. Это объясняет неприменимость представления, что скорость вспарывания должна быть меньше скорости продольных возмущений. Всё упирается в вопрос, о каком векторе скорости мы говорим.

Остался вопрос: почему вообще алгоритм и процедуры выделения первых вступлений реагируют на импульсы, исходящие от очагов на разных глубинах. Ответ достаточно прост. Алгоритмы определения первого вступления, будь то ручное выделение вступлений или автоматическое, «срабатывают» на первый импульс, имеющий амплитуду, превышающую сейсмический шум на определённую величину, и не реагирующий на последующие импульсы большей ампли-

туды. Сами же импульсы появляются в последовательности, соответствующей временной зависимости линии вспарывания.

С другой стороны, станции расположены относительно локальных очагов случайным образом. Диаграмма направленности плоских очагов, а мы представляем, что модель каждого локального очага такова, имеет достаточно узкую направленность, если мы вспомним, что импульс определяется как вступление по «некоторому» превышению амплитуды сигнала над шумом.

Следовательно, вопрос о модели очаговой зоны, как содержащей один очаг с единственной точкой начала процесса, должен быть заменён на другую, более соответствующую результатам обработки, модель очаговой зоны.

Такой модели очаговой зоны соответствует представление в виде некоторой вытянутой объёмной области, в которой порождается не один, а серия очагов, которые в совокупности и формируют разрыв.

Мы не утверждаем сейчас, что совокупный разрыв сразу образуется в виде сплошной поверхности или сплошного разрыва. В результате анализа результатов были обнаружены отдельные свидетельства того, что в начальный момент очаги могут разделяться некоторыми перемычками. Для обеспечения движения по разрыву эти перемычки должны быть сломаны. Но это уже будут явления второго по времени порядка.

Кроме того, встречаются случаи, когда линия вспарывания оказывается смещающейся с глубиной в зону меньших времён. Это указывает на то, что образование субочагов не обязательно происходит по времени с малых глубин в сторону больших. Это возможно, если движение по разрыву начинается с «двух сторон». Наряду с развитием движения вблизи поверхности, имеется начальная точка движения разрыва мантии в зоне перехода от вязко пластического состояния к хрупко-упругому.

Описанная схематически модель очаговой зоны в настоящей статье является гипотезой. Гипотезой, которая не противоречит приведённым в данной статье результатам.

Заключение

Выше мы установили, что среди первых вступлений сейсмических волн в наборе исходных данных для одного сейсмического события находятся вступления с различных глубин. Тем самым предположение о том, что гипоцентр расположен на глубине, которая соответствует минимуму

среднеквадратичной невязки, должно быть отвергнуто по причине необоснованности. И мы снова возвращаемся к проблеме формулировки вопроса: что такое глубина корового события.

В результате мы приходим к следующему заключению. Проблема определения глубин коровых событий связана с решением трёх проблем:

– вопрос о самом понятии глубины сейсмического события, определение критерия, по которому мы можем определить глубину путём обработки сейсмических данных;

– разработка алгоритма, в котором будет определяться этот критерий;

– разработка программного обеспечения реализации указанного алгоритма.

На первый взгляд, все три проблемы уже давно решены. Несмотря на это, проблема автоматического определения не только времени в очаге и координат, но и глубины тектонического корового события остаётся нерешённой.

И затруднения в указанной проблеме с определением глубин в автоматическом режиме, согласно проведённому исследованию, основаны на неверно формулируемых определениях. И первое из них связано с моделью очага, или точнее, очаговой зоны, которая в свою очередь, состоит из отдельных очагов. Т.е. очаговая зона состоит из множества отдельных мелких событий, не связанных между собой прямой причинно-следственной связью.

Второе – это недостаточно качественное выделение первых вступлений, на основе которых выполняется локация. Это означает, что не все возможные первые вступления определяются.

Третье – процедура локации, основанная на применении метода градиентного спуска, недостаточно устойчива на этапе окончательного определения параметров гипоцентра.

Первая проблема, связанная с понятием модели очаговой зоны корового события, разобрана выше. Заключается она в том факте, что первые вступления указывают на различные глубины. И несмотря на то, что в каждом конкретном случае минимум, или точнее, глобальный минимум среднеквадратичной невязки, только один, относится он к глубине, на которой некоторым случайным расположением станций относительно линии вспарывания оказалось большее число первых вступлений. Никаких физических причин расположения по глубине данного минимума нет.

Вопрос о том, какими отличительными особенностями должны обладать первые вступления, чтобы считать, что они указывают на реаль-

ную глубину события, остаётся открытым. Другими словами, каков критерий глубины?

На наш взгляд, данный критерий должен, так или иначе, быть связан с сейсмической энергией, излучаемой в процессе, последующем вспарыванию. Именно этот критерий неявно подразумевался в самом начале исследования при переходе к инструментальному определению параметров гипоцентров.

В случае, когда очаг только один, этому критерию удовлетворяет существующая процедура – первые вступления определяются по превышению амплитуд импульсов некоторого порога, связанного с сейсмическим шумом. Но, как показано выше, этот подход мы вынуждены отбросить. А критерий максимальной излучаемой энергии остаётся. Следовательно, нам необходимо научиться среди множественных очагов, составляющих очаговую зону, находить один, имеющий максимальную энергию излучения.

В рамках настоящего исследования удалось решить указанную проблему. Решение основано на том, что информация обо всех вступлениях, генерируемых различными очагами из очаговой зоны, сохранена в сейсмических записях. Для их извлечения из сейсмических записей потребовалось разработать специальный алгоритм и программное обеспечение, описание которых будет приведено в следующей статье.

В статье мы рассмотрели математическое обоснование метода и его практическое применение при определении глубины тектонического корового события. Метод основан на выделении из сейсмической записи парных сейсмических фаз P и pP для каждого очага из очаговой зоны, и уже по амплитуде фаз pP определить глубину, на которой излучение сейсмической энергии достигло максимума. Разработанный с этой целью в рамках данной работы метод совокупной обработки сейсмических записей, основанный на свойствах эмерджентности, позволяет заглядывать под уровень шума. Кроме того, формы импульсов указанных сейсмических фаз отличаются исключительно амплитудами [Епифанский, 1985; Антекман и др., 1989].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. В 2-х т. Пер. с англ. Т. 2. – М.: Мир, 1983. – 360 с.
- Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020 г. – EDN: IJOVUE
- Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.А., Поликарпова Л.Ф., Чепкунас Л.С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчёт динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 2. – С. 66–79. – EDN: WJCLDH
- Епифанский А.Г. Алгоритм построения точных синтетических сейсмограмм для произвольного дипольного источника // Применение ЭВМ в сейсмологической практике. – М.: Наука, 1985. – С. 100–115.
- Епифанский А.Г. Определение параметров гипоцентров и магнитуд землетрясений в телесеismicкой зоне (ЭПИ-74) // Алгоритмы и практика определения параметров гипоцентров землетрясений на ЭВМ. – М.: Наука, 1983. – С. 92–97.
- Кондорская Н.В., Аранович З.И., Соловьёва О.Н., Шебалин Н.В. (отв. сост.). Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. – М.: Наука, 1981. – 272 с.
- Пуанкаре А. Наука и гипотеза. Пер. с фр. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2018. – 240 с.
- Ризниченко Ю.В. О сейсмическом течении горных масс // Динамика земной коры. – М.: Наука, 1965. – С. 56–63.
- Brune J. Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones // Journal of Geophysical Research. – 1968. – V. 73, Is. 2. – P. 777–784.
- Das S., Aki K. Fault plane with barriers: A versatile earthquake model // Journal of Geophysical Research. – 1977. – V. 82. – P. 5658–5670.
- Das S., Kostrov B.V. Breaking of a single asperity: Rupture process and seismic radiation // Journal of Geophysical Research. – 1983. – V. 88. – P. 4277–4288.
- Das S., Kostrov B.V. An elliptic asperity in share: Fracture process and seismic radiation // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1985. – V. 80. – P. 725–742.
- Engdahl E.R., Van Hilst R.D., Buland R.P. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1998. – V. 88. – P. 722–743.
- Flinn E. Confidence regions and error determination for seismic event location // Reviews of Geophysics. – 1965. – V. 3. – P. 157–185.
- Kostrov B.V., Das S. Principles of earthquake source mechanics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – XVII. – 286 p.
- Murphy J.R., Barker B.W. Improved focal-depth determination through automated determination of seismic depth phases *pP* and *sP* // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2006. – V. 96. – P. 1213–1229.
- Storchak D. Improved location procedures at the International Seismological Centre // Geophysical Journal International. – 2011. – V. 186. – P. 1220–1244.

Сведения об авторах

Епифанский Алексей Григорьевич, канд. физ.-мат наук, ведущий инженер Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: epiphansky@gmail.com

Дуленица Людмила Григорьевна, мл. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия. E-mail: DylencovaL@gsras.ru

Model of focus zone and depth of crust seismic events

© 2022 A.G. Epifansky, L.G. Dulentsova

GS RAS, Obninsk, Russia

Received May 5, 2022

Abstract On the basis of analysis of station residuals and dependence of square mean residuals from depth impossible the presence of a focus model of crust tectonic events constructed from rupture discontinuity developing from single point is shown. Collection of arrivals of each seismic event raised from different depths is shown. Point emission of seismic waves forming arrivals are lying along line structures in time-space. All arrivals of a given seismic event situated along its own line structures. These line structures are called rupture lines. Rupture velocity is higher than P-wave velocity along the rupture line. This means that causal linkages are not present between sequences of rupturing movements. Rupture lines starting from the surface, cross-crust and continue into the upper mantle. A new model of focus zone that consists of several small focuses is proposed. The last are flat traditional focuses developed from a single point. Rupture line is an enveloping of the focuses in time-space. This article is a first of the collection of four parts that describe algorithm and software realization to determine depth of crustal events automatically.

Keywords Seismic event, the ripping line, focal zone, depth detection.

For citation Epifansky, A.G., & Dulentsova, L.G. (2022). [Model of focus zone and depth of crust seismic events]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(3), 24-41. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.02. EDN: HJAMWX

References

- Aki, K., & Richards, P. (1983). *Kolichestvennaia seismologiya: Teoriia i metody: V 2-kh tomakh* [Quantitative Seismology: Theory and Methods. V. 2]. Moscow, Russia: MIR Publ., 360 p. (In Russ.).
- Akimov, A.P., & Krasilov, S.A. (2020). [WSG software package “Seismic data processing system”]. Certificate of state registration of a computer program No. 2020664678. EDN: IJOVUE
- Aptekman, J.I., Belavina, U.F., Zakharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.I., Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L.S. (1989). [Spectra of P-waves in problems of determining earthquake foci. The transition from the station’s spectrum to focal and calculation of dynamic source parameters]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 66-79. (In Russ.). EDN: WJCLDH
- Brune, J. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, 73(2), 777-784.
- Das, S., & Aki, K. (1977). Fault plane with barriers: A versatile earthquake model. *Journal of Geophysical Research*, 82, 5658-5670.
- Das, S., & Kostrov, B.V. (1983). Breaking of a single asperity: Rupture process and seismic radiation. *Journal of Geophysical Research*, 88, 4277-4288.
- Das, S., & Kostrov, B.V. (1985). An elliptic asperity in share: Fracture process and seismic radiation. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 80, 725-742.
- Engdahl, E.R., Van Hilst, R.D., & Buland, R.P. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88, 722-743.
- Epifansky, A.G. (1983). [Determination of hypocenter parameters and earthquake magnitudes in the teleseismic zone (EPI-74)]. In *Algoritmy i praktika opredeleniia parametrov gipotsentrov zemletriasenii na EVM* [Algorithms and practice of determining the parameters of earthquake hypocenters on a computer] (pp. 92-97). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Epifansky, A.G. (1985). [An algorithm for constructing accurate synthetic seismograms for an arbitrary dipole source]. In *Primenenie EVM v seismologicheskoi praktike* [Computer applications in seismological practice] (pp. 100-115). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Flinn, E. (1965). Confidence regions and error determination for seismic event location. *Reviews of Geophysics*, 3, 157-185.
- Kondorskaya, N.V., Aranovich, Z.I., Solov'yeva, O.N., & Shebalin, N.V. (1981). *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh*

- stantsiyakh Yedinoy sistemy seysmicheskikh nablyudeniyy SSSR* [Instructions on the production and processing of observations procedure at seismic stations of a Unified system of seismic observations of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 272 p. (In Russ.).
- Kostrov, B.V., & Das, S. (1988). *Principles of earthquake source mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, XVII, 286 p.
- Murphy, J.R., & Barker, B.W. (2006). Improved focal-depth determination through automated determination of seismic depth phases pP and sP. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 1213-1229.
- Poincare, A. (2018). *Nauka i gipoteza. Per. s fr.* [Science and hypothesis]. Moscow, Russia: LIBROCOM Publ. House, 240 p. (In Russ.).
- Riznichenko, Yu.V. (1965). [On the seismic flow of mountain masses]. In *Dinamika zemnoi kory* [Dynamics of the Earth's crust] (pp. 56-63). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Storchak, D. (2011). Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical Journal International*, 186, 1220-1244.

Information about authors

Epifansky Alexey Grigorievich, PhD, Leading Engineer of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: epiphansky@gmail.com

Dulentsova Ludmila Grigorievna, Junior Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: DylencovaL@gstras.ru