

УДК 550.34.06.013.3

Модель очаговой зоны и локация сейсмических событий, основанная на амплитудах фаз pP

© 2025 г. А.Г. Епифанский

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 03.02.2025 г.

Аннотация. Статья является продолжением публикаций на тему «Модель очаговой зоны». Работа выполняется в рамках исследования, направленного на уточнение автоматического определения глубины коровых событий. В качестве базового инструмента в работе использован модифицированный алгоритм локации. Ранее было показано, что построенное на базе математической переопределённой задачи классическое решение, результатом которого является точка, не учитывает главного – влияния движений внутри объёмной очаговой зоны на параметры волн в окружающей среде. Критерием поиска решения при таком подходе являлся минимум среднеквадратичной невязки (RMS). В решении сформулированной нами задачи использованы глубинные фазы pP . Детальное исследование показало, что излучение P -волн из источника на начальном этапе его активности можно рассматривать как непрерывное и исходящее из разных частей разрыва. Такими же чертами обладают отражённые от свободной поверхности фазы pP . Это дало возможность построить алгоритм локации, использующий в качестве критерия окончательного решения максимум сейсмического излучения.

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

Для цитирования: Епифанский А.Г. Модель очаговой зоны и локация сейсмических событий, основанная на амплитудах фаз pP // Российский сейсмологический журнал. – 2025. – Т. 7, № 1. – С. 58–73. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.1.04>. – EDN: QSVBVI

Введение

Хорошо известно и признано большинством сейсмологов, что очаг тектонического сейсмического события может быть представлен набором отдельных субочагов, каждый из которых, в свою очередь, порождается процессом разрушения зацепки, мешающей движению берегов тектонических плит.

Основной задачей, с которой начиналась сейсмология, является локация источника сейсмического события. Локация сейсмических событий осуществляется по временам прихода импульсов, порождённых первыми движениями в очагах сейсмических событий. Само сейсмическое событие, а точнее, спонтанное движение в очаге, не заканчивается импульсом первого вступления. Процесс в очаге занимает, в зависимости от величины события, от единиц до сотен секунд. Проходящие в очагах сейсмических событий процессы являются предметом научных исследований. В рутинной обработке данных сейсмического мониторинга ограничива-

ются, как правило, определением места (фокуса) начала события, при этом используются исключительно первые вступления. Для получения достаточно представительного набора первых вступлений создана большая сеть распределённых по земному шару сейсмических станций. Успешное решение задачи синхронизации часов на станциях позволило рассматривать сеть как антенну, прослушивающую Землю на предмет выявления и определения параметров сейсмических событий.

С момента, когда задачу локации стали выполнять цифровыми алгоритмами, было разработано не слишком большое число оригинальных методов поиска математического решения задачи локации. Это утверждение не касается развития методов автоматизированного сбора и обработки сейсмических данных. Алгоритмы и программные продукты являются внутренним элементом развиваемых систем. Здесь говорится только о самих алгоритмах локации, о том, что происходит после сбора и ассоциации (предварительной) первых вступлений с определённым

событием. Большинство используемых алгоритмов базируется на построении переопределённой системы уравнений, решением которой являются точка в пространстве и время в очаге, удовлетворяющие некоторому критерию.

Обычно в качестве критерия, определяющего решение, выступает минимум среднеквадратичной невязки R между измеряемыми и расчётными величинами, получаемой из остаточных невязок каждого из уравнений, входящих в систему [Епифанский, 1983]. Задача локации сводится к решению этой системы уравнений. Коэффициенты при неизвестных в уравнениях получаются методом градиентного спуска из выражения для R . Указанные коэффициенты являются функциями эпицентрального расстояния и глубины. По этой причине формулируемая задача нелинейна, а решение — итерационное. По мере приближения к искомому результату (минимуму среднеквадратичной невязки) пересматривается набор первых вступлений и бракуются те вступления, которые имеют большую невязку. При браковке вес вступлений может плавно уменьшаться или сразу полагаться равным нулю.

Описанный подход называется методом Гейгера [Geiger, 1912]. Существуют и другие методы поиска решения. Один из таких методов, а именно симплекс-метод используется в данной работе в комбинации с методом Гейгера.

Следует заметить, что в локации важен не столько путь, который приводит к решению, сколько критерий достижения искомого решения. Вообще говоря, не совсем корректно говорить о локации сейсмического события как об определении точки, где началось движение, приведшее в результате к проявлению «землетрясения». Точка в данном случае есть математическая абстракция. Очаг реального сейсмического события следует рассматривать как область, где зафиксированы первичные движения, и интервал времени, в течение которого они происходили. Движения в очаге являются реакцией породного массива на действующие в нём напряжения, этот процесс, охватывающий конечный интервал времени и объём пространства, и является источником регистрируемых сейсмических колебаний. Мы вынуждены привести сделанные уточнения из-за того, что как раз рассмотрению деталей первичных движений и посвящена данная работа. Здесь рассматриваются не причины и процесс разрушения горных пород в очаге, а только инструментальные свидетельства сопровождавших данные разрушения движений, структура этих движений в пространстве и времени.

Линия вспарывания и некоторые особенности локации

Ранее было показано [Епифанский, Дуленцова, 2022; Епифанский, Дуленцова, 2024], что при расчётах гипоцентров с фиксированием глубин, координаты полученных гипоцентров выстраиваются вдоль некоторой линии в пространстве-времени — линии вспарывания W . Линия вспарывания W представляет собой геометрическое место точек в пространстве-времени, где обеспечивается минимум среднеквадратичной невязки R , то есть это область, где потенциально мог быть расположен источник движения (гипоцентр).

Параметры гипоцентра рассчитываются по принятой в работе методике, являющейся модификацией стандартной методики Гейгера. Модификации подверглась часть алгоритма поиска минимума среднеквадратичной невязки, т.е. пути движения в сторону искомого решения на окончательном этапе уточнения параметров гипоцентра (гипоцентров). Один из важных моментов модификации заключается в том, что расчёт параметров гипоцентра ведётся с перебором фиксированных глубин с применением процедуры симплекс-метода. При определении координат гипоцентра на конечном этапе локации алгоритм позволяет получать ошибку вычисления порядка одного метра и менее, при этом ошибка вычисления времени в очаге составляет 10^{-4} секунды.

Для множества точек линии вспарывания можно записать следующее выражение: $W(h) = \{\omega = \omega(t_0, \varphi, \lambda, h, R)\}$, где каждая точка ассоциирована с набором параметров, при этом глубина h также является параметром на линии вспарывания. Первые четыре параметра стандартно определяют положение гипоцентра в пространстве-времени, пятый параметр R есть элемент, определяющий численное значение критерия минимизации, достигнутого процедурой локации в ходе решения. Как показано далее в статье, традиционное представление этого параметра недостаточно для описания очага, и «пространство решений» требует расширения.

Также в работе [Епифанский, Дуленцова, 2024] введено понятие «характеристика». Этим термином названа линия в пространстве-времени, обладающая тем свойством, что сейсмические сигналы от источников (фокусов), расположенных на этой линии, регистрируются одновременно. Кроме того, там же показано, что линия вспарывания достаточно близка к характеристикам. Следует подчеркнуть, что линия вспарывания

относится ко всему набору вступлений, в то время как характеристики ассоциированы с вступлениями на отдельных станциях.

Расчёты, выполненные для большого числа сейсмических событий, показывают, что линия вспарывания представляет собой гладкую кривую, похожую по форме, но имеющую небольшие отличия по крутизне наклона для каждого набора первых вступлений. Это наводит на мысль, что линия вспарывания в основе своей является свойством среды, а не отдельных сейсмических событий.

Критерий достижения решения процедурой локации

Основным рабочим параметром при локации является фазовая невязка. Фазовая невязка определяется выражением:

$$\tau(r_m, h) = t_m - t_m^c(r_m, h) + e_m, \quad (1)$$

где $t_m(h)$ — время вступления или время наблюдения, h — глубина гипоцентра. Величина e_m — ошибка измерения времени вступления. Переменная t_m^c — теоретическое время вступления фазы $t_m^c(r_m, h) = t_0(h) + \gamma(r_m, h)$, где $t_0(h)$ — время в очаге на глубине h для события, рассчитываемое как среднее значение по всем первым вступлениям события за вычетом времени пробега:

$$t_0(h) = \langle t_m^c - \gamma(r_m, h) \rangle = \langle t_m^0(h) \rangle. \quad (2)$$

Время пробега сейсмической фазы $\gamma(r_m, h)$ определяется по годографу на эпицентральном расстоянии r_m до сенсора, зафиксировавшего фазу. В уравнении (2) угловые скобки используются для обозначения расчёта среднего значения. Так, $t_m^0(h)$ определяет индивидуальное для данной фазы время в очаге. Среднее значение по набору из M таких величин (общее число сейсмических фаз, которые используются в процедуре локации) есть время в очаге самого события. Индекс m ($m=1, \dots, M$) используется для идентификации сейсмической фазы.

Критерием достижения результата алгоритмом локации, как и в традиционных подходах, является минимум величины среднеквадратичной невязки:

$$R(\varepsilon, h) = \frac{1}{M-n} \sqrt{\sum_{m=1}^M \tau_m^2(h)}, \quad (3)$$

где n — число независимо определяемых параметров (координат). В выражении (3) введено обозначение только для координат эпицентра $\varepsilon = (t_0, \varphi, \lambda)$, то есть $n=3$. Расчёты полного набора

координат очага в используемом подходе ведутся с перебором фиксированных глубин. Введём аналогичное обозначение для координат гипоцентра, $H = (t_0, \varphi, \lambda, h)$, которое понадобится в дальнейшем.

На рис. 1 показана линия вспарывания в координатах время—глубина для землетрясения Мэньюань (КНР) 7 января 2022 г., $t_0 = 17:45:30$, $\varphi = 37.7972^\circ$, $\lambda = 101.3576^\circ$, $M_s = 7.1$ [Епифанский, Дуленцова, 2022]. Линия получена при обработке данных сейсмических станций, расположенных на телесеизмических расстояниях.

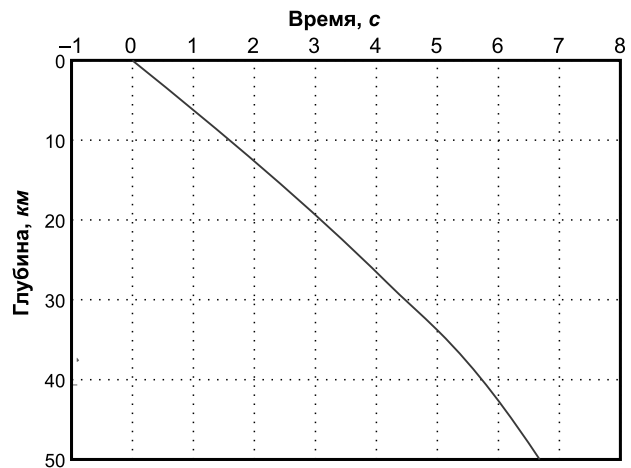


Рис. 1. График линии вспарывания в проекции на плоскость время—глубина. Линия вспарывания получена при обработке землетрясения Мэньюань 7 января 2022 г., $t_0 = 17:45:30$.

По оси абсцисс — время в секундах,
по оси ординат — глубина в км

Характеристика и её свойства

Характеристика χ — линия в пространстве-времени (4D-пространстве), обладающая тем свойством, что сигналы от сейсмических источников, расположенных на этой линии, регистрируются на сейсмограмме в один и тот же момент времени, являющийся временем вступления t_m^* :

$$t_m = t_m^0(h) + \gamma(r_m, h) = \text{const}, \quad (4)$$

если $(t_m^0, r_m, h, \dots) \in \chi_m$,

где $t_m^0(h)$ — индивидуальное для фазы время в очаге, r_m — эпицентральное расстояние от фокуса, расположенного на характеристике, до сенсора, зарегистрировавшего фазу m , h — глубина расположения фокуса. Обратим внимание, что термин «время в очаге» в отношении характеристики достаточно условен — он просто определяет положение характеристики в пространстве. Время вступления, как и время в очаге t_0 — величины абсолютные. В силу этого

характеристика однозначно связана с некоторым сейсмическим событием.

В дальнейшем будем иметь дело с 4D-пространством-временем, рассматривая его параметры в виде «срезов» по координатам время–глубина. Каждая точка характеристики, имея пространственно-временные координаты, связана также с набором параметров, имеющих значения, получаемые при обработке сейсмических данных. Поэтому в физическом смысле будем называть характеристику структурой. Смысл введения подобного сложного объекта-структуры состоит в том, что зависимость значения параметров от координат представляет определяющее значение.

Также мы часто будем оперировать параметрами, которые либо измерены физически, либо являются вычисленными. Последние для краткости будем называть виртуальными.

Отметим, что для характеристики справедливы все ранее сделанные пояснения, что и для линии вспарывания, которая также является структурой в описанном для характеристики смысле. Отличие этих двух структур состоит в том, что линия вспарывания относится к набору первых вступлений, а каждая характеристика определяется своим индивидуальным вступлением из общего набора, по которому рассчитывается гипоцентр. Причём линия вспарывания является усреднённой линией характеристик сейсмических фаз. Основные свойства характеристик определяются годографом соответствующей фазы. То есть характеристики связаны с определённым сейсмическим событием только временем вступления порождающей её фазы.

Времена пробега будем обозначать как $\gamma = G(r, h)$, указывая их зависимость от эпицентрального расстояния r и глубины h . В случае необходимости указать, для какой сейсмической фазы определяется время пробега, код фазы указывается в верхнем индексе, например, $\gamma = G^{pP}(r, h)$.

В данной работе в контексте с характеристиками рассматриваются исключительно две сейсмические фазы — P и pP . Эти фазы отличаются от других тем, что формы их импульсов совпадают, а отношение амплитуд вертикальных компонент в падающей (фаза P) и в отражённой (pP) волнах фиксированы [Kennett, Engdahl, 1991; Kennett et al., 1995].

Связь линии вспарывания, характеристик и невязок

Итак, выше установлены некоторые закономерности, связанные с глобальными особенно-

стями среды, в которой мы ищем координаты очага сейсмического события. Сами невязки рассчитываются от некоторого пробного гипоцентра. Варьируя значения координат, можно добиться минимизации невязок, а следовательно, и среднеквадратичной невязки, минимум которой и указывает на наиболее вероятное положение гипоцентра.

Традиционно предполагалось, что невязка включает в себя две составляющие. Первая составляющая — это величина, которая появляется в уравнениях из-за неточности текущего значения гипоцентра. Изменяя координаты пробного гипоцентра, можно свести к нулю эту часть невязки. Вторая составляющая есть некоторая случайная величина, не связанная с глобальными особенностями строения среды. Эту часть невязки невозможно свести к нулю изменениями координат пробного гипоцентра.

Пространственно-временные параметры каждого элемента множества χ получаются из координат эпицентра во время локации, время на характеристике t_m^0 есть станционное время в очаге:

$$t_m^0 = t_m^p - \gamma(r_m, h), \quad (5)$$

где t_m^p — время вступления продольной волны (фазы P).

По определению характеристики всех вступлений при фиксированном эпицентральной расстоянии и произвольном значении глубины равны между собой. Выражение (5) содержит абсолютные значения времён. Для удобства в дальнейшем запишем выражение (5) в относительных значениях времени:

$$\tau_m(h) = t_m^0(h) - t_m^0(h^f) = \gamma(r_m, h^f) - \gamma(r_m, h), \quad (5')$$

где h^f — значение фиксированной глубины. Очевидно, теперь можно построить график для параметра τ_m в зависимости от глубины. Время в очаге для глубины очага h^f , как и само значение глубины, далее будем называть базовыми. Значение τ_m в выражении (5') равно нулю при базовом значении глубины.

На рис. 2 приведены графики параметра $\tau_m = \tau(r_m, h)$ фазы P для четырёх значений эпицентрального расстояния (r_m). Базовое значение глубин на рис. 2а равно нулю. На рис. 2б базовое значение глубины $h = 12.5$ км.

Характеристики одних и тех же фаз, зарегистрированных станциями на разных эпицентральных расстояниях, могут существенно отличаться. На рис. 3 приведён в изометрической проекции график функции относительного времени в очаге, которая зависит от двух переменных:

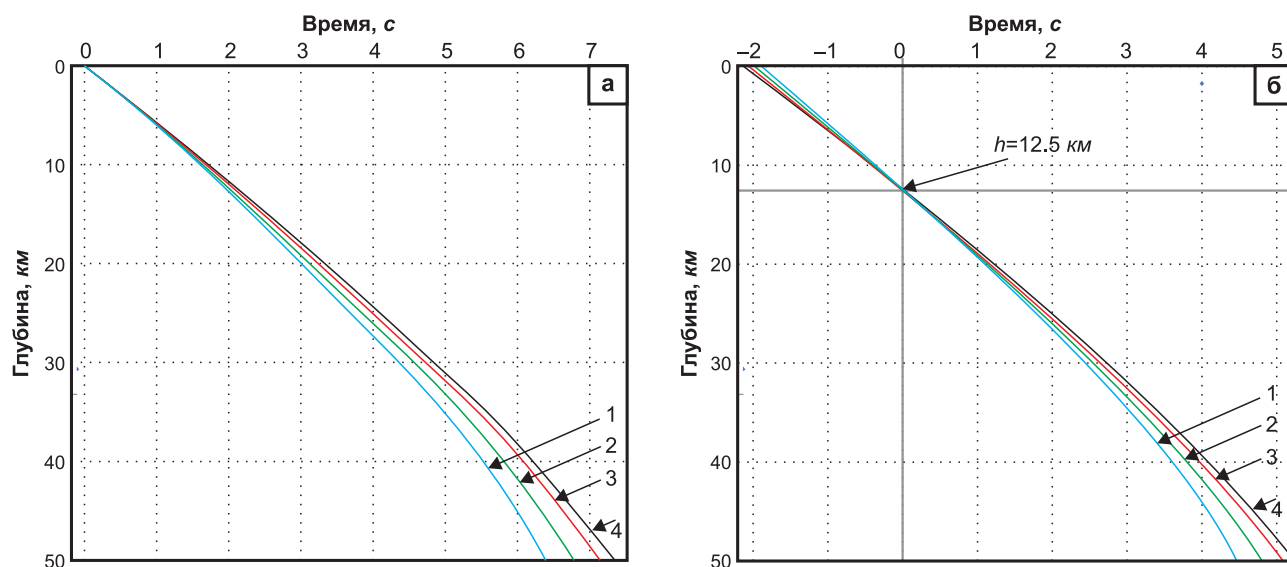


Рис. 2. Графики значений относительного времени в очаге на характеристиках для фазы P в зависимости от глубин. Базовое время в очаге взято для глубины 0 км (а) и для глубины 12.5 км (б).

На графиках приведены характеристики для разных эпицентральных расстояний (r): 1 — $r=25^\circ$, 2 — $r=50^\circ$, 3 — $r=75^\circ$, 4 — $r=100^\circ$. По шкале времени отложено текущее время в очаге на определённой глубине минус базовое время в очаге. По оси абсцисс (T) — время в секундах, по оси ординат — глубина в км

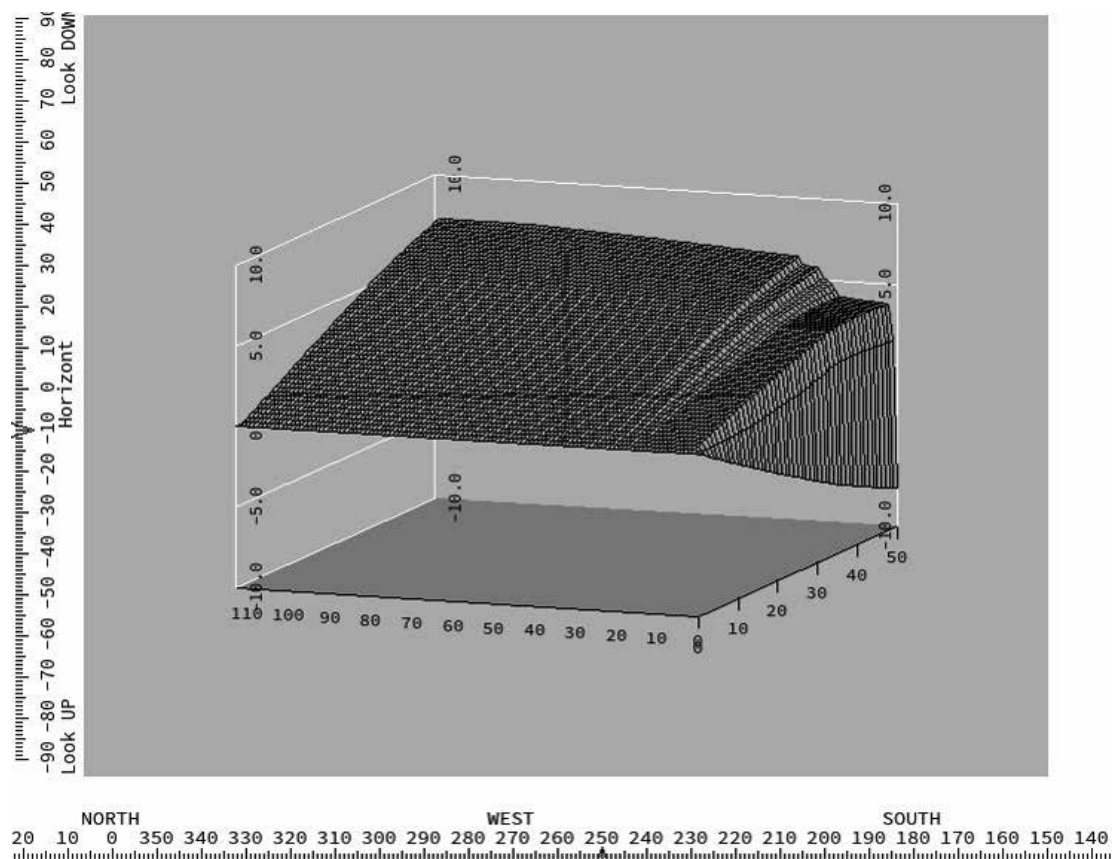


Рис. 3. График функции относительного времени в очаге для характеристик фазы P в изометрической проекции в координатах глубина—эпицентральное расстояние.

По оси времени отложено значение разности: время в очаге на каждой характеристике и время в очаге на той же характеристике при нулевой глубине. Из графика хорошо видно различие для телесейсмических, региональных, локальных и переходной зоны эпицентральных расстояний

глубины и эпицентрального расстояния. График построен для всех допустимых эпицентральных расстояний, на которых в первых вступлениях наблюдаются фазы P . Его условно можно разделить на три зоны по эпицентральным расстояниям. Зоны, начиная с нулевого эпицентрального расстояния, будем именовать: локальная ($0-5^\circ$), региональная ($5-15^\circ$) и телесеismicическая ($25-180^\circ$). Между региональной и телесеismicической зонами в интервале $15-25^\circ$ имеется переходная зона. Очевидно, что в дальнейшем при совместной обработке данных нескольких станций имеет смысл выбирать их в пределах одной зоны.

Математически функция относительного времени в очаге может быть представлена как $\delta\gamma(r, h) = \gamma(r, 0) - \gamma(r, h)$.

Так как линия вспарывания является усреднённой линией характеристик набора M первых вступлений $W(h) = \langle \chi_m(h) \rangle$, выражение для значения невязок можно записать в виде:

$$\tau_m(h) = t_0 \{ \chi_m(h) \} - t_0 \{ W(h) \} + e_m, \quad (6)$$

что по сути есть переформулировка выражения для невязки (1). Являясь аналогом (1), выражение (6) также зависит от глубины. Здесь в фигурных скобках указаны объекты и аргументы, при которых выбраны значения соответствующих параметров.

В качестве реального примера на рис. 4 показаны графики характеристик фазы P для эпицентральных расстояний 25 и 100° (телесеismicическая зона), и нанесён усредняющий их график линии вспарывания для землетрясения Мэньюань 7 января 2022 г., $t_0 = 17:45:30$, Китай.

Заметим, что по определению невязка имеет нулевое значение при пересечении характеристики с линией вспарывания при условии, что ошибка измерения вступления e_m равна нулю. Если e_m отлична от нуля, точка пересечения характеристики и линии вспарывания просто переместится вдоль последней. Величина перемещения и направление зависят от эпицентрального расстояния. При $e_m = 0$ линии характеристик пересекаются друг с другом, а также с линией вспарывания в точке на базовой глубине h^f .

Итак, пусть у нас есть M первых вступлений t_m . Время в очаге на характеристике для каждого первого вступления t_m^0 определим из (5). Время в очаге (время на линии вспарывания W) определим по (2) $t_0 = \langle t_m^0 \rangle$ при всех допустимых m ($m=1, \dots, M$). Значение невязки t_m получается из (6).

Из проведённого выше анализа и из рис. 2–4 следует, что абсолютное значение невязки

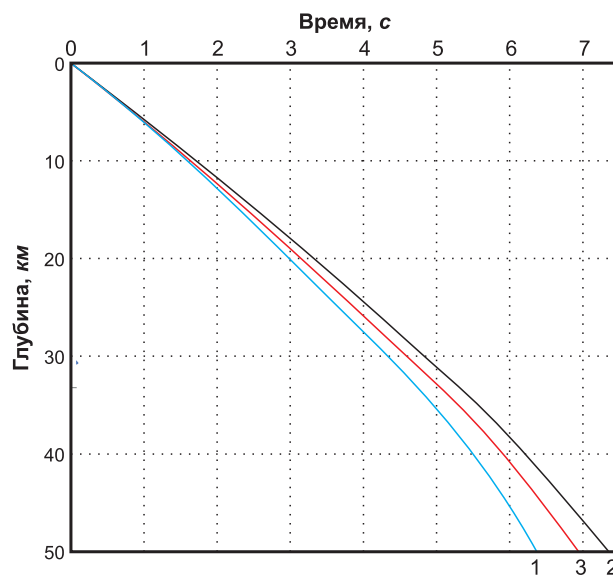


Рис. 4. Графики характеристик волны P для эпицентральных расстояний 25° (1) и 100° (2).

Линия вспарывания (3) для землетрясения Мэньюань 7 января 2022 г., Китай.

По оси абсцисс (T) – время в секундах, по оси ординат (D) – глубина в км

увеличивается с ростом $\|r_m - r_0\|$, где $r_0 = r_0^w$ (r_0^w – эффективное эпицентральное расстояние, соответствующее расположению линии вспарывания). Причём это увеличение не зависит от величины e_m , что естественно. А так как при любом $h \neq h^f$ характеристики не совпадают с линией вспарывания (то есть $t_0(h) \neq t_m^0(h)$ при всех допустимых значениях m), с увеличением глубины время в очаге для линии вспарывания и для каждой характеристики изменяется по-своему.

На рис. 5 приведён график значений среднеквадратичной невязки в зависимости от глубины для землетрясения Мэньюань в Китае 7 января 2022 года. При построении этого графика использовались станции, расположенные в телесеismicической зоне. Из формулы (6) следует, что минимум среднеквадратичной невязки всегда будет соответствовать нулевой глубине для одной зоны. При использовании времён первых вступлений станций, находящихся в двух или большем числе зон, минимум среднеквадратичной невязки смещается по глубине и может принимать отличное от нуля значение [Енифанский, Дуленцова, 2022]. Последний факт – появление минимума среднеквадратичной невязки, если он наблюдается, связан с тем, что при суммировании станционных невязок в (4) они получены из уравнений (6), в которые входят различные «линии вспарывания», рассчитанные для различных эпицентральных зон.

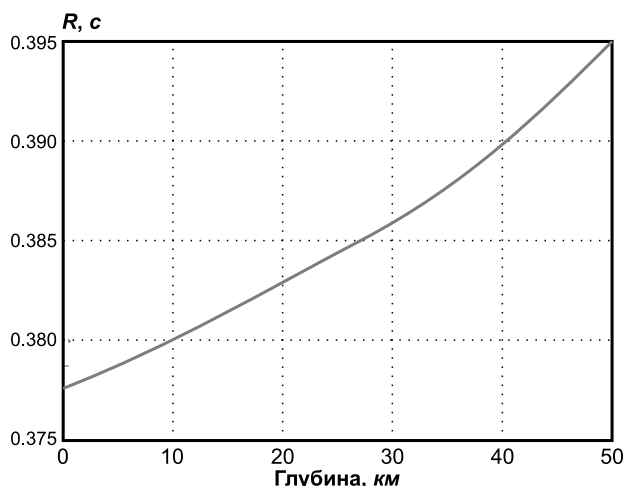


Рис. 5. Графики значений среднеквадратичной невязки в зависимости от глубины для землетрясения Мэньюань в Китае 7 января 2022 г.

В действительности только данные из локальной зоны могут рассматриваться как адекватно указывающие на глубину очага события. Для значений R , построенных по данным станций в других эпицентральных зонах, из использованных выражений не следует какая-либо зависимость минимума среднеквадратичной невязки от глубины очага. Последнее указывает на невозможность в большинстве случаев определения глубины только по первым вступлениям продольных волн.

Глубинная фаза pP

Так как применение критерия среднеквадратичной невязки продольной волны (фазы P) для определения глубины сейсмического события часто малоперспективно, возникает закономерный вопрос: возможно ли использование в условиях автоматической обработки других сейсмических фаз? В первую очередь, интерес представляют глубинные фазы, в частности, фаза pP [Кондорская, 1956], которая формируется при отражении продольной волны от свободной поверхности. Отражение не изменяет форму очагового импульса фазы pP [Kennett, 2009; Červený, Ravindra, 1973], амплитуда же вертикальной компоненты в момент отражения удваивается (увеличение амплитуды происходит только на самой поверхности в точке отражения. Потом отраженная волна при распространении, наоборот, ослабевает в силу потери части энергии в низкодобротной приповерхностной среде). Однако следует учитывать, что в точку наблюдения сигналы фаз P и pP приходят различными путями. За счёт разной направленности излучения фаз

P и pP на пути от источника к приёмнику данные импульсы будут иметь разную интенсивность. Как будет ясно далее, только благодаря алгоритму совместной обработки всех сейсмических записей события удастся воспользоваться указанной особенностью отношения регистрируемых амплитуд рассматриваемых фаз.

Следующий вопрос касается возможности автоматического определения вступления фаз pP в случаях, когда времена вступления фаз P уже известны. Традиционно в ручной обработке ищется некоторое вступление сейсмической фазы и проверяется, является ли это вступление фазой pP . Причём проверяется целый комплекс критериев. В случае полностью автоматической обработки такой подход неприемлем в силу следующих замечаний:

- алгоритмы автоматической первичной обработки сейсмических записей, которые выделяют первые вступления продольных волн, как правило, последующие вступления на записи обрабатываемого события не выделяют;

- в наборе параметров каждого элемента характеристики часть из них относится к области очага. Эти параметры являются исключительно виртуальными. Вторая часть параметров измеряется по сейсмической записи. Определяющим саму характеристику является время в очаге, которое вычисляется по вступлению фазы. Время вступления фаз, отличных от P , также является виртуальным;

- зависимость времени в очаге от глубины определяет пространственно-временное расположение характеристики и параметров всех её элементов;

- значения некоторых параметров (например, амплитуды фазы) не зависят от глубины очага. Время вступления, порождающее характеристику, также не зависит от глубины;

- в очаговой зоне одного сейсмического события может быть несколько субочагов [Епифанский, Дуленцова, 2022; Епифанский, Дуленцова, 2024].

Однако, если предположить, что искомая фаза pP найдена, то глубина будет соответствовать точке пересечения характеристик фаз P и pP , а времена в очаге для обеих фаз должны совпадать. Рассмотрим подробнее, как этот факт может быть использован.

На рис. 6 представлена характеристика фазы pP . График построен при тех же условиях, что и графики на рис. 2 и 4, значение базовой глубины равно нулю. Видно, что для отображения на одном графике всех требуемых структур очаговой зоны нужно выбрать систему координат и определить правила пересчёта временных

значений характеристик, тем самым определить само пространство, в котором будут проводиться в дальнейшем наши исследования. Очевидно, что это будет виртуальное пространство.

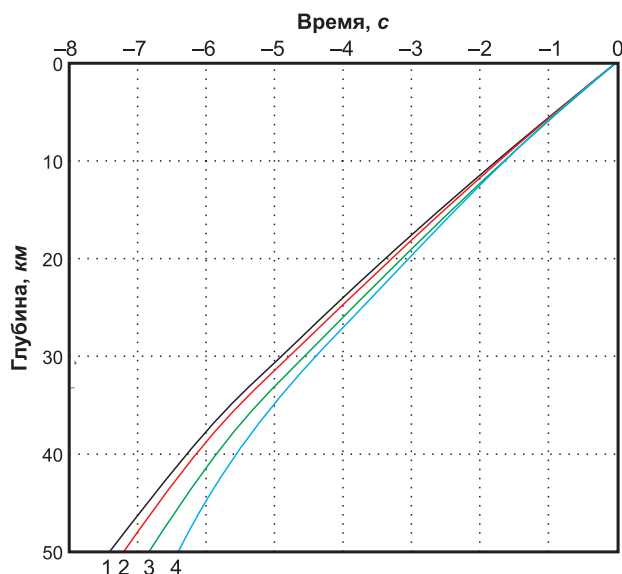


Рис. 6. Графики характеристик фаз pP для глубин в пределах 0–50 км.

Линии построены для разных эпицентральных расстояний (r): 1 – $r=25^\circ$, 2 – $r=50^\circ$, 3 – $r=75^\circ$, 4 – $r=100^\circ$

Очаговая зона и пространство решений

Под очаговой зоной в дальнейшем будем считать пространство решений, получаемых при анализе процессов, происходящих в очаге. Очаговая зона практически всегда представляет собой группу составляющих её субочагов. Вопрос состоит только в размерах этой зоны, где под «размером» подразумевается величина, зависящая от магнитуды и ряда сопутствующих параметров.

Выделение отдельных субочагов может представлять определённую сложность именно из-за различия их размеров. Имея только сейсмические записи на поверхности, различать субочаги в пространстве-времени – задача непростая. Следует признать, что при использовании только первых вступлений нет возможности получить информацию об очаговой зоне в целом. Далее опишем инструмент, при помощи которого есть возможность выделять отдельные субочаги, составляющие очаговую зону, или, другими словами, формировать пространство решений.

Основная сложность заключается в том, что мы рассматриваем физические процессы, развивающиеся во времени, то есть ведём рассуждения в 4D-пространстве расположения очаго-

вой зоны. При этом всю информацию о процессах, протекающих в очаговой зоне, мы получаем из интервалов сейсмических записей, сдвинутых по времени на времена пробега вступления волн, порождаемых в очаговой зоне. Дополнительную сложность придаёт ещё и тот факт, что мы в задаче локации ориентированы исключительно на времена вступлений сейсмических волн, упуская из виду, что процессы движения в очаговой зоне происходят не одновременно и не в одной точке, то есть область излучения перемещается. Далее попытаемся представить такую схему координат, в которой можно будет представить движения области излучения (через время в очаге) и их свидетельства (через времена вступления сейсмических фаз) совместно.

Основной структурой, определяющей область пространства-времени расположения очаговой зоны, является линия вспарывания W . Нулевое значение на оси времени является виртуальным значением времени в очаге на нулевой глубине: $t_0 = t_0\{W(h=0)\}$.

Такое сложное определение вызвано тем, что виртуальные координаты гипоцентров, линия вспарывания и линии характеристик не являются прямыми [Епифанский, Дуленцова, 2022]. В дальнейших рассуждениях мы не будем использовать кривизну указанных линий, более того, будем эту особенность указанных линий игнорировать. Тем не менее, выбранная система координат криволинейная, а пространство неевклидово. Назовём его пространством решений.

В этом 4D-пространстве с координатами всё понятно – для глубины используется ось, ортогональная к свободной поверхности и с нулевым значением на поверхности. Координаты на свободной поверхности тоже можно рассматривать в общепринятых направлениях север–юг и восток–запад, значение ноль для пространственной части совпадает с эпицентром. Пересчёт таких абсолютных координат очевиден.

Отображение характеристик в пространстве решений тоже просто себе представить. Для составляющей времени из $t_m^0(h)$ (времени на характеристике) следует вычитать $t_m^0(h=0)$ (время на характеристике, соответствующее нулевой глубине). Здесь m – индекс фазы.

На рис. 7 приведена геометрическая схема взаимодействия характеристик фаз P и pP в выбранной системе координат (на плоскости время–глубина) для абстрактного события. Рассчитанное время вступления обозначим $t_0(r, h)$. Базовое время удобнее всего задать нулевым, базовая глубина h^f может быть задана произвольно (в данном случае $h^f=12.5$ км).

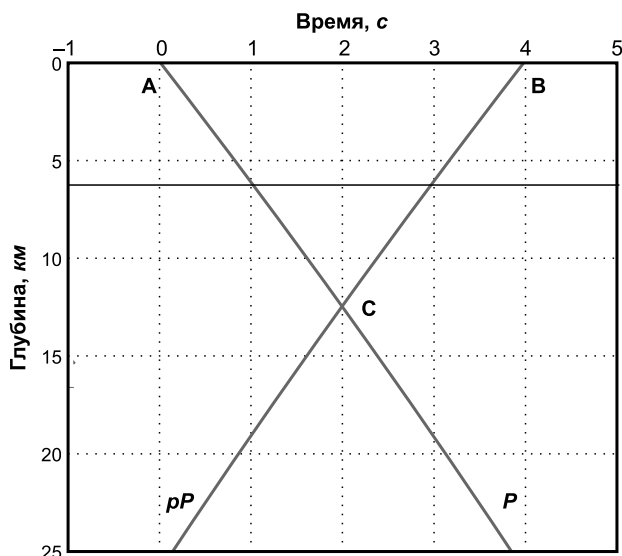


Рис. 7. Схема взаимодействия характеристик парных фаз P и pP .

Точка А соответствует нулевому базовому значению линии вспарывания и линии обобщённой характеристики фазы P . Точка В соответствует нулевому базовому значению фазы pP , но смещённой по оси времён так, чтобы обобщённая характеристика этой фазы проходила через точку С, которая, в свою очередь, соответствует базовому значению пересечения характеристик фаз P и pP ($h=12.5$ км)

Действительно, при заданных значениях глубины фокуса очага и эпицентрального расстояния можно определить время пробега сейсмической волны на каждой глубине. А поскольку для всех глубин, как это было установлено выше, времена вступления сейсмической волны совпадают, определяющий характеристику временной параметр рассчитывается как разность времён пробега на каждой конкретной глубине и на глубине ноль. При таком подходе остаётся неопределённость, обусловленная тем, что времена пробега используются относительные, а время на характеристике — абсолютное. Для устранения неопределённости следует зафиксировать одно из виртуальных времён в очаге, например, базовое. Значение этого виртуального времени в очаге будет определять положение всей характеристики в выбранной системе координат. Время вступления будет равно времени пробега на заданной глубине плюс базовое время.

На схеме рис. 7 отмечены три ключевые точки, определяющие взаимодействие характеристик (А, В, С). Поскольку указанные точки лежат на линиях характеристик, можно определить значения времени в каждой из них, оперируя с параметрами характеристик.

Следуя правилу выше, свяжем времена на характеристиках с осью времён в выбран-

ной системе координат. На рис. 7 ось времени имеет значение 0 в точке пересечения характеристики P -волны с осью времени, т.е. на глубине 0 км. Используя параметры характеристики фазы P , можно определить значения времени в точках А и С, оперируя временами t_0 . Во избежание заблуждения напомним, что значения на характеристике не совпадают со значениями на оси времени. Так, время на оси времени $\tau_A=0$, в то время как на характеристике оно равно $\delta t_0 = t_0^P(h=0)$. Имеем: $\tau_C = t_0^P(h=h^f) - \delta t_0$, где использовано введённое ранее обозначение h^f для базовой глубины.

Характеристика фазы pP позволяет определить значение времени в точке В:

$$\tau_B = \tau_C + t_0^{pP}(h=0) - t_0^{pP}(h=h^f). \quad (7)$$

Из (5) и (5') и определения базовой глубины следует $t_0^P(h=h^f) - t_0^{pP}(h=h^f) = 0$. Из схемы на рис. 7 легко видеть также, что:

$$\begin{aligned} \tau_B - \tau_A &= t_0^{pP}(h=0) - t_0^P(h=0) = \\ &= G^{pP}(r, h=0) - G^P(r, h=0). \end{aligned} \quad (8)$$

Для полного понимания разница по времени между точками А и В в (8) выражена также в величинах времён пробега G^{pP} и G^P .

Динамический подход к обработке данных событий

Выше указывалось, что расчёт структуры линии вспарывания, параметры которой получаются в результате усреднения соответствующих параметров характеристик, технологически легко встраивается в процедуру локации. Следовательно, если вернуться к схеме на рис. 7, можно видеть, что искомым гипоцентр должен лежать на линии (А, С) или на её продолжении. Далее для поиска глубины была привлечена глубинная фаза pP .

Для нахождения времени вступления фазы pP требуется идентифицировать её на сейсмической записи по характерному амплитудному максимуму, после чего запись можно отобразить определённым образом на отрезке (А, В) или его продолжении. Собственно отображение сейсмической записи на отрезке (А, В) заключается в смещении этой записи на величину времени пробега фазы pP и проецировании её на линию вспарывания при помощи характеристики этой фазы, т.е. на отрезок (А, С). В дальнейшем при отображении вдоль линии вспарывания будет удобнее всего оперировать параметром записи, выраженным в единицах энергии.

Действительно, линия вспарывания — это инструментально регистрируемая граница очага. Процесс движения начинается формально на этой линии. Но выделение первых вступлений на инструментальной записи не гарантирует соответствия их началу движения в очаговой зоне. Для определения времени начала движения будем использовать непосредственно интенсивность движения на линии вспарывания. Мерой интенсивности движения в очаге служит энергия регистрируемых сейсмических волн, которую можно оценить, используя теорему Парсеваля для квадрата спектра Фурье, рассчитываемого по записям скоростей смещения. Методика расчётов отчасти напоминает методику, приведённую в работе [Alinaghi, Krüger, 2014], в которой она применяется для обработки данных сейсмических групп. В рамках алгоритма расчёт спектров Фурье для всех записей производится в сочетании с последовательным сканированием в интервале, сопоставимом с временем действия очага. Полученные спектры используются, в частности, для расчёта уровня когерентности сигнала и для выбора частотного интервала и размера окна, которые определяют максимум указанных параметров.

В результате такого сканирования из спектров Фурье получаем величину, которую мы условно назвали «амплитудный параметр». Указанный параметр имеет размерность $\left[\frac{m^2}{c^3} = \frac{m^2}{c^2} \cdot \frac{1}{c} \right]$. Нетрудно видеть, что умножением амплитудного параметра на плотность горных пород (размерность kg/m^3), в которых распространяются волны, можно получить величину удельной энергии в 4D-пространстве $\left[Nm \cdot \frac{1}{m^3 c} \right]$.

Прежде чем перейти к дальнейшему анализу, рассмотрим, как выглядят сейсмические записи, преобразованные в зависимости амплитудного параметра от времени.

Свидетельства развития во времени очаговой зоны до и после первых вступлений

На рис. 8 представлен график амплитудного параметра, полученный обработкой сейсмических записей станций, расположенных на теле сейсмических расстояниях от очаговой зоны землетрясения Мэньюань. Временной интервал выбран на несколько секунд шире интервала предполагаемых движений в пределах очаговой зоны.

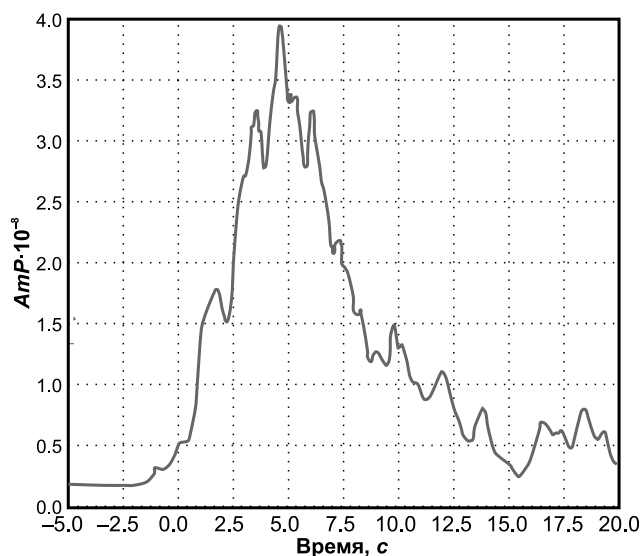


Рис. 8. График амплитудного параметра в координатах времени действия очага

Представленный пример графика амплитудного параметра показывает, что увеличение излучения в очаговой зоне начинается раньше, чем были зарегистрированы первые вступления. Начало координат на графике соответствует виртуальному времени в очаге на линии вспарывания на нулевой глубине. Отсюда следует, что инструментально зарегистрированным началом движений в очаговой зоне следует считать момент, когда амплитудный параметр устойчиво превышает среднее значение шума (уровень микросейсм) перед событием.

Далее приведём краткое описание алгоритма получения сводной (усреднённой по всем станциям, используемым в расчётах) кривой уровня сейсмического излучения в значениях амплитудного параметра. Процедура является модификацией алгоритмов, используемых для автоматического выделения первых вступлений. Подробный разбор указанных алгоритмов можно найти в работе [Sabbione, Velis, 2010]. В работах [Albinhassan et al., 2006; Luo et al., 2002] приведён анализ применения фильтрации *FPS*, которая также используется в нашем алгоритме.

Суть алгоритма состоит в том, что для каждой точки по времени относительно гипоцентра, рассчитанного для нулевой глубины, вычисляется усреднённый амплитудный параметр сейсмической фазы. Интервал времён, для которых ведётся обработка, выбирается таким образом, чтобы его начало включало несколько секунд только записи шума, аналогично тому, как это делают автоматы выделения первых вступлений. Отличие данной процедуры состоит в том, что за фоновый сигнал принимается усреднённая

по всем станциям запись амплитудного параметра. Алгоритм рассматривает фоновый сигнал от момента времени в очаге на линии вспарывания на нулевой глубине в направлении меньших времён. Расчёт ведётся до момента, когда связь амплитудного параметра с данным сейсмическим событием исчезает. Далее полученное значение среднего уровня фонового шума непосредственно перед событием вычитается из получаемых в каждый момент времени значений усреднённого амплитудного параметра.

Для дальнейшего анализа следует также определить глубину и, возможно, длительность действия очага. Начнём с глубины, тем более что ключевым вопросом начатого исследования является метод определения глубин коровых событий. В настоящее время определить глубину распространения очаговой зоны и длительность её действия можно только очень приблизительно. В литературе имеются указания на попытки определения длительности действия очага [Hwang et al., 2011], но там использовались поверхностные волны. Мы же стараемся строить алгоритмы, использующие объёмные продольные волны. Для более строгого решения этого вопроса необходимо продолжение данного исследования.

Рассмотрим изменение амплитудного параметра с глубиной. Для этого будем использовать зависимость амплитудного параметра от времени, спроецированную на линию вспарывания, как было показано выше. Определённая сложность состоит в том, что мы знаем временные ряды параметров (которые можем получить в результате обработки сейсмических записей) только в отдельных точках свободной поверхно-

сти. А нас интересуют процессы, протекающие в глубинах коры, а иногда и глубже.

Учтём, что параметры вдоль характеристик сохраняются. И основным для рассмотрения параметром является время в очаге, которое для всех первых вступлений совпадает (конечно, при условии, что очаг (субочаг) один). Это свойство связано с тем, что сами параметры, измеряемые в момент регистрации, порождены в момент генерации сигнала в фокусе очага. Таким образом, значение параметра на характеристике в любой её точке соответствует по величине значению в точке регистрации (в том числе при $h=0$). С формальной точки зрения, все характеристики фаз (первых вступлений) используются при локации в операции усреднения для получения линии вспарывания. Значения амплитудных параметров на характеристиках нечувствительны к глубине, а усреднённое значение амплитудного параметра на линии вспарывания есть константа.

Характеристики фаз pP пересекают характеристики фаз P , соответствующих одному и тому же фокусу. Пересечения характеристик с линией вспарывания дают некоторую погрешность по сравнению с пересечением самих характеристик. На рис. 9 приведены примеры пересечения характеристик фаз P и pP абстрактного землетрясения для двух эпицентральных расстояний — 25° и 100° . На рис. 9б можно оценить погрешности из-за переноса точек пересечения с характеристик на линию вспарывания (при операции усреднения). Из приведённых схем видно, что максимальные индивидуальные погрешности не превысят по глубине ± 0.75 км (т.е. три шага сканирования), по времени — ± 0.1 с.

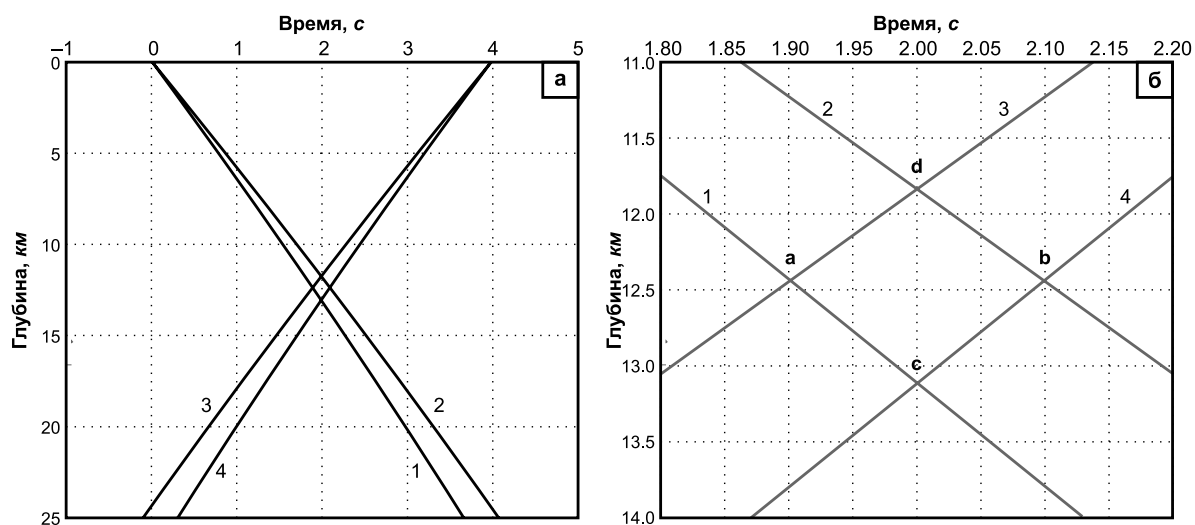


Рис. 9. Примеры взаимного расположения теоретических характеристик фаз P и pP для эпицентральных расстояний 25° (кривая 2), 100° (кривая 3), $h=12.5$ км: а — мелкий масштаб; б — крупный масштаб

Рассмотрим теперь графики амплитудных параметров вдоль линии вспарывания. На рис. 10 представлены графики амплитудных параметров для различных фаз. Линия 1 соответствует фазе P и, как и было указано выше, является константой. Отдельные «неровности» на горизонтальной линии свидетельствуют о погрешностях при переходе от пересечения характеристик с линией вспарывания. Линия 2 на соответствует фазе pP и содержит максимум на глубине $h=14.75$ км. Линия 3 является нормированным вариантом линии 1, для которой интеграл амплитудного параметра приведён к интегралу кривой 1 на интервале с момента начала до момента окончания действия очага.

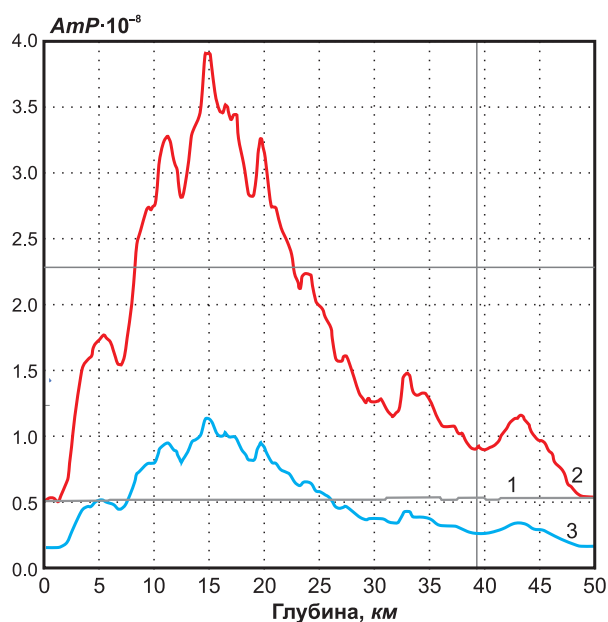


Рис. 10. Пример работы алгоритма определения глубины по максимуму амплитудного параметра фазы pP (пояснения в тексте)

Другой пример амплитудного параметра, рассчитанного для Учтурфанского (Уши) землетрясения, произошедшего 22 января 2024 г. на границе Кыргызстана и Китая [Соколова и др., 2024], приведён на рис. 11. Сравнение рис. 11 с графиком на рис. 8 показывает их очевидное сходство, хотя различия в деталях также имеются. Эти различия демонстрируют индивидуальные особенности внутреннего движения в очаговой зоне и, вероятно, раскрывают работу отдельных субочагов.

Очевидно, одних записей события недостаточно для получения информации как о размерах очаговой зоны, так и о движениях внутри самой зоны. Для этого необходимо иметь модель, описывающую трансформацию движе-

ний внутри очаговой зоны в параметры, которые могут быть инструментально зарегистрированы за её пределами.

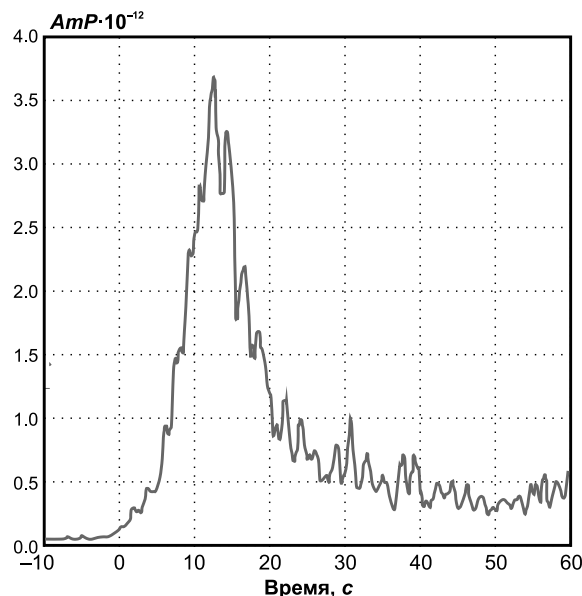


Рис. 11. График амплитудного параметра Учтурфанского землетрясения 22 января 2024 г. на границе Кыргызстана и Китая

Учитывая характер влияния эпицентрального расстояния на время в очаге (рис. 3), в дальнейшем анализе мы ограничимся сейсмическими записями только в телесеismicкой зоне. Также мы будем использовать только начальные части записей, содержащие вступления волн P и pP . Длительность этих интервалов записей в зависимости от эпицентрального расстояния может быть от 25 до 60 с. Ориентируясь на рис. 7, этот участок записи можно ассоциировать с отрезком (А, В) оси времён.

Рассмотрим подробнее, как формируется участок сейсмической записи между точками А и В. Предположим, что в некоторой точке отрезка (А, С) на глубине h_1 расположен фокус сейсмического события. Очевидно, это приведёт к появлению вступления импульса фазы P в точке А и вступлением фазы pP на отрезке (А, В) в некоторой точке t_1 . Пусть на глубине h_2 расположен также второй фокус. Тогда в точке А добавится вступление (импульс) фазы P , а вступление (импульс) pP добавится в точке t_2 . График амплитудного параметра фазы P тогда будет представлять собой прямую, параллельную оси абсцисс на уровне суммы амплитудных параметров в точках h_1 и h_2 . График для фазы pP будет иметь два отдельных импульса, порождённых в точках h_1 и h_2 на оси (А, С), где характеристики $\chi^{pP}(t_1)$ и $\chi^{pP}(t_2)$ пересекают характеристику χ^P .

В приведённых рассуждениях неявно использовалось предположение о том, что излучения продольных волн P не ограничиваются первыми вступлениями, а заполняют весь участок (А, В) на рис. 7. Очевидно, на этом участке присутствуют также вступления волн pP , порождённых тем же субочагом. В дальнейшем предстоит распространить исследование с помощью разработанных инструментов на всю очаговую зону.

Заключение

В заключение обратим внимание на то, что, проводя анализ фактической возможности решения математической задачи, часто не уделяется должного внимания физической сущности процесса в окружающей среде. Речь здесь идёт о задаче локации и дальнейшего применения её результатов. Следует отметить, что проведённый анализ не отрицает возможности использовать среднеквадратичную невязку вида (3) в качестве критерия выбора глубины события. Более того, при условии, что все используемые первые вступления находятся в одном из трёх интервалов эпицентральных расстояний (в соответствии с рис. 3) и ошибки измерения времён первых вступлений (e_m) незначительны, $R(h)$ будет достигать минимума в области пересечения линий характеристик, как это следует из (6). При этом предполагается, что источником первых вступлений является конкретный очаг.

В настоящее время провести анализ работоспособности указанного алгоритма удалось только при использовании данных, полученных на станциях в телесеismicкой зоне. Очевидно, чем компактнее область пересечения характеристик и чем больше число станций, тем алгоритм будет более чувствителен к пробному изменению глубины. Не следует забывать при этом, что в реальных и достаточно «благоприятных» условиях, изменения величины $R(h)$ составят десятые и сотые доли секунды.

Остаётся определить, насколько минимум $R(h)$, являющийся результатом математической процедуры, соответствует физически месту первого по времени выделения seismicкой энергии. Это связано с тем, что именно выделение энергии при движении в очаге является фактором влияния очага seismicкого события на окружающую среду.

Приведённое в статье описание алгоритма определения глубины по максимуму амплитудного параметра пары фаз P и pP работает при условии, когда возможно определить, а точнее, разделить величины амплитуд указанных

фаз. Для случаев достаточно простых очагов (без деления на субочаги) алгоритм срабатывает. Для некоторых нередких случаев сложных очаговых зон применение указанного алгоритма связано с проведением дополнительного исследования распределения субочагов в очаговой зоне. Выявленная ранее особенность в виде возникновения излучения seismicкой энергии до момента регистрации первых вступлений указывает на неполноту нашего представления о процессах в очаговой зоне.

В дополнение следует отметить статью [Craig, 2019], где исходные положения и сформулированная цель работы совпадают с принятыми, но ход рассуждений и разработанный алгоритм достаточно далёк от приведённого в данной работе.

В настоящее время автор сосредоточен на построении унифицированного набора указанных алгоритмов и сведения их в рамки одного программного продукта, предназначением которого является комплексное исследование очаговой зоны. Приведённые в списке литературы работы, направленные на исследования сложных очаговых зон, и прилагаемые при этом усилия говорят о том, что вопрос разработки алгоритмов анализа внутренней структуры очаговых зон давно назрел.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00604-25) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного seismicкого мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- 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.
- Епифанский А.Г., Дуленцова Л.Г. Модель очаговой зоны и определение глубин на основе амплитуд фаз pP // Российский сейсмологический журнал. — 2024. — Т. 6, № 2. — С. 82–95. — DOI: 10.35540/2686-7907.2024.2.06. — EDN: ZJZCMC
- Епифанский А.Г., Дуленцова Л.Г. Модель очаговой зоны и глубины коровых событий // Российский сейсмологический журнал. — 2022. — Т. 4, № 4. — С. 24–41. — DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.02. — EDN: HJAMWX

Кондорская Н.В. Выделение волны pP при неглубоких землетрясениях и ее использование для определения глубины очага. — М.: Издательство Академии наук, 1956. — С. 35–47.

Соколова И.Н., Габсатарова И.П., Берёзина А.В., Аристов И.Л. Сильное землетрясение 22 января 2024 г. с $M_w=7.0$ на юге Тянь-Шаня // Российский сейсмологический журнал. — 2024. — Т. 6, № 1. — С. 42–64. — DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.03. — EDN: KHSGBI

Albinhassan N.M., Luo Y., Al-Faraj M.N. 3D edge-preserving smoothing and applications // Geophysics. — 2006. — V. 71, Iss. 4. — P. 5–11. — DOI: 10.1190/1.2213050

Alinaghi A. Krüger F. Seismic array analysis and re-determination of depths of earthquakes in Tien-Shan: implications for strength of the crust and lithosphere // Geophysical Journal International. — 2014. — V. 198, Iss. 2. — P. 1111–1129. — DOI: 10.1093/gji/ggu141

Červený V., Ravindra R. Theory of seismic head waves // American Association of Physics Teachers. — 1973. — V. 41. — P. 755–757. — DOI: 10.1119/1.1987374

Craig T.J. Accurate depth determination for moderate-magnitude earthquakes using global teleseismic data // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2019. — V. 124, Iss. 2. — P. 1759–1780. — DOI: 10.1029/2018JB016902

Geiger L. Probability method for determination of earthquake epicenters from arrival time only // Bul-

letins of the Saint Louis University. — 1912. — V. 8. — P. 60–71.

Hwang R.-D., Chang J.-P., Wang C.-Y., et al. Rise time and source duration of the 2008 M_w 7.9 Wenchuan (China) earthquake as revealed by Rayleigh waves // Earth, Planets and Space. — 2011. — V. 63. — P. 427–434. — DOI: 10.5047/eps.2011.01.002

Kennett B.L.N. Seismic wave propagation in stratified media. — Canberra: ANU Press, 2009. — 288 p. — DOI: 10.26530/OAPEN_459524

Kennett B.L.N. Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. — 1991. — V. 105, Iss. 2. — P. 429–465. — DOI: 10.1111/J.1365-246X.1991.TB06724.X

Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R.P. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel-times // Geophysical Journal International. — 1995. — V. 122, Iss. 1. — P. 108–124. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x

Luo Y., Marhoon M., Dossary S.A., Alfaraj M. Edge-preserving smoothing and applications // The Leading Edge. — 2002. — V. 21, Iss. 2. — P. 136–158. — DOI: 10.1190/1.1452603

Sabbione J.I., Velis D. Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms // Geophysics. — 2010. — V. 75, Iss. 4. — P. V67–V76. — DOI: 10.1190/1.3463703

Сведения об авторе

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

Focal zone model and seismic event location based on amplitudes pP phases

© 2025 A.G. Epifansky

GS RAS, Obninsk, Russia

Received February 3, 2025

Abstract This article is written as a continuation of the previous issues by the theme “Focal zone model”. Work carried out in a frame of investigation directed to elaboration of automated determination of the core events depth. As a base tool, a modified algorithm of location was used, supplemented with the simplex method of minimization. Early studies showed that the method built on the basis of an over determined mathematical task solution, that determined a point, doesn't take into account the main aspect – the effect bias to the environment determined by volume and distribution of movements inside the focal zone. Criteria of received solution is minimum of Root Mean Square residuals (RMS). In solution of the formulated task depth phases pP were used. The detailed investigation showed that it is possible to consider that radiation from source of P waves is a continuation on initial stage of a source activity. The same can be said for pP phases registration. This give us the ability to construct an algorithm using the maximum of the seismic energy radiation as a criterion of the final solutions.

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

For citation Epifansky, A.G. (2025). [Focal zone model and seismic event location based on amplitudes pP phases]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 7(1), 58-73. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.1.04>. EDN: QJSJVI

References

- Albinhassan, N.M., Luo, Y., & Al-Faraj, M.N. (2006). 3D edge-preserving smoothing and applications. *Geophysics*, 71(4), 5-11. DOI: [10.1190/1.2213050](https://doi.org/10.1190/1.2213050)
- Alinaghi, A., & Krüger, F. (2014). Seismic array analysis and redetermination of depths of earthquakes in Tien-Shan: implications for strength of the crust and lithosphere. *Geophysical Journal International*, 198(2), 1111-1129. DOI: [10.1093/gji/ggu141](https://doi.org/10.1093/gji/ggu141)
- Červený, V., & Ravindra, R. (1973). Theory of seismic head waves. *American Association of Physics Teachers*, 41, 755-757. DOI: [10.1119/1.1987374](https://doi.org/10.1119/1.1987374)
- Craig, T.J. (2019). Accurate depth determination for moderate-magnitude earthquakes using global teleseismic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(2), 1759-1780. DOI: [10.1029/2018JB016902](https://doi.org/10.1029/2018JB016902)
- Epifansky, A.G. (1983). [Determination of hypocenter parameters and earthquake magnitudes in the teleseismic zone (EPI-74)]. In *Algorithm i praktika opredeleniya parametrov gipotsentrov zemletryaseniya na EVM* [Algorithms and practice of determining the parameters of earthquake hypocenters on a computer] (pp. 92-98). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Epifansky, A.G., & Dulentsova, L.G. (2022). [Model of focus zone and depth of crust events]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(3), 24-41. (In Russ.). DOI: [10.35540/2686-7907.2022.4.02](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.4.02). EDN: HJAMWX
- Epifansky, A.G., & Dulentsova, L.G. (2024). [Focus zone model and determination based on amplitudes of pP phases]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(2), 82-95. (In Russ.). DOI: [10.35540/2686-7907.2024.2.06](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.06). EDN: ZJZCMC
- Geiger, L. (1912). Probability method for determination of earthquake epicenters from arrival time only. *Bulletins of the Saint Louis University*, 8, 60-71.
- Hwang, R.-D., Chang, J.-P., Wang, C.-Y., et al. (2011). Rise time and source duration of the 2008 MW 7.9 Wenchuan (China) earthquake as revealed by Rayleigh waves. *Earth, Planets and Space*, 63, 427-434. DOI: [10.5047/eps.2011.01.002](https://doi.org/10.5047/eps.2011.01.002)
- Kennett, B.L.N., & Engdahl, E.R. (1991). Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105(2), 429-465. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x)
- Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R., & Buland, R.P. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from travel-times. *Geophysical Journal International*, 122(1), 108-124. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x)
- Kennett, B.L.N. (2009). *Seismic wave propagation in stratified media*. Canberra: ANU Press, 288 p. DOI: [10.26530/OAPEN_459524](https://doi.org/10.26530/OAPEN_459524)

- Kondorskaya, N.V. (1956). *Vydelenie volny pP pri neglubokih zemletryasenyah i ee ispol'zovanie dlya opredeleniya glubiny ochaga* [Isolation of the pP wave in shallow earthquakes and its use to determine the depth of the hearth] (pp. 35-47). Moscow, Russia: House of the Academy of Sciences Publ. (In Russ.).
- Luo, Y., Marhoon, M., Dossary, S.A., & Alfaraj, M. (2002). Edge-preserving smoothing and applications. *The Leading Edge*, 21(2), 136-158. DOI: 10.1190/1.1452603
- Sabbione, J.I., & Velis, D. (2010). Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms. *Geophysics*, 75(4), V67-V76. DOI: 10.1190/1.3463703
- Sokolova, I.N., Gabsatarova, I.P., Beryozina, A.V., & Aristova, I.L. (2024). [Large earthquake on January 22, 2024 with $M_w=7.0$ in the south of Tien Shan]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(1), 42-64. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.03. EDN: KHSGBI

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