УДК 550.34.06.013.3

# Модель очаговой зоны и определение глубин на основе амплитуд фаз *pP*

## © 2024 г. А.Г. Епифанский, Л.Г. Дуленцова

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

Поступила в редакцию 06.10.2023 г.

Аннотация. Анализ трудностей, связанных с определением глубины корового тектонического сейсмического события, определяется особенностью процесса вспарывания. Детальный анализ показал, что среди набора первых вступлений, ассоциируемых с событием, присутствуют вступления, сгенерированные на различных глубинах. Это указывает на наличие в очаговой зоне нескольких инструментально определяемых субочагов. Следовательно, алгоритм локации должен выделять несколько наиболее значимых по амплитуде первых вступлений. Тогда определять глубину сейсмического события будет очаг, излучающий максимальный по интенсивности сейсмический сигнал. Исследование показало – при определённых условиях сейсмические волны, порождённые на различных глубинах, для каждого эпицентрального расстояния проецируются в одну точку на оси сейсмической записи. То есть, один импульс первого вступления может соответствовать нескольким глубинам. Откуда следует принципиальная трудность определения глубины исключительно по первым вступлениям – фазам Р. Решением проблемы является автоматическое определение времён вступлений глубинных фаз рР. Последние должны быть ассоциированы с первыми вступлениями (фазы P), обе фазы должны относиться к одному и тому же сейсмическому сигналу, сгенерированному на определённой глубине. Глубина события выбирается по глубинным фазам, имеющим наибольшие амплитуды. Алгоритм использует при расчётах все записи одновременно. Более того, выявлено наличие локальных повторных событий после зарегистрированных первых вступлений. Повторные очаги имеют временную задержку в пределах секунд. Амплитуды импульсов повторных событий могут быть больше амплитуд импульсов первого вступления на данной глубине. В целом, группа повторных вступлений оказывается в пределах периода очагового импульса основного события.

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

Для цитирования: 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: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.06. – EDN: ZJZCMC

#### Введение

В сейсмологии принято относиться к сейсмическим событиям как к индивидуальным сущностям. Но в то же время, в практике локации сейсмического очага некоторые особенности волновых форм событий обычно игнорируются. Здесь и далее мы говорим о телесейсмических событиях. Процедуры обработки данных в локации должны быть максимально унифицированы. Именно это позволяет с уверенностью сравнивать результаты, получаемые при обработке сейсмических событий различной природы.

Строгая унификация математических процедур не является обязательным требованием. Это де-факто сложившаяся практика. Появление новых математических процедур и построенных на их основе алгоритмов воспринимается сейсмологическим сообществом с определённым скепсисом.

Тем не менее, сами процедуры и алгоритмы локации за последние полвека претерпели существенные доработки в деталях. В подавляющем большинстве это модификации вычислительных процедур. В целом алгоритмы локации, используемые большинством сейсмологических агентств, остаются построенными по традиционной схеме технологии Гейгера. В основе указанной технологии лежит решение Коши для переопределённых систем условных уравнений. В технологии Гейгера важным элементом алгоритма решения задачи локации является про-

цедура браковки первых вступлений, имеющих аномально большие различия между реальными временами вступлений и теоретически рассчитываемыми для заданного гипоцентра. В сейсмологии принято указанные разницы называть «станционными невязками». В силу того, что в работе используются две фазы (первая P и глубинная pP), будем называть указанную разность наблюдённых и теоретически рассчитываемых значений времён вступлений «фазовой невязкой».

Процедура браковки вступлений, дающих большие невязки (это относится к первым вступлениям, с которыми процедуры локации и работают), позволяет выбрать набор первых вступлений, дающих минимальную величину значения оценочной функции - среднеквадратичной невязки.

Указанный подход основан на предположении случайного характера происхождения фазовых невязок. Ошибки принимаются случайными в том смысле, что их происхождение не связано с очагом сейсмического события, а являются исключительно ошибками измерения. К ошибкам измерения следует отнести и ту часть значения невязки, которая порождается особенностями параметров среды распространения сигнала для данного вступления.

На основе предположения о случайности ошибок бракуемых данных построены все алгоритмы браковки. Работа [Bondár, Storchak, 2011] посвящена описанию проводимых в Международном сейсмологическом центре (ISC) работ, направленных на улучшение результатов локации, включая новые методы подбора исходных данных.

В результате проводимого исследования, посвящённого проблемам определения глубин коровых событий в автоматическом режиме, были обнаружены некоторые факты, связанные с исходными данными – наборами первых вступлений.

Ранее [Епифанский, Дуленцова, 2022] было показано, что источники первых вступлений располагаются на различных глубинах. Другими словами, первые вступления, порождённые началом движения в очаге, не обязательно происходят с одной и той же глубины. То есть одно и то же вступление может быть результатом множества субочагов в очаговой зоне. При этом под положением субочагов подразумеваются не только их пространственные координаты, но и время происхождения. Временные задержки могут составлять секунды. Данное утверждение подробно рассматривается ниже.

Далее детально анализируется расположение субочагов на поверхности разрыва в координатах время-глубина, пересекающей очаговую зону.

Смена модели очаговой зоны на включающую несколько субочагов, распределённых на протяжении всей толщины коры, вызывает необходимость указать некоторые особенности последней.

1. Если модель включает несколько субочагов, значит, на каждой сейсмограмме должно быть несколько первых вступлений. Но в соответствии с существующей моделью, по определению, на каждой записи сейсмического события может быть только одно первое вступление.

2. Очевидно, каждое из многих «первых вступлений» имеет свою амплитуду. Что с неизбежностью влечёт вероятность пропуска вступлений с малой амплитудой на фоне других импульсов. Как правило, амплитуды импульсов на начальном участке сейсмограммы растут. Вопрос: есть ли возможность определить пропущенные вступления, вступления с амплитудами меньше «уровня шума»? Термин «уровень шума» относится к импульсам на сейсмической записи, не относящимся к импульсам первых вступлений от субочагов. Другими словами, есть ли возможность выделить первые вступления с отношением сигнал/шум меньше единицы?

3. Ранее было установлено: если рассчитать гипоцентры для фиксированных глубин, оказывается, на некоторой плоскости они выстраиваются в некоторую линейную структуру, названную линией вспарывания. Вопрос: как интерпретировать эту линейную структуру?

4. Что считать глубиной корового сейсмического тектонического события? Каковы могут быть критерии для выбора одного субочага из многих?

В процедуре локации мы получаем новую информацию благодаря совместному использованию выделенных на записях времён вступлений. Новой информацией формально являются координаты очага. Эту информацию мы получаем из информации о координатах установки сенсоров и времён вступлений, снимаемых с сейсмограмм. Она появляется благодаря свойству эмерджентности - совместному использованию независимых данных (основной смысл термина состоит в том, что совместная обработка регистрируемых записей проявляет некоторые свойства, которые нет возможности увидеть при обработке каждой записи в отдельности). В дальнейшем мы широко будем пользоваться этим свойством.

В рамках исследования были разработаны новые алгоритмы обработки сейсмических

83

данных, дополняющие алгоритмы традиционной локации.

# Линии вспарывания, первые вступления и фазовые невязки

Ранее обнаружено, что получаемые в результате расчёта эпицентров при фиксировании глубин гипоцентры выстраиваются в виде линейной структуры. Рабочее название структуры — линия вспарывания. Параметрами, однозначно определяющими положение вдоль линии вспарывания, могут быть либо глубина, либо время.

Похожие на указанные линейные структуры можно получить из годографов сейсмических фаз и, в первую очередь, для *P*-фазы. Для этого достаточно построить график разности времён пробега для набора глубин и нулевой глубины при различных эпицентральных расстояниях. Следует заметить, что для эпицентральных расстояний от 25 до 100 угловых градусов для фаз *P* значения указанной разности (которая растёт монотонно с глубиной и эпицентральным расстоянием) для глубины 50 *км* не превышает одной секунды.

Таким образом, свойства линии вспарывания для каждого сейсмического события определяются набором первичных данных (первые вступления) и свойствами среды распространения сейсмических волн.

Важной особенностью линий вспарывания является её ортогональность оси сейсмической записи. Это определяется тем, что все события, происходящие на линии вспарывания, проецируются в точку на оси каждой сейсмограммы. По крайней мере, на протяжении всей толщины коры.

В работе [*Епифанский*, *Дуленцова*, 2022] применён модифицированный метод локации, связанный с определением эпицентра события при фиксированной глубине и с перебором глубин. В результате мы получаем не один гипоцентр, а целую серию, которая выстраивается в линию.

В применяемом алгоритме для поиска первого приближения используется традиционный подход, основанный на методе «градиентного спуска». Затем гипоцентр уточняется симплексметодом для каждого значения глубины. Стандартная процедура браковки вступлений с большими невязками не применяется.

Решение строится на основе минимизации фазовых невязок и согласования решения по величине среднеквадратичной невязки.

Фазовая невязка представляет собой основной рабочий параметр и определяется выражением:

$$\tau(Z, r_{\rm m}) = t_{\rm m}^0 - t_{\rm m}^{\rm C}(Z, r_{\rm m}) + e_{\rm m}, \qquad (1)$$

где  $\tau(Z,r_m)$  — невязка времени распространения фазы *m*,  $t_0(Z)$  — время в очаге, Z — глубина гипоцентра (хорошо осознавая, что гипоцентр включает три пространственных координаты и одну временную, мы в работе рассматриваем только две координаты — глубину и время, поэтому все результаты будут представляться в этих координатах, когда это не мешает пониманию результатов). Величина  $e_m$  — ошибка измерения времени вступления. Переменная  $t_m^{\rm C}$  — теоретическое время вступления фазы *m*.

$$t_{\rm m}^{\rm C}(Z, r_{\rm m}) = t_0(Z) + Y(Z, r_{\rm m}),$$
 (2)

где  $t_0(Z)$  – время в очаге,  $Y(Z,r_m)$  – время распространения сейсмической фазы в соответствии с годографом,  $r_m$  – эпицентральное расстояние до сенсора, зафиксировавшего фазу *m*. Индекс m (m = 1, ..., M) определяет сейсмическую фазу. Отметим, что сейсмических фаз, измеренных на одной записи, может быть больше одной.

В выражении (1) невязка и время в очаге являются функциями глубины. Например, с увеличением глубины время распространения фазы *P* согласно таблицам годографа уменьшается. Поскольку в выражение (1) входят параметры, которые подлежат определению в результате процедуры локации, последняя содержит итерационный процесс.

Ранее в работе [*Епифанский*, *Дуленцова*, 2022] показано, что время в очаге  $t_0(Z)$  представляет собой гладкую монотонно растушую функцию глубины. Из (1) видно, что с ростом глубины *Z* изменяются два слагаемых, приведённых в (2): время в очаге  $t_0(Z)$  и время распространения фазы  $mY_m(Z,r_m)=Y(Z,r_m)$ , которое уменьшается. Строго говоря, при анализе выражений (1) и (2) и требуется учитывать, что Y(Z,r) - функция двух переменных. Значение функции уменьшается с увеличением значения первого параметра и увеличивается при увеличении второго.

Обработка большого числа событий показывает, что увеличение времени в очаге при движении вдоль линии вспарывания не компенсирует уменьшения времён распространения для каждой фазы. Это справедливо для коровых событий. Тем самым значения невязок уменьшаются при приближении к решению.

Это же демонстрирует изменение с глубиной графика среднеквадратичной невязки (рис. 1), которая в традиционных методах локации служит критерием качества решения. График получен при обработке события 07.01.2022 г.,

произошедшего в Китае, провинция Цинхай (Qinghai). Время в очаге  $-t_0=17:45:03.1$ , координаты события  $-37.9814^{\circ}N$ ,  $101.3411^{\circ}E$ ,  $h=12.5 \ \kappa M$ .





Из графика (рис. 1) видно, что в указанном диапазоне глубин отрицательный экстремум среднеквадратичной невязки для события 7 января 2022 г. отсутствует.

Выражение для среднеквадратичной невязки имеет вид:

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

где *n* — число независимо определяемых параметров эпицентра, т.е. *n*=3 в нашем случае. Напомним, что глубина в вычислениях всегда фиксирована.

На поиске минимума функции R в трёх- или двухмерном пространстве построено большинство традиционных алгоритмов локации. Этот же критерий используется и в рассматриваемом алгоритме.

Рис. 1 демонстрирует медленный рост среднеквадратичной невязки, начиная с нулевой глубины. Иногда, при обработке событий, имеющих достаточно большое число первых вступлений, наблюдается наличие слабо выраженного минимума. Но значимым этот минимум, как правило, назвать нельзя. Это указывает на то, что построение устойчивого алгоритма автоматического определения глубин коровых событий достаточно проблематично.

В результате построения набора гипоцентров через равные промежутки глубин мы получаем в пространстве-времени линию, которая в работе [*Епифанский*, *Дуленцова*, 2022] названа «линией вспарывания». На рис. 2 приведён пример графика линии вспарывания в координатах время глубина. Результат получен при обработке события 7 января 2022 г., произошедшего в Китае.



Рис. 2. Линия вспарывания для события 7 января 2022 г. в Китае (в координатах время—глубина)

Таким образом, линия вспарывания — расчётный параметр, определяемый по первым вступлениям, ассоциированным с событием. И главное, на что следует обратить внимание, это факт проявления линии вспарывания, которое, по нашим результатам, есть свойство среды. Несмотря на тот факт, что линия вспарывания (рис. 2) получена для конкретного события, линии вспарывания в виде подобном изображённому на рис. 2 выявились в результатах всех обработанных нами событий. Отклонения для индивидуальных событий определяются набором первых вступлений.

И ещё одно важное замечание. Нигде в сейсмологической литературе нет указания на термин «одновременности». Указанная ранее ортогональность линии вспарывания осевой линии сейсмограммы указывает на «одновременность» регистрации порождающих сейсмические фазы *P* процессов. В математике линии, вдоль которых некоторые параметры остаются постоянными, называют характеристиками.

Установленное в результате исследования совпадение, хотя бы частичное, линии гипоцентров (линии вспарывания) и характеристики вызывает удивление. И возникает вопрос: можно ли вообще определить глубину корового события по вступлениям фаз *P*?

Действительно, если предположить, что очаг, а точнее субочаг в нашей терминологии, один, то минимум среднеквадратичной невязки должен указывать на источник. Решение Коши для переопределённой системы в этом случае применимо. Среднеквадратичная невязка представляет собой модуль ортогонального к пространству решения пространства ошибок [*Епифанский*, 1983]. Но, как было показано ранее, предположение о единственности очага представляется в большинстве случаев ложным. Первые вступления (фазы *P*) оказываются эмитированы на различных глубинах. В этих условиях определить решение для системы условных уравнений методом Коши уже невозможно.

По указанной причине требуется искать другие способы определения решения для определения глубины.

## Глубинные фазы *pP* и характеристики

Впервые на глубинные фазы *pP* с точки зрения применения их в локации обратили внимание? А.В. Введенская [*Введенская*, 1956] и Н.В. Кондорская [*Кондорская*, 1956]. Нас в первую очередь эти фазы интересуют из-за совпадения их формы очагового импульса с импульсом фаз *P*. Фаза *pP* претерпевает только одно отражение от свободной поверхности, при котором форма импульса сохраняется. Обсуждение вопроса сохранения и модификации форм очаговых импульсов при отражениях можно найти в [*Červeny, Ravindra*, 1973; *Kennett*, 2009].

Учитывая это, при известном вступлении фазы *P* оказывается возможным найти на сейсмограмме импульс аналогичной формы с запаздыванием фазы *pP* относительно первого вступления [*Епифанский*, 1985]. Для получения численной оценки совпадения форм импульсов на сейсмограммах был разработан метод «Согласования спектральных фаз» (ССФ) и построен алгоритм. Ниже приведены расчётные формулы. Здесь мы рассмотрим алгоритм применения указанного метода при определении глубин.

Выше мы достаточно подробно рассмотрели линию вспарывания, близкую к характеристике фаз Р. Аналогичную характеристику можно построить для фазы рР. Очевидно, трудно ожидать на одной сейсмограмме при неизвестных углах выхода фаз Р и рР определённой закономерности в соотношении амплитуд вертикальных компонент. Но если количество станций достаточно, то при хорошем распределении по поверхности земли (здесь даны оценочные термины, но практически для всех заметных сейсмических событий достаточное для локации традиционными алгоритмами число и распределение станций является достаточным и в указанном смысле) наблюдается, что для глубинной фазы амплитуды в среднем выше, чем у фазы Р. Учитывая это обстоятельство, а также то, что начальную часть записи формируют в основном фазы *P*, опять в среднем для глубинных фаз амплитуды будут заметно выделяться на фоне сейсмической записи.

Теперь заметим, что линия вспарывания, как показано выше, есть место потенциальных вступлений фаз P. Двигаясь вдоль линии вспарывания, мы можем предполагать наличие в каждой точке вступления фазы P. Учитывая разницу в запаздываниях указанных фаз, мы находим время вступления фазы pP (пока только предполагаемое). Остаётся проверить методом ССФ в указанных точках уровень согласования импульсов предполагаемых вступлений. Если уровень согласования (когерентности) достаточно велик, мы проверяем в среднем соотношение амплитуд. Последние две проверки мы называем критерием парности.

Словесное описание центрального в работе алгоритма выделения глубинной фазы *pP* приведено далее.

По первоначальным первым вступлениям рассчитывается линия вспарывания. На этой линии для каждой глубины и для каждого сенсора (координат установки сенсора) выбирается потенциальное новое вступление, считающееся вступлением волны. Для этого вступления, а по сути, это вступление, порождённое новым субочагом, находим по годографу время вступления парной фазы. И так для каждого сенсора.

Далее, по стандартной процедуре нового алгоритма рассчитываем усреднённые значения амплитудных параметров для полученных фаз. Для признания указанных двух импульсов парными сейсмическими фазами они должны удовлетворять следующим требованиям:

 временная разница между вступлениями,
с учётом разности времён пробега, не должна превышать <sup>1</sup>/<sub>8</sub> среднего периода для круговой частоты спектральных фаз;

— значение амплитудного параметра фазы pP должно быть в среднем больше амплитудного параметра фазы P с допустимым разбросом  $\pm \frac{1}{4}$  средней величины.

В целях реализации описанной выше процедуры в рамках проекта разработан ряд алгоритмов. Ниже приведены основные расчётные формулы с необходимыми комментариями.

## Основные расчётные формулы метода ССФ и вычисления амплитудного параметра

В случае дискретного преобразования Фурье, компоненту преобразования для заданной частоты можно представить в виде:

$$H(f_k) = \rho(f_k)e^{i\varphi(f_k)}, \qquad (4)$$

где  $f_k$  — частота, для которой вычислена компонента, k (k=1, ..., K) — индекс частоты, K — число частот. Параметры  $\rho$ ,  $\phi$  — спектральные амплитуда и фаза.

При вычислении уровня согласования Ф модули спектральных амплитуд считаются равными единице (т.е. просто игнорируются):

$$\Phi = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \left( \frac{\left\| \sum_{m=1}^{M} e^{i\phi(f_k)} \omega_m \right\|}{\sum_{m=1}^{M} \omega_m} \right).$$
(5)

Формально он служит некоторой весовой функцией. Но в реальности этот параметр позволяет оперировать в вычислениях знаком вступления соответствующей фазы.

Введём обозначение квадрата амплитуды скорости смещения в импульсе на записи термином «амплитудный параметр», который вычисляется по значениям амплитудной части спектральных компонент преобразования Фурье:

$$A = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \left( \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \rho_{m}^{2}(f_{k}) \cdot f_{k}^{2} \cdot \delta f \right), \qquad (6)$$

где  $\delta f$  — шаг дискретизации сейсмограммы, индексы m (m=1, ..., M) и k (k=1, ..., K) относятся к сенсорам и частотам соответственно. Спектральные компоненты выбираются только те, для которых подтверждено совпадение (уровень совпадения  $\Phi > 0.7$ ). Для указания, по каким сейсмическим фазам P и/или pP рассчитывался амплитудный параметр, аббревиатуры этих фаз указываются в качестве верхнего индекса через запятую, если это необходимо. В заключение заметим, что в выражении (5) суммирование по индексу K должно быть внешним, для выражения (6) порядок суммирования произволен.

Кроме традиционных плоских графиков, в работе широко используется представление результатов в виде цветных диаграмм, на которых на прямоугольной площадке координат цветом отображается значение двумерной функции. Справа отображается линейка соответствия цвета числовым значениям функции. Под линейкой приведён множитель для значений амплитудного параметра, если он отличен от единицы.

Алгоритм построения диаграмм следующий. За базовые значения времени на диаграмме выбираются относительное время в очаге и координаты гипоцентра для каждой глубины. При сканировании по времени (при сканировании вдоль временной оси) для каждой точки сканирования изменяется время начала отрезка преобразования на величину разности базового времени и рассчитываются значения параметра когерентности и амплитудного параметра.

Относительное время означает разность времени в очаге для гипоцентра на заданной глубине со временем в очаге для гипоцентра на нулевой глубине.

Далее применяется расчёт значения функций по формуле (5) для диаграмм когерентности или (6) для диаграмм амплитудного параметра.

В данной работе будут представлены исключительно диаграммы в координатах время—глубина.

Применяя описанную процедуру (алгоритм) для всех сейсмических записей и суммируя результат, нам удаётся при уровне согласования от 0.7 до 1.0 определить или уточнить моменты вступления обеих фаз одновременно. В этой процедуре мы также воспользовались свойством эмерджентности.

На рис. 3 приведены графики амплитудного параметра по глубине для фаз *P* и *pP*. Несмотря на то, что графики построены по глубине, они легко могут быть пересчитаны на время по графику на рис. 2.



**Рис. 3.** Графики амплитудного параметра для фаз *P* (1) и *pP* (2).

Графики построены вдоль линии вспарывания. График (1) представляет собой линию, которая хорошо аппроксимируется прямой линией в диапазоне глубин, где график (2) имеет максимальные значения

На рис. 3 максимум значения амплитудного параметра находится на глубине 14.7 км. По данным IRIS, глубина составляет 13 км. Близкое к этому значение глубины имеет предыдущий перед глобальным максимум локальный – 13.44 км.

Заметим, что графики построены не по начальным первым вступлениям, а по вступлениям, которые определены в соответствии с разработанным алгоритмом локации.

Ранее мы ввели понятие «характеристики» или «характеристической линии». Следует уточнить, что характеристическая линия строится относительно времени. Уточним также, каким образом мы можем построить эти характеристики. Выражение (1) при условии, что  $e_m = 0$  для каждого m (m=1, ..., M), может быть приведено к виду:  $t_m^C = t_m^0 - \tau_m$ . Если теперь положить  $\tau_m = 0$ , то, учитывая (2), мы получим уравнение для характеристической линии:

$$t_{\rm m}^{0}(Z) + Y(Z, r_{\rm m}) = t_{\rm m}^{0} - \tau_{\rm m}, \qquad (7)$$

где  $\tau_m = \tau(Z, r_m)$  – невязка,  $t_m^0(Z)$ . – время в очаге для вступления m (m=1, ..., M). В результате мы получили, что характеристика для вступления m есть просто время в очаге для каждого вступления при сканировании по глубине.

Вполне очевидно, что при условии совпадения глубин эмиссии первых вступлений все характеристики совпадают при условии  $e_m=0$ для всех допустимых *m*. Если последнее условие не выполнено, то характеристики не будут совпадать.

Заметим, что время в очаге для события в целом определяется как среднее значение от

$$t_{\rm m}^0$$
, t.e.  $t_0(Z) = \frac{1}{M} \sum_{\rm m=1}^{\rm M} t_{\rm m}^0(Z)$ .

Из сказанного следует, что характеристики в реальных ситуациях распределены относительно некоторой средней линии.

#### Очаговая зона сейсмического события

Основным объектом исследования в данной работе является модель очаговой зоны. Разбор возможных моделей мы начали с ранее предложенной модели, в основе которой лежит множественность очагов. Неявно подразумевалось, что все очаги расположены на некоторой поверхности, включающей линию вспарывания.

Как было ранее показано [*Епифанский*, *Дуленцова*, 2022], существуют в наборе начальных данных первые вступления, которые указывают на их происхождение за пределами коры, на глубинах верхней мантии.

Рассмотрим более внимательно рис. 3. Приведённый график амплитудного параметра для фаз *P* в пределах 2.0–22.5 *км* хорошо аппроксимируется прямой горизонтальной линией. Согласно нашим рассмотрениям характеристик, при условии, что первые вступления (фазы *P*) лежат на линии вспарывания, совпадающей с усреднённой характеристикой, времена их вступлений совпадают для всех сенсоров с учётом временной поправки на эпицентральное расстояние. Это, собственно, и определяет ортогональность характеристик оси сейсмограмм. А это, в свою очередь и в силу определения характеристики, даёт для всех глубин одно и то же значение усреднённой амплитуды. И, как следствие, одинаковое значение амплитудного параметра.

Но для рассматриваемого события при глубине больше 22.5 км график фазы *P* отклоняется от горизонтали. Очевидно, это свидетельствует об отклонении линии вспарывания от усреднённой линии характеристик.

В силу возникших противоречий модели, мы должны предположить, что распределение субочагов может быть и во времени, то есть фокусы некоторых субочагов запаздывают от времени на линии вспарывания. Причём очевидное предположение, что это форшоки или афтершоки, мы отбрасываем. Отбрасываем в силу слишком малого интервала во временах в очаге этих субочагов — десятые доли и первые секунды. За это время колебания среды не успевают затухнуть из-за воздействия первого субочага.

Большая часть предлагаемой модели очаговой зоны, так или иначе, уже присутствует в литературе. Здесь мы просто постарались собрать воедино разрозненные части указанной модели и подчеркнуть некоторые особенности, на которые ранее не обращалось внимания. Кроме того, в работе присутствуют некоторые особенности очаговой зоны, отмеченные впервые в процессе развития вспарывания.

На рис. 4 показаны диаграммы амплитудного параметра, полученные для выбранного события. Дополнительно на диаграммы нанесена линия вспарывания из рис. 2.

При построении диаграммы в качестве нулевого момента времени выбрано значение времени в очаге на нулевой глубине. Времена, указанные на оси абсцисс, отсчитываются относительно времени в очаге для нулевой глубины.

Далее мы используем термин «амплитудный параметр», значение которого есть квадрат амплитуды скорости, полученной из преобразования Фурье сигнала смещения [*Press et al.*, 1986; *Aki*, 1967].

В каждой точке диаграмм нанесены цветовые точки, соответствующие произведению



Рис. 4. Диаграммы распределения амплитудного параметра в плоскости время—глубина (выделения относительной сейсмической энергии): а – при построении диаграммы были использованы только те сейсмические записи, которые были включены в определении параметров гипоцентра, и исключены остальные, для которых вступления были забракованы; б – при построении диаграммы использовались все сейсмические записи, доступные для данного события

значений амплитудного параметра для двух фаз *P* и *pP*, делённому на среднее значение амплитудного параметра фазы *pP*.

Для лучшего понимания добавим, что изображённые на диаграмме распределения амплитудного параметра в координатах время—глубина рассчитаны для точек линии вспарывания в пространстве и во времени, указанном на оси абсцисс. Это означает, что процесс, отображённый на диаграмме, происходил в пространстве строго вдоль линии вспарывания. Варьируется только время.

На диаграмме отображены интенсивности (значения амплитудного параметра) вдоль характеристик. Для каждой фазы характеристики направлены в соответствии с уравнением (7) в координатах время—глубина. Интенсивности амплитудного параметра для фаз *P* и *pP* перемножаются в местах пересечения парных фаз (порождённых в одном месте и в один момент времени).

Амплитудный параметр в каждой точке мы интерпретируем как меру излучения сейсмической энергии. Важно, что линии характеристик как бы размыты. Это получается вследствие того, что характеристики, как отмечено выше, имеют некоторый разброс относительно среднего значения. Разброс появляется за счёт ошибок измерения и неоднородностей среды распространения сигнала. Кроме того, сами характеристики имеют слабую зависимость от эпицентрального расстояния. Так, для глубины 50 км разница между уровнем характеристик для эпицентральных расстояний 25 и 100 угловых градусов составляет ~1.0 с.

Рассмотрим теперь рис. 4а, б по существу. Эти две диаграммы построены для одного и того же события, но при различных наборах первых вступлений.

Диаграмма на рис. 4а построена с учётом только тех сейсмограмм, времена первых вступлений которых были использованы при предварительной локации. Забракованные по причине большой невязки первые вступления и, соответственно, сейсмограммы использованы не были.

При построении диаграммы на рис. 46 были использованы все доступные сейсмограммы. Из сравнений диаграмм видно, что при браковке первых вступлений с большими невязками оказались забракованы записи, имеющие и большие амплитуды.

Кроме того, хорошо видно, что существует несколько субочагов. В терминологии работы [*Savage*, 1965] эти субочаги есть повторные события. Ниже ещё вернёмся к этому вопросу.

Следует заметить, что субочаги срабатывают в одном и том же месте пространства с интервалами в пределах секунд. И срабатываний бывает несколько, что указывает на определённую закономерность. Этого ранее в литературе не описывалось. Похожие описания тремора исследовались для зоны субдукции в районе Мексики, Центральная Америка [*Brudzinski* et al., 2010; Valdes et al., 1986; Carlos et al., 1986]. Но в работе разбираются другие условия нагрузки и не указывается связь с очагами.

Указанные детали говорят о том, что не только очаговая зона, но и каждый субочаг имеют определённую внутреннюю структуру. Для решения вопроса о выборе глубины отмеченное наличие «тремора» вряд ли имеет решающее значение. Отметим, что для всех исследованных событий наблюдается одинаковая картина. Вопрос только в амплитудах излучения.

В результате применения метода ССФ, при помощи которого строились диаграммы амплитудного параметра, выделяются только указанные фазы, на которые он настроен. Рис. 5 демонстрирует диаграмму амплитудного параметра в развёртке от 30 *с* до начала движения в очаговой зоне и 20 *с* после. Хорошо выделяется над фоном достаточно узкое окно, в котором отмечается наличие первых вступлений — фаз *P* и *pP* (парных фаз). Это определённо указывает на избирательность метода.



**Рис. 5.** Диаграмма, построенная приведением амплитудного параметра фазы *pP* к величине амплитудного параметра волны *P* 

## Обсуждение

Теперь, после того, как были приведены основные результаты исследования процесса разрыва в очаговой зоне для события 7 января 2022 г., рассмотрим выводы, которые можно сделать на базе приведённых результатов.

Несколько предварительных замечаний.

Замечание по поводу терминологии. На протяжении статьи мы используем термин «очаг», а для указания множественности очагов — «субочаги». Но основное внимание уделяем вступлениям, которые являются следствием эмиссии сейсмической энергии, излучаемой этим очагом.

Далее очагом будем обозначать всё пространство, в котором обнаружено излучение сейсмической энергии, в то время как фокусом — точку, где начинается процесс излучения.

В данной работе мы приводим примеры обработки только одного события. В начале статьи мы сделали замечание о противоречиях рассмотрения сейсмических событий в различных разделах сейсмологии. Так, в случае вопросов локации и массовой обработки сейсмических событий, сейсмологов интересует в первую очередь сравнимость результатов, а не индивидуальные детали обработки. Несмотря на то, что в статье приведены результаты обработки только одного события, предварительно была произведена обработка целой серии событий. Результаты этой обработки, а также возникающие при анализе общие проблемы приведены в статье [*Enuфанский, Дуленцова*, 2022].

### Выбор глубины

Основной задачей в постановке исследования изначально была проблема автоматического определения глубины. Для корректного указания значения глубины сейсмического события следует дать её определение. В случае, когда основным представлением? было наличие одного фокуса корового тектонического сейсмического события, проблема определения отсутствовала.

При нескольких фокусах каждый из них может определять глубину. Нам необходимо сформулировать критерий выбора одного фокуса из нескольких. На настоящий момент, на наш взгляд, фокусом, определяющим глубину события, является тот, который ассоциирован с очагом, первым излучающим максимум сейсмической энергии в инструментально зарегистрированном первом движении.

Такой фокус отмечен на рис. 3 и имеет глубину  $h=17.5 \ \kappa m$ , относительное время  $t=2.1 \ c$ .

Приведённое определение глубины наиболее близко традиционному представлению о глубине. Действительно, введение в определение величины максимума излучаемой энергии соответствует традиционно определяемым первыми вступлениями, регистрируемыми на сейсмограммах. Из известных авторам попыток документального указания максимума амплитуды в указании интерпретации начального участка сейсмограммы является работа [*Кондорская*  $u \, dp.$ , 1981]. Но там говорится о выборе максимума для определения магнитуды  $m_{\rm b}$ , а не глубины.

#### Модель очаговой зоны

Модель очаговой зоны — основной объект, потребовавший коррекции в результате проведённого исследования. Разработанный инструментарий позволяет вычленить детали процесса вспарывания в одном конкретном субочаге. На это указывает выявление дополнительных фокусов, которые мы называем «повторное срабатывание очага».

В терминах работы [Savage, 1965] повторными срабатываниями называются повторные события. Мы до сих пор не использовали термин события внутри другого события. Чтобы оставаться в общепринятой терминологии, назовём отдельные события, отображаемые на диаграмме рис. 4а, «локальными событиями». Локальное событие генерирует первое вступление. По амплитуде последнее из них может оказаться больше действительно первого по времени на данной глубине. Терминологически первым по времени вступлением будем считать то, которое произошло на линии вспарывания на заданной глубине. Если инструментально не было зарегистрировано вступление, совпадающее по времени с линией вспарывания на данной глубине, мы будем считать условно временем вступления время на линии вспарывания.

Отсутствие первого вступления на линии вспарывания на данной глубине может быть объяснено одной из двух причин:

 амплитуда вступления не выделяется на фоне шума;

 повторное вступление оказалось по глубине между двух вступлений на линии вспарывания.

В любом случае повторное вступление является ложным с точки зрения локации. Оно должно быть исключено из набора первых вступлений базового события, приуроченного к линии вспарывания.

Мы не определяем стопинг-фазы по нашим наблюдениям, как это делается в работе [Savage, 1965]. Упоминание стопинг-фаз означает, что мы рассматриваем наблюдаемое явление образования повторных локальных событий как эффект проявления стопинг-фаз.

Теперь можем обратиться к рассмотрению указанных в начале статьи особенностей предлагаемой модели и результатов, которые мы должны наблюдать. Первое, что бросается в глаза на графиках рис. 3, это несколько отдельных максимумов. Здесь следует отметить, что максимумы, отличные от главного, определяющего глубину, чётко выделяются на фоне «шума». Верхняя точка каждого максимума, имеющая вид площадки, определяет «первое вступление» отдельного субочага. В алгоритме нет процедуры определения времени вступления каждого отдельного максимума – результат локации уже получен. Однако, сам факт возможности провести указанную операцию подтверждает высказанные в начале текста статьи замечания.

Это также подтверждает работу критериев выбора парных фаз РирР. Критерии выбора парных фаз и сам алгоритм выбора можно рассматривать как замену процедуры браковки традиционного алгоритма локации. Другими словами, всё сказанное свидетельствует о наличии более одного субочага в очаговой зоне. Более того, отмеченная особенность - наличие нескольких очагов на линии вспарывания - свидетельствует о взаимосвязи непрерывного процесса подвижки берегов разрыва и спонтанно возникающих «срывах», вызванных разрушением зацепок, временно задержавших непрерывное движение берегов. Этот процесс удобнее всего рассматривать с точки зрения потока и перехода между кинетической энергией и потенциальной.

Таким образом, если нам удалось получить свидетельство множественности субочагов в очаговой зоне, возникает вопрос: почему на это не обращалось внимание ранее.

И здесь важна одна особенность линий вспарывания. Напомним, что последняя очень близка по расположению в пространстве с линией характеристик.

Общей особенностью указанных линейных объектов является тот факт, что отдельные очаги, приуроченные к линии вспарывания, отображаются по времени в одной точке (или очень близких точках) на сейсмических записях.

Указанный факт достаточно трудно было предусмотреть без детального рассмотрения поведения фазовых невязок. Но именно анализ фазовых невязок привёл в совокупности к регистрации перечисленных фактов, главным из которых является регистрация линии вспарывания.

# Что мешает определять глубины для некоторых коровых событий

Если не рассматривать множественность очагов на протяжении толщины коры с точки

зрения связанности посредством линии вспарывания, можно считать, что фокусы субочагов в очаговой области распределены хаотично.

Когда стала очевидной упорядоченность отдельных субочагов, возник вопрос о свойствах этой упорядоченности. В свою очередь, это ставит под вопрос факт «единственности» первого вступления.

Этот факт и является камнем преткновения при попытках определения глубин некоторых коровых событий. Действительно, вместо многих первых вступлений на сейсмограмме мы видим одно, состоящее из суммы многих, близких по времени, генерируемых на различных глубинах отдельных импульсов. В этом случае, мы получаем одно первое вступление. И, как следствие, один очаг.

Идиллическую картину разбивает обращение ко всем хорошо известной глубинной фазе *pP*. Действительно, каждый потенциально генерируемый на данной глубине импульс проявляется на сейсмограмме как две фазы – Р и рР. Указанные фазы группируются вдоль линий характеристик, но каждая фаза – вдоль своей характеристики. Причём характеристики для фазы Р и фазы рР, очевидно, пересекаются на плоскости, содержащей осевую линию сейсмограммы и две указанные характеристики. Таким образом, обе характеристики для фаз Р и рР оказываются ортогональны осевой линии сейсмической записи, что и является следствием факта проекции каждой из характеристик на ось сейсмической записи в одну точку. И это при том, что характеристики этих двух фаз пересекаются на плоскости в координатах время-глубина. Это указывает на то, что указанная плоскость есть Риманова поверхность положительной кривизны.

Возникает естественный вопрос. Если всё так просто можно объяснить, то откуда берётся множество субочагов на протяжении толщины коры? Ответ прост. Пусть мы движемся вдоль линии вспарывания по глубине. Как уже отмечалось выше, каждый сейсмический импульс, сгенерированный на некоторой глубине, порождает две интересующие нас фазы на сейсмограмме, каждую со своей характеристикой. На другой глубине новый импульс также порождает набор из двух фаз. Но на этот раз фаза *P* оказывается на одной характеристике с той фазой *P*, которая ранее была сгенерирована на предыдущей глубине. И так далее вдоль линии вспарывания.

Из сказанного следует вывод. Амплитуды фазы *P* на рис. 3 должны представлять линию одного уровня на всём протяжении или, по крайней мере, в районе глубин порождения сейсмических импульсов. Отклонение графика от прямой линии одного уровня определяется величиной, на которую отличаются сами характеристики в зависимости от глубины фокуса субочага и эпицентрального расстояния для сенсора регистрации.

Для иллюстрации описанного рассмотрим рис. 6. На рисунке нанесены две кривые амплитудного параметра для фаз *P* и *pP* без применения критерия контроля парности. Кривые строились вдоль линии вспарывания.



**Рис. 6.** Графики амплитудного параметра фаз *P* (1), *pP* (2) и приведённый к амплитудам фазы *P* график фазы *pP* (3)

Первое, что бросается в глаза на рис. 6, — график амплитудного параметра для фазы *P* представляет собой линию одного уровня в верхней и средней части коры, как и было сказано выше. Но как только линия вспарывания начинает отклоняться от характеристики, характер графика меняется.

Другое объяснение требуется для графика фазы pP. Для этой фазы линия вспарывания не является характеристикой. График для глубин в коре повторяет график на рис. З за исключением участков, на которых не выполнен критерий парности. Спадание амплитудного параметра фазы pP при переходе от коры к верхней мантии свидетельствует об отсутствии энергичных вступлений P-фазы на этих глубинах. Строго говоря, мы не можем утверждать, что за пределами выполнения критерия парности построенный график относится к фазе P (укажем для справки: критерий парности для данного случая выполняется до глубины 38.6 км).

Рассмотрим теперь график (3). Этот график получен из графика (2) умножением значений

на отношение средних значений ординат кривых (1) и (2) в интервале глубин выполнения критерия парности. В результате получаем декомпозицию распределения амплитуд импульсов в очаге во время процесса вспарывания. Заметим, что представленные в работе результаты получены в итоге обработки только вертикальных компонент сейсмических записей.

Всё сказанное демонстрирует, насколько сложно по одной сейсмограмме установить происхождение составляющих её импульсов.

Похоже, нам удалось найти ответ на сформулированное ещё в начале последней четверти прошлого века Б.В. Костровым замечание: «прежде чем описывать очаг землетрясения, надо решить вопрос — это один процесс или два» в пользу второго утверждения [*Костров*, 1975]. Критерий выбора ответа прост. Если при анализе конкретного субочага мы различаем детали, не имеющие проявления в том, что мы называем землетрясением, то это два разных термина и, соответственно, объекта исследования.

### Заключение

В начале статьи было указано на тот факт, что процедуры локации должны быть максимально унифицированы для обработки любых сейсмических событий. Основным объектом, с которого начинается конечный этап обработки сейсмического события при заданном наборе первых вступлений, является построение линии вспарывания. И здесь мы ограничили применимость алгоритма разработанного тектоническими коровыми событиями. Это нами сделано сознательно – в задании на разработку было определено именно это ограничение. Данное замечание не означает, что авторы не собираются исследовать возможность применения алгоритма и программной реализации для событий другой природы. Для коровых тектонических событий проверено, что для них можно построить линию вспарывания. Для событий другой природы это предстоит доказать или опровергнуть.

По этой причине алгоритм использует линию вспарывания в качестве основы для выявления глубины события по максимуму сейсмического излучения (амплитудного параметра).

Основным результатом работы является алгоритм, позволяющий выделить цепочку всех вероятных фокусов субочагов события и выбрать по максимуму величины сейсмического излучения наиболее вероятный для определения глубины. В выборе глубины не участвуют вторичные очаги, т.е. субочаги, время в очаге для которых запаздывает по сравнению с очагом, фокус которого лежит на линии вспарывания.

Авторы выражают благодарность за проявленное терпение при знакомстве с материалами и текстом при подготовке статьи Ирине Петровне Габсатаровой.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00682-24, а также 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

*Введенская Н.А.* Выделение волны *sP* на записях глубоких землетрясений Средней Азии. – М.: Издательство академии наук, 1956. – С. 25–34.

*Епифанский А.Г.* Определение параметров гипоцентров и магнитуд землетрясений в телесейсмической зоне (ЭПИ-74) // Алгоритмы и практика определения параметров гипоцентров землетрясений на ЭВМ. – М.: Наука, 1983. – С. 92–97.

*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., 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 её использование для определения глубины очага. — М.: Издательство Академии наук, 1956. — С. 35–47.

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.

*Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 176 с.

*Aki K.* Scaling law of seismic spectrum // Journal of Geophysical Research. – 1967. – V. 72, N 4. – DOI: 10.1029/JZ072i004p01217

*Bondár I., Storchak D.* Improved location procedures at the International Seismological Centre // Geophysical Journal International. – 2011. – V. 186, N 3. – P. 1220–1244. – DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x

Brudzinski M.R., Hinojosa-Prieto H.R., Schlanser K.M., Cabral-Cano E., Arciniega-Ceballos A., Diaz-Molina O., DeMets C. Nonvolcanic tremor along the Oaxaca segment of the Middle America subduction zone // Journal of Geophysical Research. – 2010. – V. 115, B8. – DOI: 10.1029/2008JB006061

Carlos M., Valdes W.D., Mooney S.K., Singh R.P., Meyer C., Lomnitz J.H., Luetgert C.E., Helsley B.T.R., Lewis M., Mena M. Crustal structure of Oaxaca, Mexico, from seismic refraction measurements // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1986. – V. 76, N 2. – P. 547–563. – DOI: 10.1785/ BSSA0760020547

*Červeny V., Ravindra R.* Theory of seismic head waves // American Association of Physics Teachers. – 1973. – V. 41. – P. 755–757. – DOI: 10.1119/1.1987374 *Kennett B.L.N.* Seismic wave propagation in stratified media. – Canberra: ANU Press, 2009. – 288 p. – DOI: 10.26530/OAPEN\_459524

*Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T.* Numerical recipes – the art of scientific computing. – Cambridge: Cambridge University Press, 1986. – 818 p. *Savage J.C.* The stopping phase on seismograms // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1965. – V. 55, N 1. – P. 47–58. – DOI: 10.1785/ BSSA0550010047

Valdes C.M., Mooney W.D., Singh S.K., Meyer R.P., Lomnitz C., Luetgert J.H., Helsley C.E., Lewis B.T.R., Mena M. Crustal structure of Oaxaca, Mexico, from seismic refraction measurement // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1986. – V. 76, N 2. – P. 547–563. – DOI: 10.1785/BSSA0760020547

## Сведения об авторах

Епифанский 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: epiphansky@gmail.com

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

Focus zone model and depth determination based on amplitudes of *pP* phases

© 2024 A.G. Epifansky, L.G. Dulentsova

GS RAS, Obninsk, Russia

Received October 6, 2023

Abstract Analysis of difficulties connected with determination of crust tectonics seismic events is defined by rupture process. Detailed analysis showed that a set of first arrivals associated with an event contains arrivals generated on different depths. This indicates the existence of several instrumentally defined cofocuses in the focus zone. Consequently, the location algorithm should pick up several more significant by amplitude of fist arrivals. Then, seismic event depth will define that one rising maximal seismic signal. Investigation shoes – first arrivals may be projected into one point on seismic record even if they are generated at different depths. Thus, one impulse of first arrival may correspond to several depths. Hence appears the principal difficulties to determine depth solely using P phases. Solution of the problem is automated determination of time arrivals of depth phases pP. The last should be generated at a certain depth. The event depth is chosen by maximum value depth phase amplitude. Algorithm uses all records during the calculation process at the same time. Moreover it was revealed that local second events after first arrival have been registered. Second events may have time delays restricted by seconds. Second event impulse amplitude may be more than impulse amplitude of really first arrival at given depth. On the whole, a group of local first arrivals are in the frame of the period of base event impulse.

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

**For citation** 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: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.06. EDN: ZJZCMC

### References

Aki, K. (1967). Scaling law of seismic spectrum. *Journal of geophysical research*, 72(4), 1217-1231. DOI: 10.1029/JZ072i004p01217

Bondár, I., & Storchak, D. (2011). Improved location procedures at the International Seismological Centre. *Geophysical Journal International*, *186*(3), 1220-1244. DOI: *10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x* 

Brudzinski, M.R., Hinojosa-Prieto, H.R., Schlanser, K.M., Cabral-Cano, E., Arciniega-Ceballos, A., Diaz-Molina, O., & DeMets, C. (2010). Nonvolcanic tremor along the Oaxaca segment of the Middle America subduction zone. *Journal of geophysical research*, *115*(B8). DOI: *10.1029/2008JB006061* 

Carlos, M., Valdes, W.D., Mooney, S.K., Singh, R.P., Meyer, C., Lomnitz, J.H., Luetgert, C.E., Helsley, B.T.R., Lewis, M., & Mena, M. (1986). Crustal structure of Oaxaca, Mexico, from seismic refraction measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *76*(2), 547-563. DOI: *10.1785/BSSA0760020547* 

Červeny, V., & Ravindra, R. (1973). Theory of seismic head waves. *American Association of Physics Teachers*, 41, 755-757. DOI: 10.1119/1.1987374

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. (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.). 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*. EDN: HJAMWX

Kennett, B.L.N. (2009). Seismic wave propagation in stratified media. Canberra: ANU Press, 288 p. DOI: 10.26530/OAPEN\_459524

Kondorskaya, N.V. (1956). Vydelenie volny pP pri neglubokih zemletryaseniyah i ee ispol<sup>2</sup>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: Academy of Sciences Publ. (In Russ.).

Kondorskaya, N.V., Aranovich, Z.I., Solov'yeva, O.N., & Shebalin, N.V. (Eds.). (1981). *Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seysmicheskikh stantsiyakh Yedinoy sistemy seysmicheskikh nablyudeniy 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. (1975). *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya* [Mechanics of the tectonic earthquake hearth]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 176 p. (In Russ.).

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., & Vetterling, W.T. (1986). *Numerical recipes – the art of scientific computing*. Cambridge: Cambridge University Press, 818 p.

Savage, J.C. (1965). The stopping phase on seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 55(1), 47-58. DOI: 10.1785/BSSA0550010047

Valdes, C.M., Mooney, W.D., Singh, S.K., Meyer, R.P., Lomnitz, C., Luetgert, J.H., Helsley, C.E., Lewis, B.T.R., & Mena, M. (1986). Crustal structure of Oaxaca, Mexico, from seismic refraction measurement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *76*(2), 547-563. DOI: *10.1785/BSSA0760020547* 

Vvedenskaya, N.A. (1956). *Vydelenie volny sP na zapisyah glubokih zemletryasenij Srednej Azii* [Isolation of the sP wave on records of deep earthquakes in Central Asia] (pp. 25-34). Moscow, Russia: Academy of Sciences Publ. (In Russ.).

### 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@gsras.ru