



МЕТОДИКА ЛОКАЛИЗАЦИИ ГИПОЦЕНТРОВ БЛИЗКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО БАЙКАЛА

Андрей Владимирович Беяшов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
BelyashovAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8772-3863>*

Аннотация. Приводится ретроспективное описание эволюции методического подхода по локализации коровых землетрясений (условно названного «уточненной гипоцентрией») на примере данных, полученных в районе Центрального Байкала. Используются как архивные записи прошлых землетрясений (за период 2001–2003 гг.), так и относительно современные данные (2020–2021 гг.). Предложен ряд обоснованных методических решений, позволяющих повысить точность и надежность локализации с примерами их применения на реальных данных.

Ключевые слова: коровые землетрясения, уточненная гипоцентрия, локализация, Центральный Байкал

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2026-0050.

Благодарности: особую благодарность автор выражает сотрудникам Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН и ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) за предоставление исходных данных.

Для цитирования: Беяшов А.В. Методика локализации гипоцентров близких землетрясений Центрального Байкала // Геофизические технологии. 2026. № 1. С. 55–67. doi:10.18303/2619-1563-2026-1-55.

CENTRAL BAIKAL SHALLOW-FOCUS EARTHQUAKES LOCALIZATION TECHNIQUE

Andrey V. Belyashov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
BelyashovAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8772-3863>*

Abstract. A retrospective description of the evolution of the methodological approach to the localization of crustal earthquakes (conventionally called "refined hypocentry") is given using the example of data obtained in the Central Baikal region. Both archival records of past earthquakes (for the period 2001–2003) and relatively modern data (2020–2021) were used. A number of well-founded methodological solutions are proposed to improve the accuracy and reliability of localization with examples of their application on real data.

Keywords: shallow-focus earthquakes, refined hypocentry, localization, Central Baikal

Funding: the study was carried out within the framework of the project No. FWZZ-2026-0050.

Acknowledgments: the author is grateful to the staff of the Buryat Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, and Geological Institute SB RAS (Ulan-Ude) for providing source data.

For citation: Belyashov A.V. Central Baikal shallow-focus earthquakes localization technique // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2026. No. 1. P. 55–67 (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2026-1-55.

ВВЕДЕНИЕ

Точность и достоверность локализации гипоцентров землетрясений, включая внутрикоровые, остается одной из важных проблем в прикладной сейсмологии. На локационное решение влияют различные факторы, включая:

- свойства сети наблюдательных станций с учетом особенностей локальной и региональной геологической структуры, определяющей механизмы распространения сейсмических волн;
- неоднородность геологической среды и сложность ее адекватного представления через скоростную модель;
- качество исходных записей *P*- и *S*-волн, обуславливающее точность определения времен вступлений;
- обеспечение объективных критериев оценки точности локализации.

Автор данной статьи поставил перед собой задачу найти обоснованный способ повышения точности и надежности определения очаговых параметров (времени в очаге T_0 и трехмерных координат x, y, z) коровых землетрясений. Стартовый подход базировался на выявлении и совершенствовании узлов в обработке, заведомо снижающих качество результирующего локационного решения. К настоящему моменту уточненная гипоцентриа претерпела три эволюционных итерации.

В статье приводится описание методических аспектов локализации коровых землетрясений Центрального Байкала с демонстрацией некоторых результатов без их интерпретации.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПРОГРАММЫ

Разработка методического подхода строилась на использовании записей коровых землетрясений, зарегистрированных в районе Центрального Байкала сетью цифровых сейсмологических станций Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН [Кобелева и др., 2020] в периоды 2001–2003 и 2020–2021 гг. Данные получены на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира». Подбор локационного решения выполнялся в программе Hypoellipse [Lahr, 2012].

ПЕРВЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ЭТАП

В рамках первой эволюционной итерации были задействованы качественные записи *P*- и *S*-волн от Кударинского землетрясения, произошедшего в районе Селенгинской дельты в декабре 2020 г. [Тубанов и др., 2021]. Развернутое описание работ по данному этапу приведено в [Беляшов, Предеин, 2022].

Условия регистрации землетрясений и первичной обработки данных

Требования по размещению сейсмических станций, регистрирующих землетрясения в Центральном Байкале, должны по возможности удовлетворять:

- условиям дистанционного и азимутального покрытия, описанным в [Гилева и др., 2000; Déverchère et al., 2001; Bondár et al., 2004; Радзиминович, 2010];
- специфике распространения сейсмических волн с учетом особенностей региональной геологической структуры.

При наличии в геологическом разрезе внутрикоровой границы, размещение гипоцентра землетрясения выше нее будет приводить к формированию падающей преломленной волны, выходящей в первые вступления на эпицентральных расстояниях порядка 100–110 км [Diehl et al., 2021]. При этом, использовать ее времена прихода в расчетах по локализации не представляется корректным, поскольку у исследователей, как правило, нет информации о точном глубинном положении преломляющей границы.

Таким образом, для решения задач уточненной локализации предлагается на сейсмограммах определять времена вступлений прямых (P_g и S_g) волн, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях до 100–110 км. И поскольку точность конечного решения во многом определяется погрешностью выявления времени прихода сейсмических волн, важным становится использование в обработке сигналов с хорошо читаемыми вступлениями [Мельникова и др., 2012].

Обеспечение объективных критериев оценки точности локализации

Стандартными критериями оценки качества локационного решения являются невязки между модельными и наблюдаемыми временами пробега сейсмических волн (как индивидуальные по станциям, так и gms) и эллипсы ошибок по глубине и эпицентрии. В качестве дополнительного объективного критерия точности и одновременно ориентировочного параметра при подборе скоростных моделей в программе Huroellipse предложено использовать время в очаге (T_0), рассчитанное по линейным уравнениям на индивидуальных (отдельно по каждому из событий) графиках Вадати [Бурмин, Шумлянская, 2015]. Время T_0 при этом определяется максимально точно (с наибольшим коэффициентом детерминации) путем отбраковки из расчетов станций, отскакивающих от срединного тренда более чем на 0.1 сек (рис. 1).

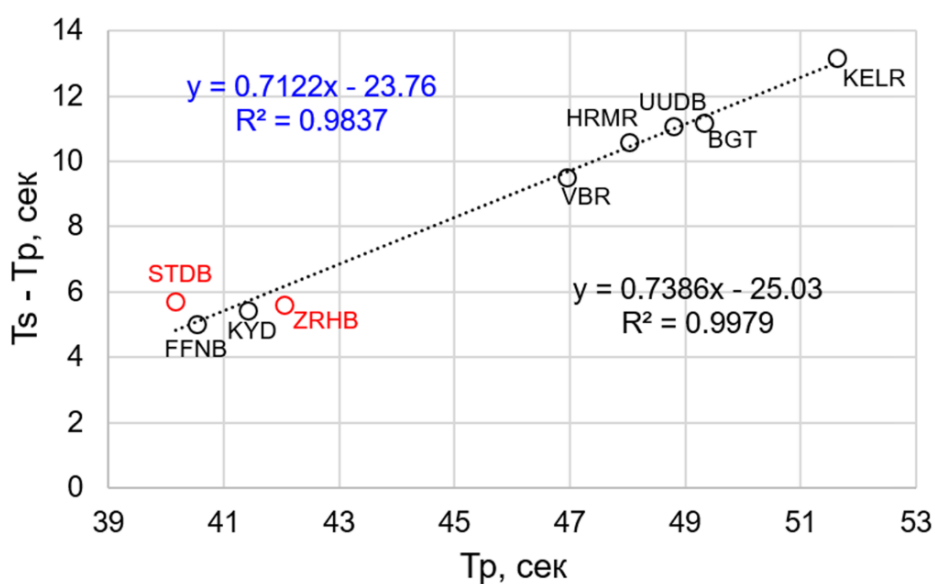


Рис. 1. Индивидуальный график Вадати на примере главного толчка Кударинского землетрясения. Кружки – сейсмические станции с кодовым названием (черные – использованные для финального решения, красные – отбракованные). Синим цветом обозначено уравнение по всем станциям, черным – после отбраковки.

Расчет постанционных значений V_p/V_s (необходимых программе Huroellipse для определения скорости S-волны) производился по формуле [Славина и др., 2017]:

$$\frac{V_p}{V_s} = 1 + \frac{T_s - T_p}{T_p - T_0},$$

где T_p и T_s – соответственно время прихода P- и S-волны на станции регистрации.

Скоростные модели

Поскольку практически в любой программе сейсмической локации основным параметром при определении положения гипоцентра являются времена пробега волны от источника до станции, рассчитанные в соответствии с заданными скоростными условиями, то критически важным становится обоснованный выбор адекватной модели.

Исследования, связанные с локализацией землетрясений в районе озера Байкал, как правило, основаны на использовании одномерных (1D) [Déverchère et al., 2001; Суворов, Тубанов, 2008; Тубанов и др., 2021], либо вообще однородных [Санжиева и др., 2019] моделей. При этом очевидно, что применение 1D модели в геологически неоднородной среде не позволит получить корректный результат, поскольку в этом случае программа подбирает оптимальное решение с минимизацией временных невязок на станциях без учета разновеликих латеральных изменений скорости в пространстве. Кроме того, временные невязки только фиксируют отклонения модельных времен от наблюдаемых без возможности их корректировки.

Исходя из вышесказанного, логичным становится использование трехмерной (3D) скоростной модели с возможностью ее итеративной модификации для уточнения результата локализации. В программе Hуроellipse этот вопрос решается с помощью многокомпонентной скоростной модели, являющейся своего рода 3D аналогом – для каждой станции задается своя скоростная модель с независимыми лучевыми траекториями, финальное решение по локализации при этом формируется по временам пробега на всех станциях [Lahr, 2012].

Далее осуществлялся выбор типа скоростной модели между слоистыми и градиентными. Слоистые модели, с одной стороны, дают адекватное представление о вертикальном распределении скорости в среде, с другой могут привести к искаженному решению. При наличии в модели сейсмических границ с резким скачком скорости [Суворов, Тубанов, 2008], программа Hуроellipse в большом числе случаев формирует лучевые траектории для преломленной на этой границе волны, на временах пробега которой и основывается решение по локализации. На сейсмограмме при этом определяются времена первых вступлений прямых волн (Pg и Sg). Учитывая разницу во временах пробега прямой и преломленной волны, становится понятным, что рассчитанное положение источника является ошибочным и характеризуется, как правило, уменьшением глубины гипоцентра.

На основании вышеизложенного для расчетов положения гипоцентра в программе Hуроellipse оптимальными можно считать градиентные модели с формированием только прямолинейных лучевых траекторий и с учетом изменения скорости с глубиной.

Обоснованность скоростной модели

На основании комплексного анализа данных сейсмической изученности района центральной части озера Байкал [Беляшов, Тубанов, 2021] построена сводная 1D модель для двух основных типов скоростных сред, характерных для данного региона – низкоскоростной (с учетом влияния осадочных отложений в донной части озера) и высокоскоростной (для более глубоких консолидированных отложений и пород по бортам озера). В качестве стартовых скоростных моделей для расчетов в программе Hуроellipse используются усредненные градиентные и градиентно-линейные модели в многокомпонентном варианте [Беляшов, Предеин, 2022].

Итеративный подбор решения в программе Hуроellipse осуществляется путем коррекции индивидуальных скоростных моделей для уменьшения временных невязок.

Таким образом, в рамках первого этапа разработки метода локализации были предложены

следующие решения:

- задействование P - и S -волн (с ошибкой определения времен вступлений не более 0.04 с);
- выделение на исходных записях конкретного типа сейсмической волны (прямой) с ограничением регистрации эпицентрными расстояниями до 110 км, гарантирующее соответствие времен вступлений (и, соответственно, лучевых траекторий) задаваемой исходной скоростной модели;
- обеспечение «сквозной логики» процесса обработки – данные, полученные на начальных этапах (наряду с временами вступлений, максимально точно определенные на индивидуальных графиках Вадати значения T_0 и V_p/V_s), используются при подборе решения в программе локализации в качестве прямых и косвенных расчетных параметров;
- использование многокомпонентных градиентных скоростных моделей (аналог 3D) при итеративном подборе решения в программе локализации Huroellipse.

С помощью вышеуказанного подхода было локализовано Кударинское землетрясение и его афтершоки (рис. 2) с одновременным построением трехмерной скоростной модели блока земной коры Центрального Байкала [Беляшов, 2024а].

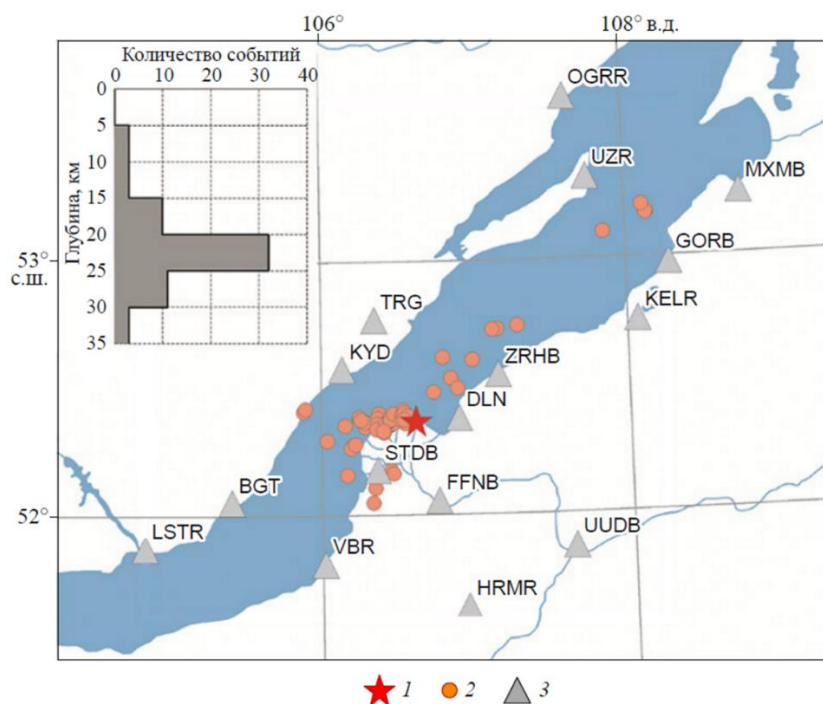


Рис. 2. Результаты локализации событий Кударинского землетрясения (1 – главный толчок; 2 – эпицентры афтершоков; 3 – сейсмические станции Байкальского и Бурятского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, указаны коды). На врезке – распределение событий по глубине.

ВТОРОЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ЭТАП

Второй эволюционный этап формировался в ходе работ по релокации архивных землетрясений 2001 г., где автор сразу столкнулся с проблемой: подбор решений в программе Huroellipse с задействованием параметров, извлеченных из индивидуальных графиков Вадати, зачастую проводился через аномально завышенные значения скорости (до 7.5 км/с для P -волн на кровле земной коры), особенно для событий с высоким значением V_p/V_s (≥ 1.77). В некоторых случаях решение не подбиралось вообще.

Другими исследователями также была отмечена тенденция с определением T_0 и V_p/V_s по графикам Вадати для отдельных событий, приводящая к значительным ошибкам [Бурмин, 2022]. Для исправления ситуации рекомендуется строить суммарный график Вадати по всем включенным в обработку событиям из целевого региона, закреплять срединный тренд в качестве наклона линии V_p/V_s и использовать этот фиксированный наклон при определении T_0 для отдельных событий.

Указанный подход, при всей его обоснованности, отличается некоторым недостатком: для построения суммарного графика Вадати необходимо привести к нулю индивидуальные графики Вадати (по отдельным событиям), в результате чего все локальные ошибки у проблемных событий переносятся в суммарный график, что снижает достоверность результирующей линии V_p/V_s .

Для решения этой проблемы предложено отдельно по каждому из событий проводить процедуру предварительной локализации (с определением относительно точного значения T_0) решением прямой задачи методом окружностей (способом наименьших квадратов) с использованием однородной модели со скоростью P -волны 6.15 км/с; выполняется перебор решений по глубине от 0 до 40 км с шагом 1 км, критерием отбора служит минимум разброса постанционных значений V_p/V_s .

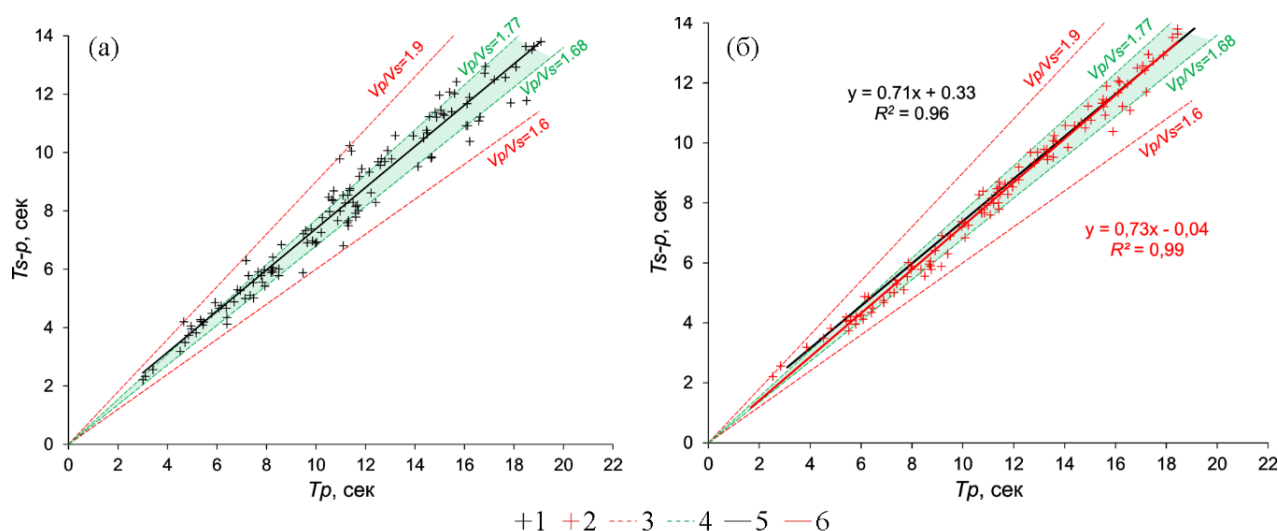


Рис. 3. Суммарный график Вадати для архивных событий 2001 г. до (а) и после (б) процедуры предварительной локализации (данные: 1 – исходные, 2 – модифицированные; 3 – границы диапазона $1.6 \leq V_p/V_s \leq 1.9$; 4 – границы диапазона $1.68 \leq V_p/V_s \leq 1.77$; срединные тренды: 5 – по исходным данным, 6 – по модифицированным данным).

На рисунке 3 представлены суммарные графики Вадати для событий 2001 г. в двух вариантах: исходном (рис. 3, а) и после процедуры предварительной локализации (рис. 3, б). Исходные данные (представленные на рис. 3, а черными крестиками) распределены в широком диапазоне параметра V_p/V_s от 1.6 до 1.9 (границы отмечены красным пунктиром) с выходом за пределы области характерных для района Центрального Байкала значений V_p/V_s от 1.68 до 1.77 [Déverchère et al., 1991, 1993; Petit, Déverchère, 1995; Гилева и др., 2000] (отмечена зеленым цветом). На суммарном графике Вадати, основанном на результатах предварительной локализации (см. рис. 3, б), отмечается более плотная концентрация точек: практически все данные сосредоточены в границах априорных значений параметра V_p/V_s (область, ограниченная линиями 4). Кроме того, отмечается улучшение и по срединным трендам (см. уравнения на рис. 3, б): после предварительной локализации (уравнение красным цветом)

увеличился коэффициент детерминации ($R^2=0.96$) и существенно уменьшился размер свободного члена (с 0.33 до 0.04), который должен стремиться к нулю.

На суммарном графике Вадати после предварительной локализации определяется срединный тренд (уравнение красным цветом на рис. 3, б), фиксируется его угол наклона и на индивидуальных графиках Вадати для всех событий определяются значения T_0 и V_p/V_s через фиксированный угол наклона срединной линии. Подбор решения в программе Huroellipse проводится по описанной выше процедуре.

На рисунке 4 представлен результат релокации коровых землетрясений 2001 г. в виде карт и вертикальных разрезов в двух вариантах: исходном (в соответствии с каталоговыми данными Международного сейсмологического центра) и переопределенном.

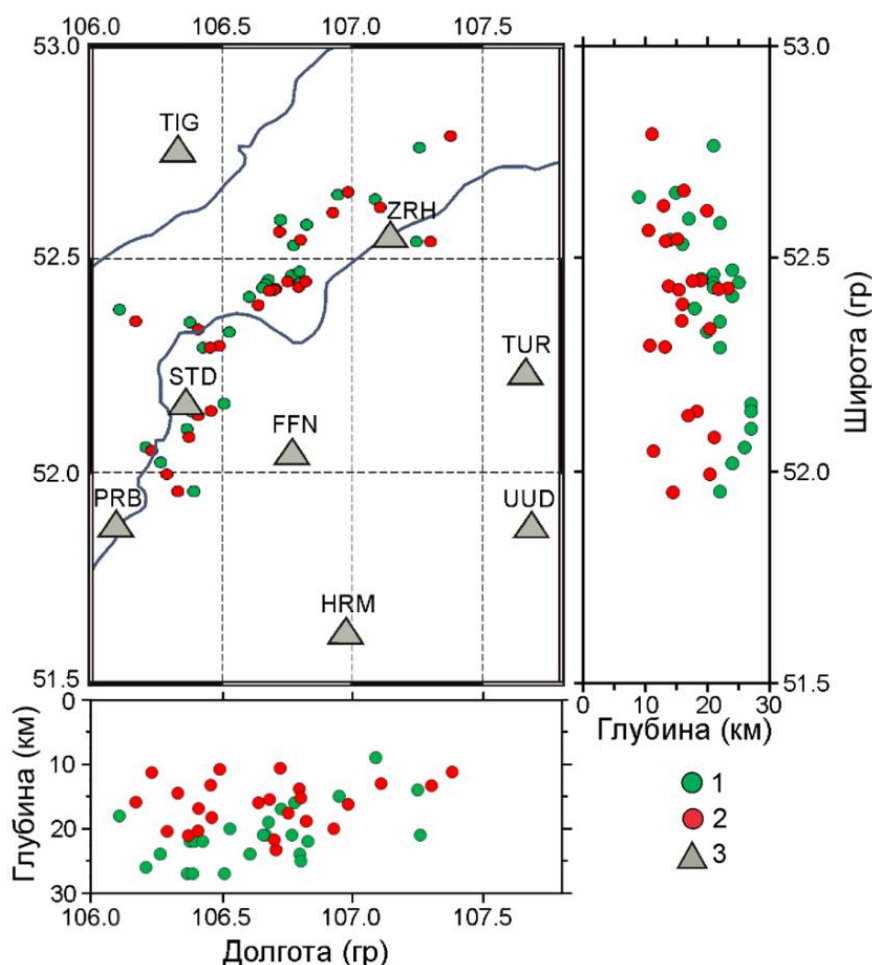


Рис. 4. Результат релокации землетрясений 2001 г. в районе Центрального Байкала: 1 – каталоговые данные (www.isc.ac.uk), 2 – переопределенные, 3 – сейсмические станции, указаны коды.

Соответственно, результатом доработки методического подхода в рамках второго эволюционного этапа (условно названного «усредненной гипоцентрией», поскольку локация рассчитывается через срединную линию V_p/V_s на суммарном графике Вадати) стали следующие решения [Беляшов, 2024б]:

- переход от индивидуальных графиков Вадати к суммарному при определении пособытийных значений T_0 и V_p/V_s ;
- проведение процедуры предварительной локализации для определения относительно точного значения T_0 с целью построения корректного суммарного графика Вадати.

ТРЕТИЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ЭТАП

В ходе дальнейших работ по релокации архивных сейсмических событий 2001–2003 гг. автор встретился с очередными трудностями: в число зарегистрированных в указанный период событий попали карьерные взрывы на Черемшанском кварцитовом руднике с около-нулевой глубиной очага, при этом локализованных с помощью усредненной гипоцентрии в среднем на глубине 7.6 км (в диапазоне от 0.4 до 10.7 км). Такая ошибка в определении глубины обусловлена отклонением данных по отдельным событиям от срединной линии V_p/V_s на суммарном графике Вадати. Это говорит о том, что локализация событий через срединную линию ожидаемо повышает надежность решения (за счет исключения аномальных вылетов) в ущерб локальной точности, для повышения которой необходимо учитывать это отклонение в расчетах путем оценки его численного значения и внесения поправок в результат локализации.

Для указанных карьерных взрывов и землетрясений 2001–2003 гг. проведена дополнительная гипоцентрия с использованием локальных (отдельно по каждому событию) параметров T_0 и постанционных значений V_p/V_s , рассчитанных в ходе предварительной локализации. Определена линейная зависимость отклонений по глубине от разницы между T_0 , полученными через срединную линию на суммарном графике Вадати и по данным предварительной локализации (рис. 5). Рассчитанные через указанную линейную зависимость поправки по глубине добавлены к результату усредненной гипоцентрии.

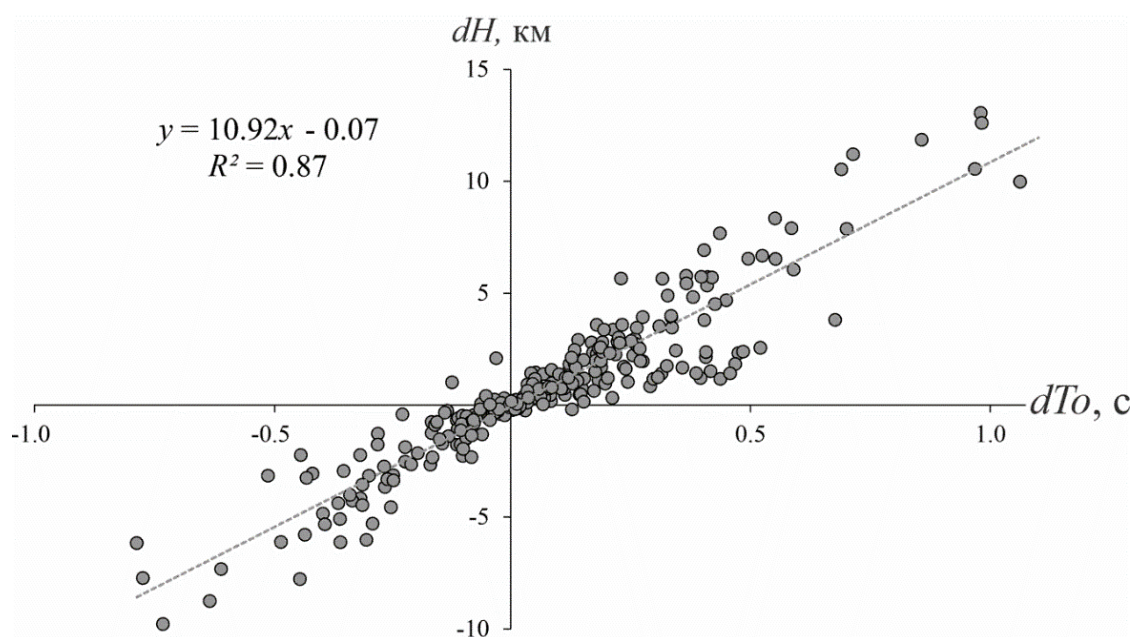


Рис. 5. График зависимости отклонений по глубине от разницы между значениями T_0 для усредненной гипоцентрии и локального решения.

Результаты применения доработанного метода уточненной гипоцентрии представлены на рис. 6 в виде карт и вертикальных разрезов с распределением эпицентров и гипоцентров коровых событий в районе Центрального Байкала в трех вариантах: исходном в соответствии с Базой сейсмологических данных (БСД) [Санжиева и др., 2019], релоцированном через усредненную гипоцентрию и с поправкой за глубину.

Окончательная на сегодняшний день функциональная схема метода уточненной гипоцентрии представлена на рис. 7.

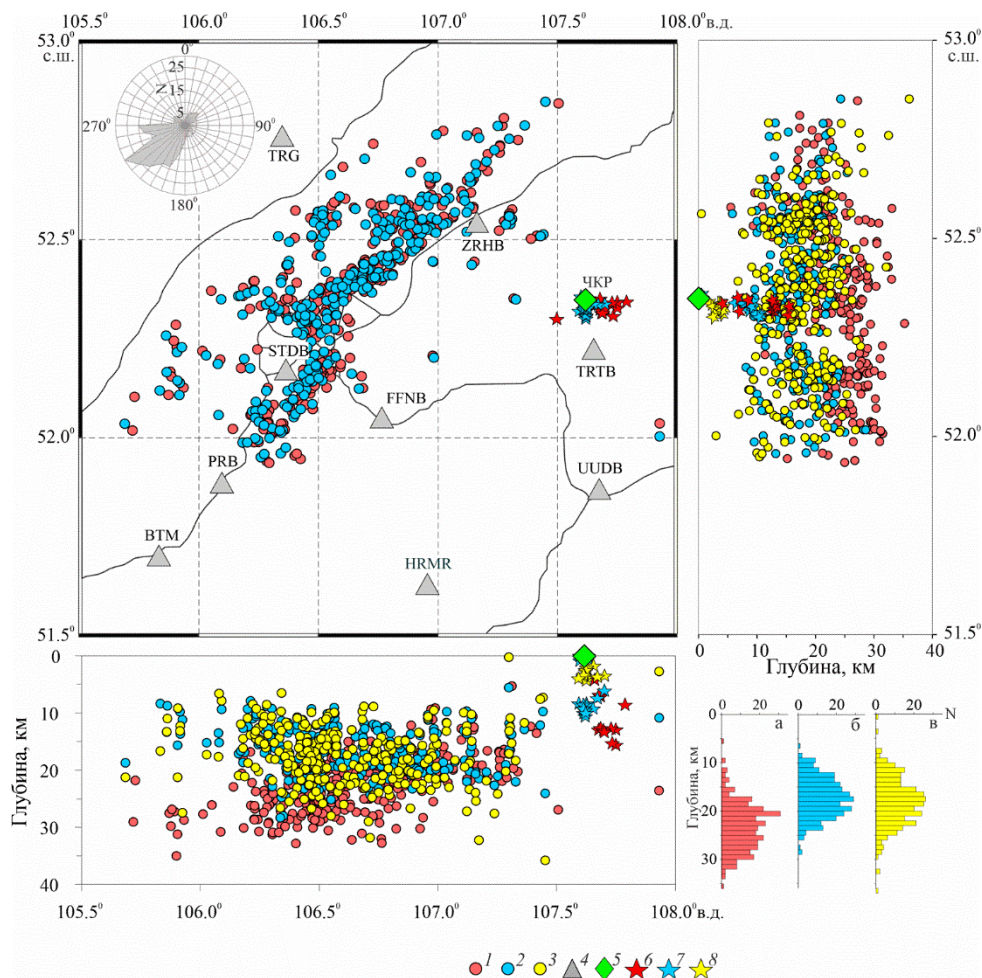


Рис. 6. Результаты релокации сейсмических событий 2001–2003 гг. в разных вариантах локализации: в исходном в соответствии с БСД (1, 6, а); по усредненной гипоцентрии (2, 7, б) и с поправкой за глубину (3, 8, в); 4 – сейсмостанции; 5 – условное положение Черемшанского кварцитового рудника. Кружки – землетрясения, звезды – карьерные взрывы. На врезке карты – азимутальная диаграмма эпицентральных смещений. В нижнем правом углу – гистограммы глубин гипоцентров (N – количество событий).



Рис. 7. Функциональная схема метода уточненной гипоцентрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках поставленной задачи по поиску возможностей более точного определения очаговых параметров (T_0 , x , y , z) коровых землетрясений (на примере данных из района Центрального Байкала) были предложены следующие методические решения:

- задействование обоих типов сейсмических волн – P и S (с ошибкой определения времен вступлений не более 0.04 с);
- выделение на исходных записях конкретного типа сейсмической волны (прямой) с ограничением

регистрации эпицентрными расстояниями до 110 км, гарантирующее соответствие времен вступлений (и, соответственно, лучевых траекторий) задаваемой исходной скоростной модели;

– обеспечение «сквозной логики» процесса обработки – данные, полученные на начальных этапах (определенные на графиках Вадати значения T_0 и V_p/V_s), используются при подборе решения в программе локализации в качестве прямых и косвенных расчетных параметров;

– использование многокомпонентных градиентных скоростных моделей (аналог 3D), построенных на априорной сейсмической информации, при итеративном подборе решения в программе локализации Huroellipse.

– использование суммарных графиков Вадати для исключения аномальных вылетов при расчетах параметров T_0 и V_p/V_s ;

– проведение процедуры предварительной локализации для определения относительно точного значения T_0 с целью построения корректного суммарного графика Вадати;

– учет в конечном локационном решении отклонения отдельных данных от срединной линии V_p/V_s на суммарном графике Вадати путем введения поправки за отклонение по глубине.

Текущая версия метода уточненной гипоцентрии, скорее всего, не является окончательной – в ходе дальнейшей работы с сейсмическими данными при локализации гипоцентров коровых землетрясений возможно его совершенствование.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Беляшов А.В. Определение скоростной модели блока земной коры Центрального Байкала по данным Кударинского землетрясения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024а. Т. 51, № 1. С. 5–17. doi: 10.21455/VIS2024.1-1. EDN:OBLJNE.

Беляшов А.В. Уточненная гипоцентрия коровых землетрясений в районе Центрального Байкала // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024б. Т. 51, № 4. С. 62–72. doi:10.21455/VIS2024.4-5. EDN:MSWALE.

Беляшов А.В., Тубанов Ц.А. Подбор скоростных моделей для локализации сейсмических событий в пределах Байкальской рифтовой зоны // Геофизические технологии. 2021. № 1. С. 38–51. doi: 10.18303/2619-1563-2021-1-38. EDN:VOCLEK.

Беляшов А.В., Предеин П.А. Методические аспекты локализации коровых землетрясений по сейсмическим данным в центральной части озера Байкал // Геофизика. 2022. № 6. С. 18–24. doi: 10.34926/geo.2022.82.52.003. EDN:VOZIPP.

Бурмин В.Ю. Мажорантные оценки погрешностей в определении τ_0 и V_p/V_s по графику Вадати // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы, Минск, 12–16 сентября 2022 г. / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. С. 23. EDN:BZJBUG.

Бурмин В.Ю., Шумлянская Л.А. Современная сейсмичность Крыма // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 2. С. 5–16. EDN:TYMJBT.

Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Девершер Ж. Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 5. С. 629–636. EDN:TAJRNL.

- Кобелева Е.А., Гилёва Н.А., Хамидулина О.А., Тубанов Ц.А.** Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГ РАН, 2020. С. 44–50. EDN:OLPGRU.
- Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К.** Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6.3$ на юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 42–62. EDN:OZLBVH.
- Радзиминович Н.А.** Глубины очагов землетрясений Байкальского региона: обзор // Физика Земли. 2010. № 3. С. 37–51. EDN:LOIOXJ.
- Санжиева Д.П.-Д., Предеин П.А., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д.** База сейсмологических данных Среднебайкальского района Байкальской рифтовой зоны за 2001–2013 гг. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621509 // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. 2019. № 9.
- Славина Л.Б., Кучай М.С., Лиходеев Д.В., Абдуллаева Р.Р.** Оценка напряженно-деформированного состояния зон сеймотектонической активности по кинематическому параметру V_p/V_s на примере структур Большого Кавказа, Куринской депрессии, Закавказья и Западного Прикаспия // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44, № 1. С. 31–56. doi:10.21455/VIS2017.1-2. EDN:YIXNAL.
- Суворов В.Д., Тубанов Ц.А.** Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под Центральным Байкалом // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 8. С. 805–818. EDN:JWCMJP.
- Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р.** Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. ($M_w = 5.5$) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021. Т. 48, № 4. С. 32–47. doi:10.21455/VIS2021.4-2. EDN:HJEMXK.
- Bondár I., Myers S., Engdahl R., Bergman E.** Epicentre accuracy based on seismic network criteria // Geophysical Journal International. 2004. No. 156. P. 483–496. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x.
- Déverchère J., Houdry F., Diament M., Solonenko N.V., Solonenko A.V.** Evidence for a seismogenic upper mantle and lower crust in the Baikal Rift // Geophysical Research Letters. 1991. Vol. 18 (6). P. 1099–1102. doi:10.1029/91GL00851.
- Déverchère J., Houdry F., Solonenko N.V., Solonenko A.V., Sankov V.A.** Seismicity, active faults and stress field of the North Muya Region, Baikal Rift: New insights on the rheology of extended continental lithosphere // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1993. Vol. 98 (B11). P. 19895–19912. doi:10.1029/93JB01429.
- Déverchère J., Petit C., Gileva N., Radziminovitch N., Melnikova V., San'kov V.** Depth distribution of earthquakes in the Baikal rift system and its implications for the rheology of the lithosphere // Geophysical Journal International. 2001. Vol. 146 (3). P. 714–730. doi:10.1046/j.0956-540X.2001.1484.484.x.
- Diehl T., Kissling E., Herwegh M., Schmid S.** Improving absolute hypocenter accuracy with 3D P_g and S_g body-wave inversion procedures and application to earthquakes in the Central Alps Region // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. Vol. 126 (12). doi:10.1029/2021JB022155.
- Lahr J.C.** HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern. U.S. Geological Survey Open File Report 99-23. USGS, Reston, VA, 2012. <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023>.
- Petit C., Déverchère J.** Velocity structure of the Northern Baikal Rift, Siberia, from local and regional earthquake travel times // Geophysical Research Letters. 1995. Vol. 22 (13). P. 1677–1680. doi:10.1029/95GL01605.

REFERENCES

- Belyashov A.V.** Central Baikal crustal block velocity model definition using the data of the Kudarinsky earthquake // *Problems of Engineering Seismology*. 2024a. Vol. 51 (1). P. 5–17. (In Russ.). doi: 10.21455/VIS2024.1-1.
- Belyashov A.V.** Central Baikal shallow-focus earthquakes localization updates technique // *Problems of Engineering Seismology*. 2024b. Vol. 51 (4). P. 62–72. (In Russ.). doi:10.21455/VIS2024.4-5.
- Belyashov A.V., Tubanov Ts.A.** Velocity models fitting for the seismic events location within the Baikal rift zone // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2021. No. 1. P. 38–51. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2021-1-38.
- Belyashov A.V., Predein P.A.** Methodological aspects of localization of crustal earthquakes according to seismic data in the central part of Lake Baikal // *Geofizika*. 2022. No. 6. P. 18–24. (In Russ.). doi: 10.34926/geo.2022.82.52.003.
- Bondár I., Myers S., Engdahl R., Bergman E.** Epicentre accuracy based on seismic network criteria // *Geophysical Journal International*. 2004. No. 156. P. 483–496. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x.
- Burmin V.Yu.** Majority estimates of errors in τ_0 and V_p/V_s determining according to the Wadati diagram // *Proceedings of the XVI International Workshop “Modern methods of processing and interpretation of seismological data”*. GS RAS, Obninsk, 2022. P. 23. (In Russ.).
- Burmin V.Yu., Shimlyanskaya L.A.** Modern seismicity of Crimea // *Problems of Engineering Seismology*. 2015. Vol. 42 (2). P. 5–16. (In Russ.).
- Déverchère J., Houdry F., Diament M., Solonenko N.V., Solonenko A.V.** Evidence for a seismogenic upper mantle and lower crust in the Baikal Rift // *Geophysical Research Letters*. 1991. Vol. 18 (6). P. 1099–1102. doi:10.1029/91GL00851.
- Déverchère J., Houdry F., Solonenko N.V., Solonenko A.V., Sankov V.A.** Seismicity, active faults and stress field of the North Muya Region, Baikal Rift: New insights on the rheology of extended continental lithosphere // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1993. Vol. 98 (B11). P. 19895–19912. doi:10.1029/93JB01429.
- Déverchère J., Petit C., Gileva N., Radziminovitch N., Melnikova V., San'kov V.** Depth distribution of earthquakes in the Baikal rift system and its implications for the rheology of the lithosphere // *Geophysical Journal International*. 2001. Vol. 146 (3). P. 714–730. doi:10.1046/j.0956-540X.2001.1484.484.x.
- Diehl T., Kissling E., Herwegh M., Schmid S.** Improving absolute hypocenter accuracy with 3D P_g and S_g body-wave inversion procedures and application to earthquakes in the Central Alps Region // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021. Vol. 126 (12). doi:10.1029/2021JB022155.
- Gileva N.A., Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A., Déverchère J.** Location of earthquakes and average velocity parameters of the crust in some areas of the Baikal region // *Russian Geology and Geophysics*. 2000. Vol. 41 (5). P. 609–615.
- Kobeleva E.A., Gileva N.A., Khamidulina O.A., Tubanov Ts.A.** Lake Baykal and Transbaykal regions // *Earthquakes in Russia in 2018*. GS RAS, Obninsk, 2020. P. 44–50. (In Russ.).
- Lahr J.C.** HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern. U.S. Geological Survey Open File Report 99-23. USGS, Reston, VA, 2012. <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023>.

Mel'nikova V.I., Gileva N.A., Masalskii O.K., Aref'ev S.S., Bykova V.V. The 2008 Kiltuk earthquake with $M_w = 6.3$ in the south of Baikal: spatial-temporal analysis of seismic activation // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2012. Vol. 48 (7). P. 594–614. doi:10.1134/S1069351312060031. EDN:RGLZAP.

Petit C., Déverchère J. Velocity structure of the Northern Baikal Rift, Siberia, from local and regional earthquake travel times // *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22 (13). P. 1677–1680. doi:10.1029/95GL01605.

Radziminovich N.A. Focal depth of earthquakes in the Baikal region: a review // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2010. Vol. 46 (3). P. 216–229. doi:10.1134/S1069351310030043. EDN:MXOHXF.

Sanzhieva D.P.-D., Predein P.A., Tubanov Ts.A., Bazarov A.D. The database of seismological data of the Srednebaikalsky region of the Baikal rift zone for 2001–2013. Certificate of State registration of a database No. 2019621509 (In Russ.) // *Programs for computer databases. Topographies of integrated circuits*. 2019. No. 9.

Slavina L.B., Kuchai M.S., Likhodeev D.V., Abdullaeva R.R. Estimation of stress/strain state of tectonic structures using V_p/V_s ratios: a case study of seismically active zones of the Greater Caucasus, Kura depression, Transcaucasia, and the Western Caspian region // *Seismic Instruments*. 2018. Vol. 54 (1). P. 78–100. doi:10.3103/S0747923918010085. EDN:REZNHD.

Suvorov V.D., Tubanov Ts.A. Distribution of local earthquakes in the crust beneath central Lake Baikal // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49 (8). P. 611–620. doi:10.1016/j.rgg.2007.09.019. EDN:LKYSLF.

Tubanov Ts.A., Sanzhieva D.P.-D., Kobeleva E.A., Predein P.A., Тсудыпова L.R. Kudara earthquake of September 12, 2000 ($M_w=5.5$) on Lake Baikal: results of instrumental and macroseismic observation // *Seismic Instruments*. 2022. Vol. 58 (1). P. 86–98. doi:10.3103/s0747923922010108. EDN:ELCJRI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЯШОВ Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории глубинных исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизик им. А.А. Трофимука. Основные научные интересы: сейсмическое изучение структуры земной коры, решение прямых и обратных задач в сейсморазведке, гипоцентрия сейсмических событий.

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2026 г.,
одобрена после рецензирования 19 марта 2026 г.,
принята к публикации 23 марта 2026 г.*