

## Методика локализации коровых землетрясений в районе Центрального Байкала

*А. В. Беляшов<sup>1\*</sup>, Ц. А. Тубанов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, Российская Федерация

\*e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Рассматриваются некоторые методические аспекты уточненной локализации близких землетрясений, зарегистрированных Байкальской сетью сейсмических наблюдений. Уточнение положение очага осуществляется путем объединения широко используемых методических решений в единый технологический цикл, при этом некоторые из этих решений используются в новом качестве. Так, например, впервые для территории Байкала в программе Hypoellipse используются параметры, полученные из графиков Вадати: время в очаге ( $T_0$ ), определенное с максимальным коэффициентом детерминации, применяется в качестве объективного критерия оценки точности локализации; значение  $V_p/V_s$  – в качестве фиксированного для каждой станции входного расчетного параметра. Кроме того, для расчета времен пробега в программе локализации Hypoellipse также впервые для изучаемого объекта применяется многокомпонентная скоростная модель в качестве аналога 3D модели.

**Ключевые слова:** локализация землетрясений, Центральный Байкал

## Central Baykal Crustal Earthquakes Location Method

*A. V. Belyashov<sup>1\*</sup>, Ts. A. Tubanov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup> Geological Institute of SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

\*e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** Some methodological issues of the improved location of local earthquakes, recorded by the Baykal seismic network, are considered. Hypocenter location improvement is performed by combination of widely used techniques into the integrated technological line, moreover some of these techniques will be used in their new capacity. For example, for the first time for the Baykal area in the Hypoellipse software the following parameters, obtained from Wadati diagrams, will be used: origin time ( $T_0$ ), defined with the peak determination factor, is to apply as an objective measure of the location accuracy;  $V_p/V_s$  ratio – as a fixed for each of the stations input parameter. In addition, to calculate the travel times in Hypoellipse software a multi-component velocity model (as equivalent of 3D model) have been used also for the first time for the area of investigations.

**Keywords:** earthquake location, Central Baykal

Точность определения положения очага землетрясения обусловлена не только особенностями алгоритма локализации, но также влиянием различных методических и технических аспектов на результаты обработки данных. Нами

был определен перечень проблем, заведомо снижающих качество локализации сейсмических событий в центральной части озера Байкал, и предложены пути их решения на примере использования программы Huroellipse [1].

Входными расчетными параметрами в программе Huroellipse (помимо координат сейсмических станций) являются:

- Времена вступления P и S волн на станциях;
- Коэффициент  $V_p/V_s$  (при совместном использовании P и S волн);
- Стартовая скоростная модель.

Соответственно, для повышения точности локализации землетрясений необходимо обеспечить полноценное использование и надежность этих данных.

Одним из аспектов, негативно влияющих на точность локализации, является работа не с исходными записями сейсмических сигналов, а с табличными данными - бюллетенями, каталогами [2], на что справедливо указано в [3]. Практический опыт авторов статьи позволяет утверждать, что в силу различных причин времена вступлений целевых сейсмических фаз в табличных материалах отображаются не всегда корректно. Соответственно, важным является обращение к сейсмограммам и, поскольку речь идет об уточненной локализации очагов, привлечение к обработке только сигналов высокого качества с хорошо читаемыми вступлениями, так как точность конечного решения во многом определяется погрешностью выявления времени прихода P и S волн [3, 4].

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

- условиям дистанционного и азимутального покрытия, описанным в [5, 6, 7];
- специфике распространения сейсмических волн с учетом особенностей региональной геологической структуры. Результаты ряда глубинных сейсмических исследований свидетельствуют о наличии в Байкальском разрезе внутрикоревой границы (или даже двух границ) в диапазоне глубин от 10 до 30 км [8, 9, 10, 11]. Размещение очага выше этой границы будет приводить к формированию преломленной волны (Pb), выходящей в первые вступления на эпицентральных расстояниях 80-100 км [12]. Использовать времена вступления этой волны в расчетах по локализации не представляется корректным, поскольку нет информации о точном положении преломляющей границы.

Таким образом, для решения задач уточненной локализации рекомендуется на сейсмограммах определять времена вступлений прямых (Pg и Sg) волн, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях до 100-110 км. Существующая сеть сейсмических наблюдений позволяет осуществлять запись землетрясений в центральной части озера Байкал с подключением, по меньшей мере, 10 станций в диапазоне эпицентральных расстояний от 15 до 110 км (рис. 1 на примере одного из афтершоков Кударинского землетрясения [13]) и с достаточным азимутальным покрытием.

Еще одним негативным методическим аспектом является отсутствие объективных критериев оценки качества решения по локализации. Так, единственным оценочным критерием в программе Huroellipse являются невязки между модельными и наблюдаемыми временами пробега сейсмических волн (как индивиду-

альные по станциям, так и rms). При этом, временные невязки – ненадежный с точки зрения устойчивости параметр, поскольку при определенных условиях можно получить решения, различающиеся по эпицентрии и глубине, но с одинаковыми невязками.

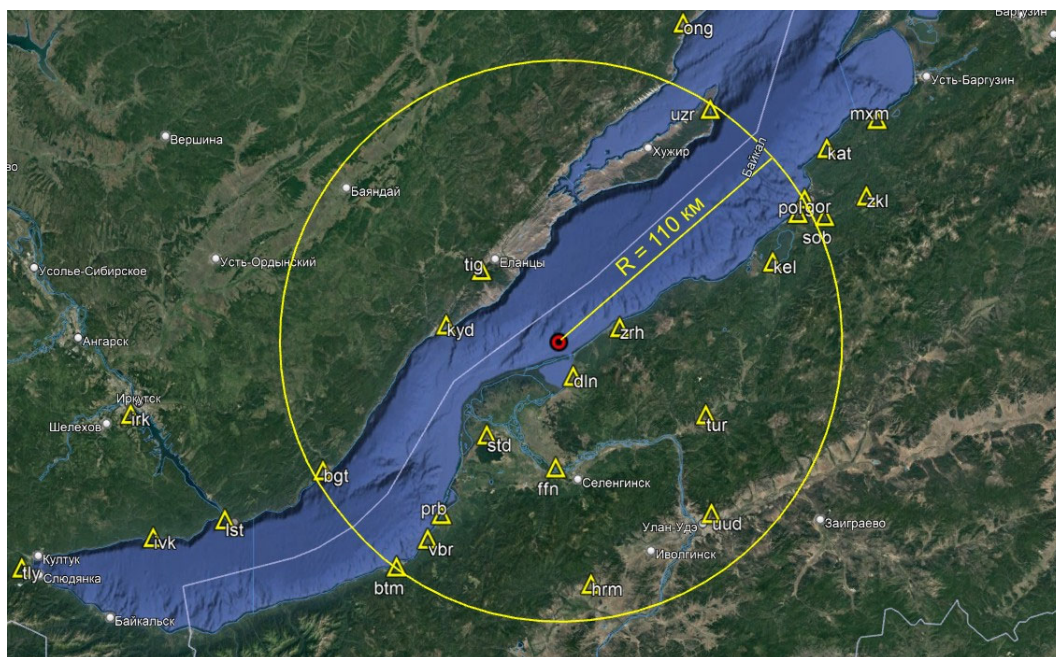


Рис. 1. Пример размещения сейсмических станций Байкальской наблюдательной сети (желтые треугольники) в диапазоне эпицентральных расстояний до 110 км относительно одного из афтершоков Кударинского землетрясения (красный кружок).

Нами предлагается использовать время в очаге ( $T_0$ ), полученное из графиков Вадати [14], одновременно в качестве ориентировочного параметра при подборе скоростных моделей в программе Nupoellipse и объективного критерия оценки точности подобранного решения. На рис. 2 представлен пример графика Вадати, построенного по данным 10 станций в диапазоне эпицентральных расстояний от 22 до 110 км относительно одного из афтершоков Кударинского землетрясения [13].

Линейное уравнения графика Вадати, полученное по всем 10 сейсмическим станциям (обозначено синим цветом на рис. 2), характеризуется существенными отклонениями (до 1 сек) некоторых станций от линии тренда, что не позволяют достичь приемлемого решения локализации в программе Nupoellipse, даже несмотря на относительно высокий коэффициент детерминации ( $R^2=0.9889$ ). Для обеспечения необходимой точности из расчетов были удалены станции, отклоняющиеся от линейного тренда более, чем на 0.1 сек (на рис. 2 отмечены красным цветом), и для оставшихся станций получено решение с коэффициентом детерминации 0.9993. Полученное значение  $T_0$  (которое для данного события оказа-

лось равным 43.08 сек) используется в дальнейших расчетах в качестве ориентировочного параметра и объективного критерия оценки точности.

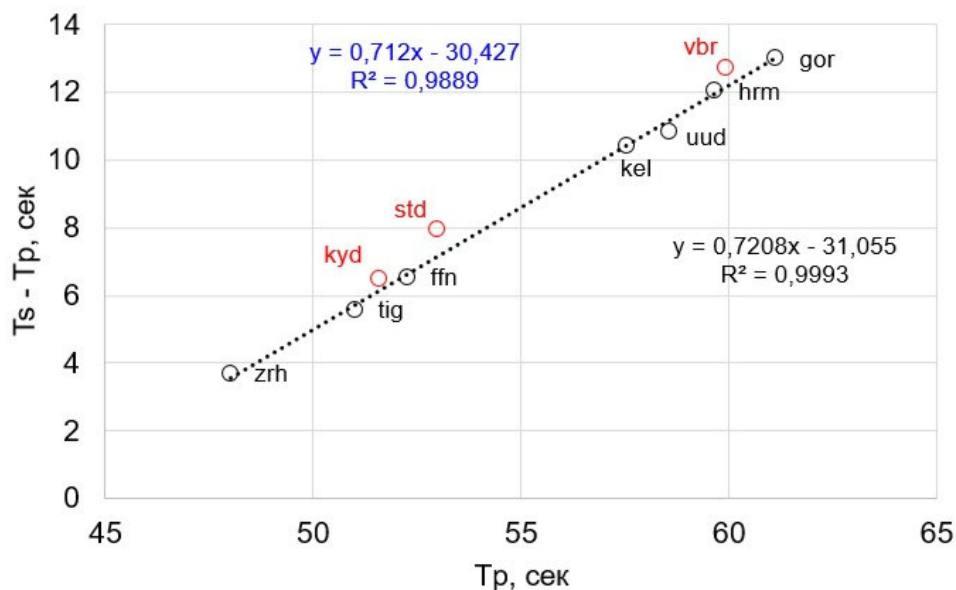


Рис. 2. График Вадати на примере одного из афтершоков Кударинского землетрясения [13]. Кружки – сейсмические станции с кодовым названием (черные – использованные для финального решения, красные - отбракованные)

С использованием значения  $T_0$ , полученного из графика Вадати, рассчитывается коэффициент  $V_p/V_s$  для всех событий по каждой из станций отдельно [15]:

$$\frac{V_p}{V_s} = 1 + \frac{T_{s-p}}{T_p - T_0} \quad (1)$$

Как было отмечено выше, коэффициент  $V_p/V_s$  является одним из ключевых расчетных параметров в программе Nupoellipse, поэтому важно иметь его объективно рассчитанное и зафиксированное для каждой станции значение.

Таким образом, для расчета положения гипоцентра землетрясения в программе Nupoellipse остается последняя входная опция – стартовая скоростная модель.

Слоистые модели, с одной стороны, дают более адекватное представление о вертикальном распределении скорости в среде, чем однородные или линейно-градиентные [10, 16], с другой же могут привести к искаженному решению. При наличии в модели сейсмических границ, особенно с резким скачком скорости, программа Nupoellipse в большом числе случаев формирует лучевые траектории для волны, преломленной на этой границе, в то время как на сейсмограмме определялись времена вступления прямых волн. Учитывая разницу во временах пробега прямой и преломленной волны, становится понятным, что рассчитанное положение источника является ошибочным и характеризуется, как правило, существенным уменьшением глубины гипоцентра. Оптимальными могут считаться

нелинейно-градиентные модели, описывающие естественное нарастание скорости с глубиной в пределах заданных интервалов.

Также, исследования, связанные с локализацией землетрясений в районе озера Байкал, как правило, основаны на использовании одномерных (1D) моделей [6, 10, 13]. При этом очевидно, что в геологически-неоднородной среде получить адекватное решение локализации источника с использованием 1D модели не представляется возможным, поскольку в этом случае программа подбирает оптимальное решение с минимизацией временных невязок на станциях без учета разновеликих латеральных изменений скорости в пространстве [17].

Исходя из вышеописанного логичным становится использование на изучаемом объекте трехмерной (3D) скоростной модели. В программе Huroellipse этот вопрос решается с помощью многокомпонентной скоростной модели, являющейся своего рода аналогом 3D модели – технические возможности программы позволяют задавать разные скоростные модели для разных станций с независимыми лучевыми траекториями, финальное решение по локализации при этом формируется по временам пробега на всех станциях [1].

Серьезной проблемой описанного методического подхода остается неединственность решения, т.е. для разных наборов стартовых скоростных моделей при одинаковых входных параметрах ( $T_p$ ,  $T_s$  и  $V_p/V_s$ ) можно получить разные результаты локализации. Одним из возможных рабочих решений этой проблемы является использование априорной информации о скоростных свойствах изучаемого блока геологической среды.

Нами проведен анализ предыдущих результатов глубинного сейсмического изучения Центрального Байкала и построены сводные 1D модели (рис. 3) 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) [18].

В качестве стартовых скоростных моделей для расчетов в программе Huroellipse предлагается использовать усредненные модели, представленные на рис. 3 красными кривыми. Поскольку технические возможности программы Huroellipse не позволяют задавать нелинейно-градиентные модели, то для низкоскоростных условий задается градиентно-однородная модель (сплошная красная линия), для высокоскоростных – линейно-градиентная (пунктирная линия).

Расчет положения очага в программе Huroellipse осуществляется в итерационном режиме путем коррекции многокомпонентной скоростной модели с целью снижения временных невязок P и S волн. Основным ориентировочным критерием при подборе решения является время в очаге ( $T_0$ ), полученное из графика Вадати. Окончательно подобранным считается решение, не превышающее заданного порога точности по  $T_0$  и rms.

Предварительные результаты уточненной локализации в сравнении с первоначальным вариантом представлены на рис. 4 на примере Кударинского землетрясения и его афтершоков. Красным цветом на рисунке отмечены результаты стандартных решений с использованием 1D слоистой модели, описанной в [10].

Основной объем гипоцентров размещается в интервале глубин от 5 до 20 км, что, как было отмечено выше, является заниженной оценкой вследствие формирования преломленной волны в расчетах времен пробега в программе Hypoellipse. Уточненная локализация с применением нового методического подхода (обозначена черным цветом) характеризуется заглублением гипоцентров на величину от 1 до 17 км относительно исходного варианта.

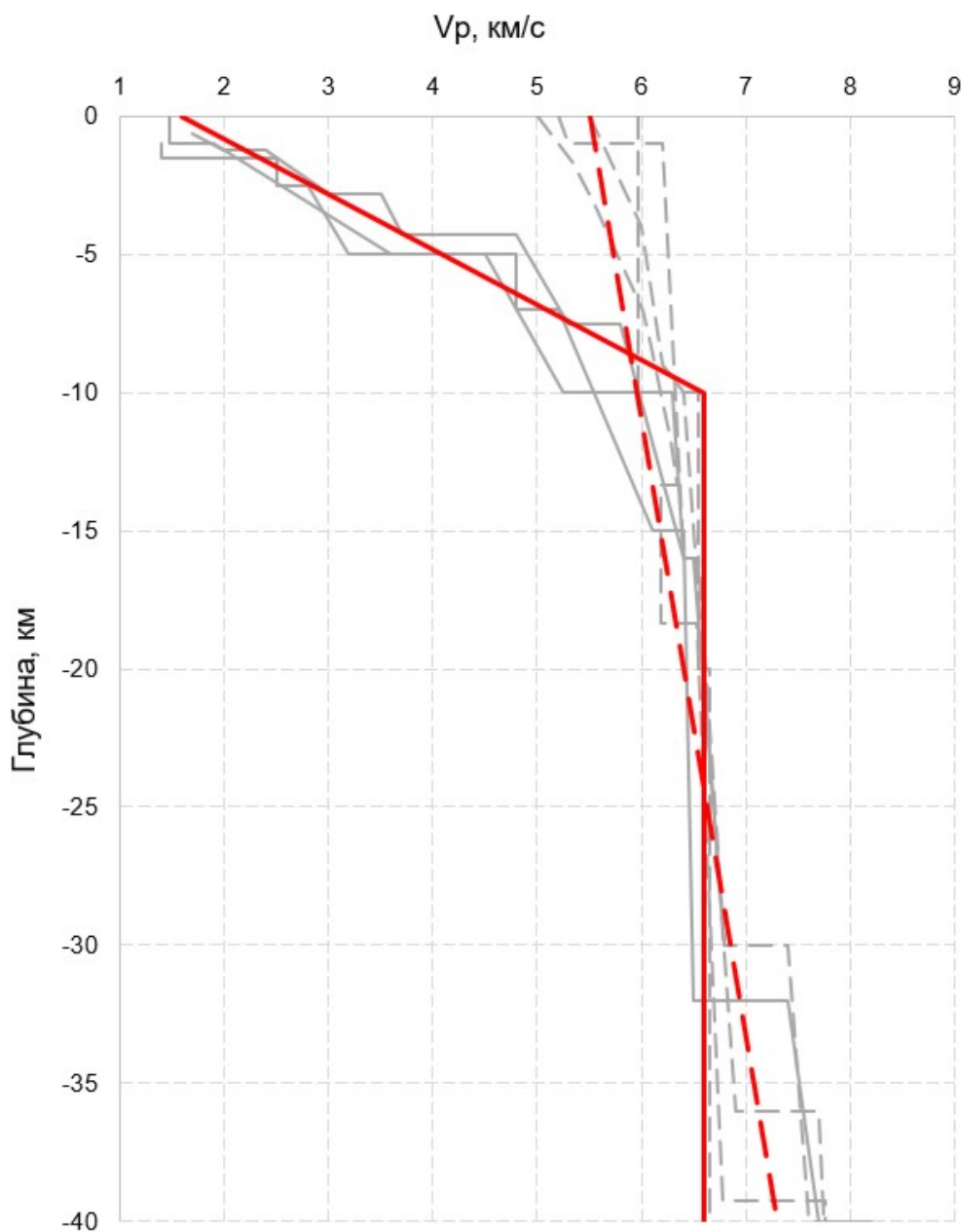


Рис. 3. Набор 1D скоростных моделей для района центральной части озера Байкал (сплошные линии соответствуют низкоскоростным условиям, пунктирные - высокоскоростным): серые линии – модели, построенные по данным из литературных источников; красные – их аппроксимация градиентно-однородными и линейно-градиентными моделями, используемая для расчетов в Hypoellipse



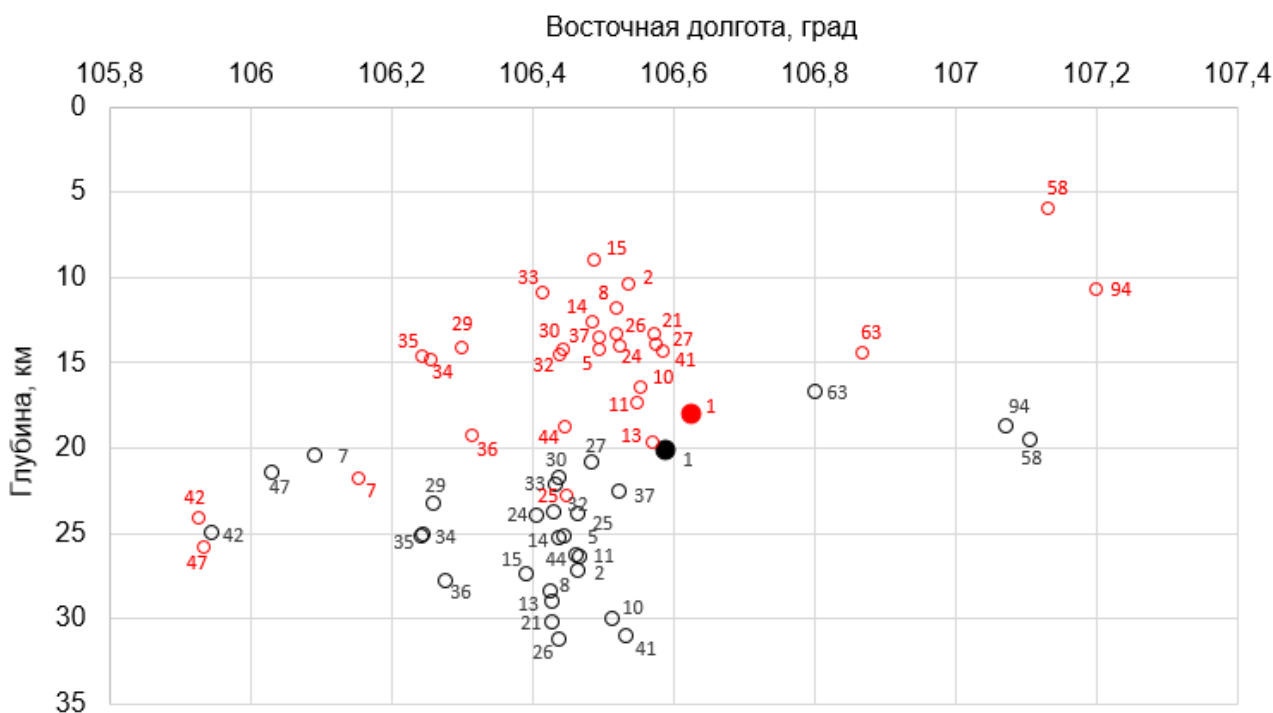


Рис. 4. Результаты локализации очагов событий (кружки с номером) на примере Кударинского землетрясения [13]: красным цветом показано первоначальное решение, черным – уточненное. Главный толчок обозначен сплошными кружками под номером 1

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 “Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики”.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lahr C. HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern. – U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2012. – 119 с.
2. Суворов В.Д., Тубанов Ц.А., Гилёва Н.А. Релокация афтершоков Култукского землетрясения методом квадратичных координат // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных, тезисы XV Международной сейсмологической школы, г. Новосибирск, Россия, 6–10 сентября 2021 г. – Обнинск, 2021. – С. 1-94.
3. Годзиковская А.А. Еще раз о глубоких землетрясениях Кавказа // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2017. – Т. 44. – №3. – С. 41-56.
4. Бурмин В.Ю., Шумлянская Л.А. Комментарий к статье В.Е. Кульчицкого, Б.Г. Пустовитенко и В.А. Свидловой «О глубинах очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона» // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2017. – Т. 44. – №3. – С. 103-112.
5. 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.

6. Deverchere J., Petit C., Gileva N., Radziminovitch N., Melnikova V., Sankov V. Depth distribution of earthquakes in the Baikal rift system and its implications for the rheology of the lithosphere // *Geophys. J. Int.* – 2001. – №. 146. – P. 714–730.
7. Bondar I., Myers S., Engdahl R., Bergman E. Epicentre accuracy based on seismic network criteria // *Geophys. J. Int.* – 2004. – №156. – P. 483–496.
8. Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф. Земная кора и ее изостатическое состояние в Байкальской рифтовой зоне и сопредельных территориях по данным ГСЗ // *Геология и геофизика.* – 1999. – Т. 40. – №3. – С. 304-316.
9. Brink U., Taylor M. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // *Journal of Geophysical Research.* – 2002. – Vol. 107. – №B7. – P. 1-15.
10. 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.
11. Nielsen C., Thybo H. Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics.* – 2009. – №470. – P. 298-318.
12. Diehl T., Kissling E., Herwegh M., Schmid S. Improving Absolute Hypocenter Accuracy with 3-D Pg and Sg Body-Wave Inversion Procedures and Application to Earthquakes in the Central Alps Region // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* – 2021. – Vol.126. – №12. – 26 p.
13. Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Кобелева Е.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. (mw = 5.5) на озере Байкал: результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // *Вопросы инженерной сейсмологии.* – 2021. – Т. 48. – №4. – С. 32–47.
14. Бурмин В.Ю., Шумлянская Л.А. Современная сейсмичность Крыма // *Вопросы инженерной сейсмологии.* – 2015. – Т. 42. – №2. – С. 5-16.
15. Славина Л.Б., Кучай М.С., Лиходеев Д.В., Абдуллаева Р.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния зон сейсмотектонической 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.
16. Braeuer B., Asch G., Hofstetter R., Haberland Ch., Jaser D., El-Kelani R., Weber M. Microseismicity distribution in the southern Dead Sea basin and its implications on the structure of the basin // *Geophys. J. Int.* – 2012. – №188. – P.873–878.
17. Chen H., Chiu J., Pujol J., Kim K., Chen K., Huang B., Yeh Y., Chiu S. A Simple Algorithm for Local Earthquake Location Using 3D  $V_p$  and  $V_s$  Models: Test Examples in the Central United States and in Central Eastern Taiwan // *Bulletin of the Seismological Society of America.* – 2006. – Vol. 96. – №1. – P.288–305.
18. 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.

© А. В. Беляшов, Ц. А. Тубанов, 2022