

А. В. Беляшов^{1✉}, И. П. Шерстюк¹

Усовершенствование гипоцентрии локальных землетрясений Центрального Байкала

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В числе событий, задействованных в процессе релокации коровых землетрясений в районе Центрального Байкала за 2001-2003 гг., оказались промышленные взрывы на Черемшанском кварцитовом руднике вблизи пос. Турунтаево. Несмотря на поверхностную природу источников указанных событий, глубина релоцированных гипоцентров составила порядка 7-10 км, что обусловлено усреднением локационного решения при определении T_0 через среднюю линию V_p/V_s на суммарном графике Вадати. Проведена оценка отклонений гипоцентрии, которые могут достигать 15 км при разнице между исходными и усредненными значениями T_0 более 1 сек. При этом решения, полученные с использованием исходных значений T_0 , зачастую определены через аномально повышенные скорости сейсмических волн и не могут рассматриваться в качестве адекватных, поэтому продолжено лоцирование коровых землетрясений с помощью усредненных значений T_0 .

Ключевые слова: коровые землетрясения Центрального Байкала, график Вадати, гипоцентрия

A. V. Belyashov^{1✉}, I. P. Sherstyuk¹

Central Baykal local earthquakes hypocentria development

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Abstract. Among the events involved in the relocation of crustal earthquakes in the Central Baikal region (for the 2001-2003yy.) were industrial explosions at the Cheremshansky quartzite mine near the Turuntaevo village. Despite the shallow nature of the sources of these events, the depth of the relocated hypocenters was about 7-10 km, which is due to the averaging of the location solution when determining the T_0 through the median V_p/V_s line on the generalized Wadati diagram. The hypocentric deviations were estimated, which can reach 15 km if the difference between the initial and average T_0 values is more than 1 second. At the same time, the solutions obtained using the initial T_0 values are often determined through abnormally elevated values of the velocity of seismic waves and cannot be considered adequate, therefore, the localization of crustal earthquakes is carried out using averaged T_0 values.

Keywords: Central Baykal crustal earthquakes, Wadati diagram, hypocentria

Введение

Представление о сейсмичности того или иного региона базируется, в том числе, на результатах локализации гипоцентров землетрясений, формирующих в изучаемом пространстве сейсмогенерирующие структуры (трещины, разломы). Решающим фактором, при этом, является точность определения положения ги-

поцентов. Качество гипоцентрии прошлых лет ограничено различными методическими условиями обработки данных. Так, например, землетрясения в Центральном Байкале, включенные в базу сейсмологических данных (БД) [1], лоцированы по временам вступления только Р-волн в однородной скоростной модели ($V_p = 6.15$ км/с). Соответственно, актуальной становится задача релокации давних землетрясений с применением усовершенствованных методов обработки данных.

Релокация архивных землетрясений 2001-2003 гг. проводится в соответствии с методическим подходом, описанным в [2] – по всем событиям строится суммарный график Вадати (с определением промежуточных значений T_0 на этапе предварительной локализации), на котором определяется срединная линия V_p/V_s [3, 4]. С использованием фиксированного угла наклона линии V_p/V_s по каждому из событий рассчитываются усредненные значения T_0 и выполняется локация гипоцентров событий в программе Hypoellipse [5].

Отбор событий для обработки выполнен с использованием Базы сейсмологических данных в соответствии со следующими критериями: каждое событие должно быть зарегистрировано не менее, чем 5 сейсмическими станциями, с максимально возможным азимутальным покрытием и эпицентрными расстояниями не более 110 км [6]. Распределение эпицентров отобранных в обработку события показано на рис. 1.

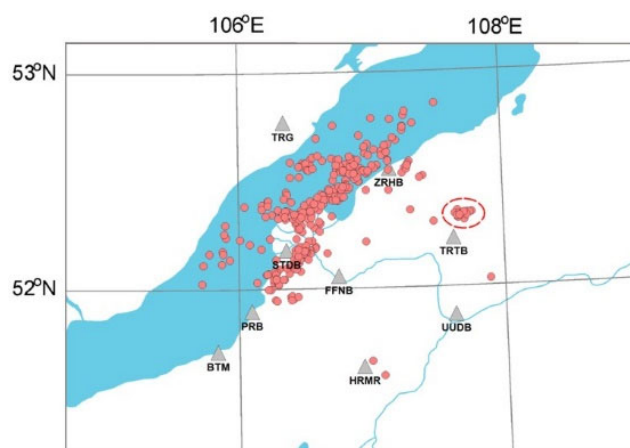


Рис. 1. Распределение эпицентров сейсмических событий (красные кружки) за 2001-2003 гг. в районе Центрального Байкала в соответствии с БД [5] (серые треугольники – сейсмические станции с кодовым названием)

В работе задействованы данные, полученные на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

По ходу обработки обратила на себя внимание группа событий, выделяющихся по определенным признакам:

- концентрация в одном месте севернее станции TRTB (на рис. 1 отмечено красным пунктиром);

- относительно небольшая глубина гипоцентров (по БД – в основном, в районе 13 км, после релокации – от 7 до 10 км);

По данным из открытых источников, в этом месте расположен Черемшанский кварцитовый рудник, разработка которого ведется открытым способом с использованием промышленных взрывов. Анализ сейсмограмм указанных выше событий (пример на рис. 2) подтвердил предположение об их взрывной природе на основании следующих факторов:

- хорошо выраженная звуковая волна на ближней станции TRTB;
- слабо проявленная S-волна на более дальних станциях и в целом ухудшение качества сигнала с удалением от эпицентра события.

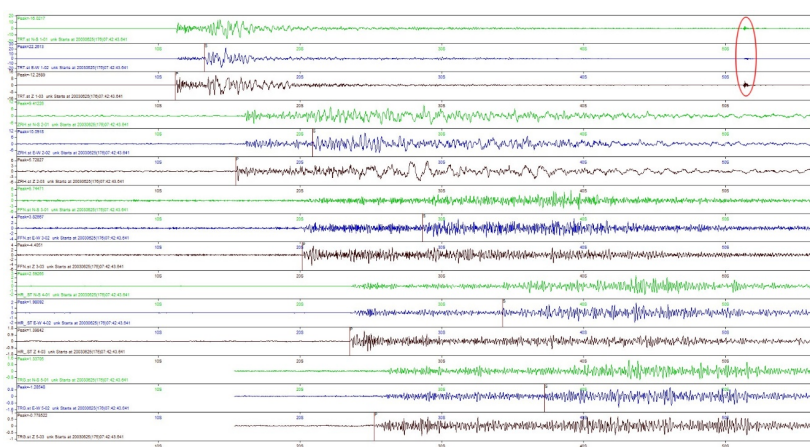


Рис. 2. Сейсмическая запись одного из взрывов на Черемшанском руднике (красным овалом отмечена звуковая волна, зарегистрированная на ближней станции TRTB)

Современная конфигурация рудника имеет нелинейную структуру с горизонтальными размерами порядка 2 км и оценочной глубиной не более 100 м.

Полученная в результате релокации оценка глубины гипоцентров по данным событиям (7-10 км) хоть и снизилась относительно исходных значений (порядка 13 км), тем не менее также является ошибочной.

Релокация карьерных взрывов

Поскольку для взрывных событий известны некоторые из локационных параметров - глубина очага и приблизительные координаты эпицентра (информацию о точных размерах карьера в 2003 году найти не удалось), была выполнена попытка использовать их для калибровки методики локализации. С использованием реальных времен вступления для фиксированных координат эпицентра и нулевой глубины были определены такие расчетные параметры, как время T_0 , средние скорости Р-волны (пересчитанные для стартовой модели в скорость на кровле с учетом глубины проникания сейсмического луча) и постанционные зна-

чения V_p/V_s , которые для заданных условий оказались повышенными (с максимальными значениями для ближней станции TRTB).

Проведена релокация карьерных событий в программе Hypoellipse. Результирующие ошибки составили:

- по глубине – средняя 0.97 км (минимальная – 0 км, максимальная – 2.3 км);
- по эпицентрии (относительно центральной точки современного карьера) – средняя 3.73 км (минимальная – 0.37 км, максимальная – 5.48 км).

Столь существенные ошибки локации, особенно по эпицентрии, объясняются, во-первых, отсутствием информации о точных координатах карьерных событий, во-вторых, их неблагоприятными параметрами: расположением за пределами наблюдательной апертуры и невысоким качеством сигнала S-волны из-за импульсного поверхностного источника (см. рис. 2).

Оценка локационных отклонений от усредненных решений

Вернемся к результату стандартной локализации карьерных событий, где ошибки по глубине (до 10 км) обусловлены отклонением исходного значения T_0 от расчетного, полученного через срединную линию V_p/V_s на суммарном графике Вадати – усреднение повышает надежность гипоцентрии, зачастую, в ущерб точности. Для численной оценки ошибок гипоцентрии по каждому из событий рассчитана разница между исходным и усредненным значениями T_0 , которая в среднем для всех событий составила -0.05 сек в диапазоне от -1.35 до 1.05 сек со среднеквадратичным отклонением 0.47 сек. Проведена локализация в программе Hypoellipse и определены отклонения по глубине и эпицентрии между исходными и усредненными результатами. К настоящему времени полноценно обработано порядка 50 коровых землетрясений 2003 г., графики зависимости отклонений по эпицентрии и глубине от разницы между исходными и усредненными значениями T_0 приведены на рис. 3.

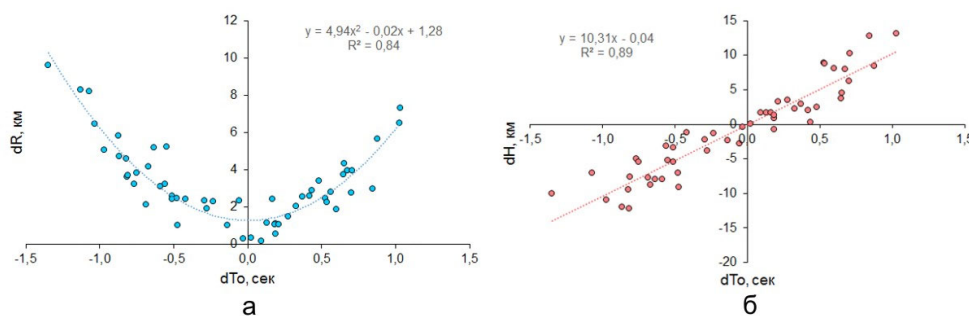


Рис. 3. Графики зависимости отклонений по эпицентрии (dR, а) и глубине (dH, б) от разницы между исходными и усредненными значениями T_0 (dT_0)

Закономерность распределения зависимости по эпицентрии описывается полиномом второй степени ($R^2=0.84$), по глубине – линейным уравнением ($R^2=0.89$). Отклонения гипоцентрии могут достигать 15 км при разнице между исходными и усредненными значениями T_0 более 1 сек (рис. 3). При этом решения,

полученные через исходные значения T_0 , зачастую характеризуются аномально повышенными значениями скорости сейсмических волн (более 7 км/с для скорости Р-волн на кровле земной коры) и не могут рассматриваться в качестве адекватных. В связи с этим принято решение продолжить локализацию с использованием усредненных значений T_0 , рассчитанных через суммарный график Вадати.

Предварительные результаты релокации землетрясений 2003 г.

К настоящему моменту полноценно релоцированы порядка 200 коровых землетрясений 2003 года, результаты представлены на рис. 4.

Отмечается общее снижение глубины релоцированных гипоцентров в среднем на 6.5 км, отклонение по эпицентрии составило в среднем 2.9 км. Желтым ромбом на рис. 4 отмечено положение центральной точки Черемшанского кварцитового рудника в его современной конфигурации. Хорошо заметно резкое уменьшение переопределенной глубины гипоцентров промышленных взрывов относительно результатов БД с глубиной, в основном, в интервале от 13 до 16 км (отмечено на рис. 4 красным пунктирным овалом).

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”.

Особая благодарность за предоставление исходных сейсмических записей сотрудникам Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН и ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

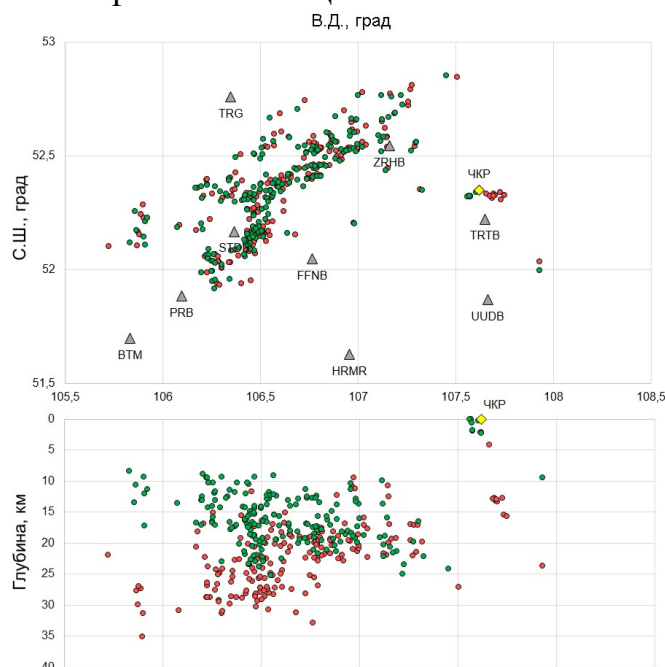


Рис. 4. Результаты релокации коровых землетрясений 2003 года: красные кружки – исходные данные по БД; зеленые – релоцированные; серые треугольники – сейсмические станции с кодовым названием; желтый ромб – Черемшанский кварцитовый рудник.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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; правообладатель ФГБУН ГИН СО РАН, ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН. Дата регистрации 27.08.2019 г. – Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем», № 9.
2. Беляшов А.В. Уточненная гипоцентрия коровых землетрясений в районе Центрального Байкала // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2024. – Т. 51. – № 4. – С. 62-72.
3. Бурмин В.Ю. Некоторые обратные кинематические задачи сейсмологии: теория, эксперименты, результаты. – М.: Наука, 2019. – 276 с.
4. Бурмин В.Ю. Мажорантные оценки погрешностей в определении t_0 и VP/VS 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.
5. 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 p.
6. Bondár I., Myers S.C., Engdahl E.R., Bergman E.A. Epicentre accuracy based on seismic network criteria // Geophysical Journal International. – 2004. – Vol. 156. – № 3. – P. 483-496.

© А. В. Беляшов, И. П. Шерстюк, 2025