УДК 550.34

Научная статья

Сравнение оценок параметров гипоцентров землетрясений Камчатского региона из разных каталогов

Ю. В. Шевченко

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск Камчатский,
683006, бульвар Пийпа, 9

E-mail: klb@emsd.ru

Для землетрясений Камчатского региона и землетрясений в районе западной части Алеутско – Командорского желоба рассчитаны невязки между временем пробега волн P исходя из оценки времени в очаге и временем пробега в соответствии с моделью Земли АК135. Выявлено систематическое расхождение значений времен пробега, полученных этими способами, причем величина невязки меняется в зависимости от применяемого метода оценки параметров гипоцентров. Результаты сравнения отражают реальную оценку точности координат гипоцентров в каталогах. Проверка качества привязки сейсмических трасс к точному времени показало наличие сбоев синхронизации на сейсмограммах почти всех комплектов сейсмографов, что может быть одной из причин невязок.

Ключевые слова: гипоцентр, невязки вступлений, синхронизация сейсмограмм

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-141-149

Поступила в редакцию: 09.02.2021

В окончательном варианте: 09.03.2021

Для цитирования. Шевченко Ю. В. Сравнение оценок параметров гипоцентров землетрясений Камчатского региона из разных каталогов // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2021. Т. 35. № 2. С. 141-149. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-141-149

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Шевченко Ю. В., 2021

Введение

Если координаты гипоцентра землетрясения и сейсмической станции известны, можно рассчитать время пробега P волн в соответствии с референтной моделью АК135. С другой стороны, зная оценку времени начала землетрясения и время прихода волны P на станцию, определяем наблюдаемое время пробега. Значительное расхождение между значениями времен пробега волн P полученными этими способами может указывать на существенную ошибку в оценке положения гипоцентра и времени землетрясения. В представленной работе отклонение времен пробега от модели использовано для сравнения оценок координат из трех каталогов: оперативного каталога, формируемого в Камчатском филиале ЕГС РАН [1] (с

Финансирование. Исследование выполнялось без финансовой поддержки фондов.

апреля 2009 года данные этого каталога входят в окончательный сводный каталог); каталога, формируемого по результатам камеральной обработки (до апреля 2009 года); каталога IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). Результаты сравнения отражают реальную оценку точности координат гипоцентров в каталогах.

Использованные материалы и методика расчета

Расчет расхождения времен пробега Р волн выполнен для нескольких комбинаций эпицентральный район землетрясений – сейсмическая станция (с/с): Командорские и Алеутские острова – станция “Петропавловск” (PET); северные Курильские острова и южная Камчатка – станция “Айдак” (ADK); север Камчатки - станция PET; север Камчатки - станция “Беринг” (BKI). Положение с/с и районы выборки землетрясений показаны на рис. 1.

Рис. 1. Положение сейсмических станций PET, BKI, ADK и эпицентральных районов землетрясений (выделены контуром): 1 - северные Курильские острова и южная Камчатка; 2 - север Камчатки; 3 - Командорские и Алеутские острова

Записи чувствительных широкополосных приборов STS-1 или ЗТВ установленных на станциях PET, ADK и BKI использовались для выделения вступлений волн Р. Высота станций над уровнем моря незначительна. Референтное время пробега волн Р рассчитывалось в соответствии с одномерной сферической моделью Земли AK135. Станции расположены достаточно далеко (400÷2000 км) от районов выборок

землетрясений, что оправдывает надёжность расчета времени пробега в соответствии с референтной моделью. В работе использовались события за 1995–2017 г. с магнитудой $M > 5$.

В Камчатском филиале ЕГС РАН при оперативном расчете координат гипоцентров землетрясений используется пакет программ “DIMAS” [2], при камеральной обработке программа “GIP” [3]. В этих программах при расчете параметров гипоцентра применяются итерационные методы наименьших квадратов для нелинейных функций. В программе “DIMAS” при поиске минимума суммы квадратов невязок расчетных и наблюдаемых времен вступления волн используется вариант метода прямого поиска по сетке возможных значений параметров гипоцентра. Размер области, в которой суммарная невязка меньше трех минимальных значений невязки принимается за оценку точности расчета координат гипоцентра. В программе “GIP” при поиске минимума суммы квадратов невязок применяется метод с производными с линеаризацией критерия, известный как метод Маркуардта [4]. За оценку точности расчета координат гипоцентра в программе “GIP” принимается эллипсоид, полуоси которого соответствуют среднеквадратичному отклонению параметров. Дисперсия параметров рассчитывается как произведение диагонали ковариационной матрицы, рассчитанной в точке минимума невязки, на сумму квадратов невязки на одну степень свободы.

Результаты исследований

На рис. 2 показаны графики расхождения наблюдаемых и модельных времен пробега Р волн ($\Delta t_p = t_p - t_p$) для землетрясений в западной части Командорских и Алеутских островов до станции РЕТ. Для получения невязок времен пробега использованы данные 87 землетрясений. Среднее смещение для данных из каталога IRIS $\bar{\Delta t}_p = 1.0$, стандартное отклонение $\sigma(\Delta t_p) = 1.3$ с. Для данных оперативной обработки $\bar{\Delta t}_p = 5.2$, $\sigma(\Delta t_p) = 0.83$ с. При камеральной обработке $\bar{\Delta t}_p = 2.2$, $\sigma(\Delta t_p) = 0.78$ с.

Рис. 2. Расхождение между наблюдаемым и модельным временем пробега Р волн в зависимости от эпицентрального расстояния и глубины для землетрясений в западной части Командорских и Алеутских островов до станции РЕТ

На рис. 3 показаны графики расхождения наблюдаемых и модельных времен пробега P волн для землетрясений в районе северных Курильских островов и южной Камчатки до станции ADK. При расчете невязок времени пробега использованы данные для 40 землетрясений.

Рис. 3. Расхождение между наблюдаемым и модельным временем пробега P волн в зависимости от эпицентрального расстояния и глубины для землетрясений в районе северных Курильских островов и южной Камчатки до станции ADK

Среднее смещение невязки времен пробега P волн для землетрясений из зоны северных Курильских островов и южной Камчатки до станции ADK по данным оперативной обработки $\bar{\Delta t_p} = 4.9$ с, стандартное отклонение $\sigma(\Delta t_p) = 1.3$ с. При камеральной обработке $\bar{\Delta t_p} = 2.1$ с, $\sigma(\Delta t_p) = 2.5$ с.

На рис. 4 показаны графики расхождения модельных и наблюдаемых времен пробега P волн для землетрясений севера Камчатки до станций ВКИ и РЕТ в зависимости от эпицентрального расстояния и глубины. При расчете времен пробега использованы записи 18 землетрясений.

Рис. 4. Расхождение между наблюдаемым и модельным временем пробега P волн до станций ВКИ и РЕТ в зависимости от эпицентрального расстояния и глубины для землетрясений севера Камчатки

Среднее смещение невязки времен пробега Р волн для землетрясений севера Камчатки до станций ВКИ $\bar{\Delta t}_p = 0.92$ с, стандартное отклонение $\sigma(\Delta t_p) = 1.5$ с, до станций РЕТ $\bar{\Delta t}_p = 3.4$ с, стандартное отклонение $\sigma(\Delta t_p) = 0.94$ с. Привлекает внимание значительное расхождение смещений невязок времен пробега Р волн для землетрясений севера Камчатки до станции ВКИ и до станции РЕТ.

При получении невязок Δt_p было выявлено несколько случаев сбоя синхронизации сейсмических записей (более минуты). Такие данные не учитывались при построении представленных выше графиков.

На 14 сейсмических станциях некоторое время применялось два прибора с независимой синхронизацией. Используя записи землетрясений на этих станциях, можно проследить несоответствие в синхронизации сейсмограмм на разных приборах и сделать вывод о надежности привязки сейсмических трасс ко времени.

На рис. 5 представлены графики относительного сдвига времени синхронизации на станциях, имеющих два комплекта сейсмографов.

Станции, на которых использовались два сейсмографа с независимой синхронизацией указаны в таблице.

Таблица

Станции, на которых использовались два сейсмографа с независимой синхронизацией	
станция (код)	датчик/регистратор
Беринг (ВКИ)	3TB/GSR24, 5T/GSR24
Дальний (DAL)	6TD, 5TD
Институт (IVS)	3TB/GSR24, 5T/GSR24
Карымшина (KRM)	3TB/GSR24, 5TD
Ключи (KLY)	KS2000/DM24, 5TD
Крутоберегово (KBG)	3TB/GSR24, 5T/GSR24
Паужетка (PAU)	6TD, 5TD
Плато (SK2)	6TD, 5TD
Северо-Курильск (SKR)	3TB/GSR24, 5T/GSR24
Тиличики (TL1)	3TB/GSR24, 5T/GSR24
Тумрок-источники (TUMD)	6TD, 5TD
Ходутка (KDT)	6TD, 5TD
Шипунский (SPN)	6TD, 5TD
Шумшу (SK3)	6TD, 5TD

Обсуждение результатов и выводы

Для разных комбинаций “группа землетрясений – станция” выявлено значительное расхождение во временах пробега волн Р, рассчитанных исходя из оценок параметров в каталогах от времени пробега, соответствующим модели Земли АК135. Причем невязки времен из разных каталогов существенно отличались. В расчетах невязок использованы время и координаты землетрясений из каталогов КФ ФИЦ ЕГС РАН и каталога IRIS.

В случае землетрясений в западной части Командорских и Алеутских островов (зона 3 на рис. 1) оценкам параметров гипоцентра, полученным по разным методикам, соответствуют разные смещения невязок: для каталога IRIS - $\bar{\Delta t}_p = 1.1$ с, для

Рис. 5. Графики относительного сдвига времени синхронизации сейсмограмм для двух приборов на станциях VKI, DAL, IVS, KBG, KDT, KLY, KRM, PAU, SK2, SK3, SPN, TL1, TUMD

оперативного каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН $\Delta \bar{t}_p = 5.2$ с, для каталога камеральной обработки КФ ФИЦ ЕГС РАН $\Delta \bar{t}_p = 2.2$ с, причем невязки из каталога IRIS для оценок параметров землетрясений с глубиной до 50 км характеризуются повышенным разбросом.

Невязки времен пробега Р волн до станции ADK для землетрясений на участке сейсмофокальной зоны северные Курильские острова и южная Камчатка (зона 1 на рис. 1) смещены на $\Delta \bar{t}_p = 4.9$ с при использовании данных из оперативного каталога ЕГС РАН и на $\Delta \bar{t}_p = 2.1$ с в случае камеральной обработки. Невязки для оценок параметров неглубоких землетрясений при камеральной обработке имеют повышенный разброс. Для параметров гипоцентров из оперативного каталога ЕГС РАН можно отметить близость смещения оценок невязок для вступлений Р волн

на станции РЕТ от землетрясений в районе Алеутско – Командорского желоба, и обратно, для вступлений Р волн на станции АДК от землетрясений в районе Курило-Камчатского желоба.

Значительное расхождение смещения невязок времен пробега Р волн для землетрясений севера Камчатки (зона 2 на рис. 1) до станции ВКИ ($\Delta t_p = 0.93$ с) и до станции РЕТ ($\Delta t_p = 3.0$ с) может быть связано с малым весом данных станции РЕТ при локализации землетрясений в этой зоне. Другой причиной такого расхождения может быть заниженная скорость распространения Р волн вдоль фокальной зоны под восточным берегом Камчатки по отношению к модели АК135.

Невязка между наблюдаемым временем пробега Р волн и временем в соответствии с таблицами АК135, как правило, не должна превышать 1 с [5]. Расстояния от станции до эпицентров во всех случаях было в пределах 400-2000 км, что выходит за пределы используемого в расчетах регионального годографа. Поэтому, для всех трёх вариантов расчета, можно считать удовлетворительной случайную составляющую в оценке положения гипоцентров, связанную в основном с ошибками снятия вступлений волн. Систематический сдвиг невязок, скорее всего, обусловлен методикой определения положения гипоцентра, т.е. алгоритмом расчета и применяемым годографом. Некоторый вклад в невязку Δt_p может вносить отклонение внутренней структуры Земли в областях субдукции от одномерной референтной модели АК135 и недостаточно точная синхронизация сейсмических записей. Следует отметить, что невязке $\Delta t_p = 1$ с соответствует смещение положения гипоцентра примерно на 8 км. Все использованные в работе землетрясения имели магнитуду более 5 и были зарегистрированы почти на всех станциях сети с хорошим качеством вступлений сейсмических волн. Для более слабых событий количество используемых в расчете станций снижается, что приводит к ухудшению качества вступлений и росту ошибки в определении положения гипоцентров. Поэтому смещение положения гипоцентров, соответствующее полученным невязкам, носит оптимистический характер.

Сбои в синхронизации сейсмических трасс случаются почти на всех цифровых сейсмических станциях. Поскольку все станции на Камчатке работают автономно и многие труднодоступны, нарушение синхронизации может продолжаться несколько месяцев до посещения станции техническим персоналом. Если на станции используются приборы с независимой синхронизацией, то при расхождении времен вступлений можно выявить комплект с неверной синхронизацией. Если на станции используется только один приемник точного времени, то оперативное обнаружение сбоя в синхронизации сейсмограмм затруднено.

Повысить точность оценки параметров гипоцентров (особенно глубины) на Камчатке можно увеличивая плотность существующей сети станций и надежность синхронизации сейсмических трасс. Последнее проще всего сделать путем использования на цифровых станциях двух приборов с независимой синхронизацией, что дополнительно позволит расширить динамический диапазон движений грунта, регистрируемых без клиппирования.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Список литературы/References

- [1] Чеброва А. Ю., Чемарев Е. А., Матвеенко Е. А., Чебров Д. В., “Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции”, *Геофизические исследования*, **21:3** (2020), 66-91. [Chebrova A. Yu., Chemarev Ye. A., Matveyenko Ye. A., Chebrov D. V., “Yedinaya informatsionnaya sistema seysmologicheskikh dannykh v Kamchatskom filiale FITS YEGS RAN: printsipy organizatsii, osnovnyye elementy, klyuchevyye funktsii”, *Geofizicheskiiye issledovaniya*, **21:3** (2020), 66-91].
- [2] Дрознин Д. В., Дрознина С. Я., “Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS”, *Сейсмические приборы*, **46:3** (2010), 22-34. [Droznin D. V., Droznina S. Ya., “Interaktivnaya programma obrabotki seysmicheskikh signalov DIMAS”, *Seysmicheskiiye pribory*, **46:3** (2010), 22-34].
- [3] Гусев А. А., “Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ”, *Сейсмические приборы*, **1** (1979), 74-81. [Gusev A. A., “Opredeleniye gipotsentrov blizkikh zemletryaseniy Kamchatki na EVM”, *Seysmicheskiiye pribory*, **1** (1979), 74-81].
- [4] Химмельблау Д. М., *Анализ процессов статистическими методами*, Мир, М., 1973, 756 с. [Khimmel'blau D. M., *Analiz protsessov statisticheskimi metodami*, Mir, M., 1973, 756 pp.]
- [5] Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R., “Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes”, *Geophysical Journal International*, **122** (1995), 108-124.

Comparison of estimates parameters of earthquakes in the Kamchatka region from different catalogs

Yu. V. Shevchenko

Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences;
Petropavlovsk Kamchatsky, 683006, Piip Boulevard, 9;

E-mail: klb@emsd.ru

The article presents the results of work with such devices as the digital engineering seismic station "TELSS - 3" (LLC "Geosignal"), complete with seismic streamer SM - 20 and seismic receivers GS - 20 DX in order to clarify soil conditions in the valley of the Avacha river in Yelizovsky urban district. The method of refracted waves of seismic exploration was performed for the first time. It is important to note the importance of the seismic station for obtaining primary acoustic data for further refinement of seismic increments. Thanks to the data obtained, it becomes possible to make the right decisions when designing construction objects.

Key words: hypocenter, arrivals residuals, seismogram synchronization

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-141-149

Original article submitted: 19.04.2021

Revision submitted: 16.06.2021

For citation. Shevchenko Yu. V. Comparison of estimates parameters of earthquakes in the Kamchatka region from different catalogs. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **35**: 2, 141-149. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-141-149

Competing interests. The author declares that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. The author contributed to this article. The author is solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by the author.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Shevchenko Yu. V., 2021

Funding. The study was carried out without financial support from foundations.