

## АРТЕФАКТ В КАМЧАТСКОМ КАТАЛОГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ИССЛЕДОВАНИЕ И УСТРАНЕНИЕ

© 2018 А.В. Ландер<sup>1</sup>, Н.А. Шевченко<sup>2</sup>, Е.А. Матвеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,  
г. Москва, 117997; e-mail: land@mitp.ru

<sup>2</sup>Камчатский филиал Федерального исследовательского центра  
«Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, 683006

Согласно имевшимся данным Камчатского регионального каталога в юго-западной части Камчатского региона систематически происходили глубокие землетрясения в стороне от основной сейсмофокальной зоны. За многие годы такие события сформировали достаточно компактную «аномальную» группу, реальное существование которой требовало уточнения. Показано, что присутствие в каталоге этих аномальных событий является артефактом, вызванным многозначностью решений для гипоцентров землетрясений, расположенных в области удаленной от основной сейсмической сети. Результаты удастся улучшить при исключении станционных данных, обладающих максимальными невязками времен вступления волн. Проведено переопределение гипоцентров для 102 глубоких землетрясений из расширенной области, охватывающей аномальные события. Большинство новых решений лежит в пределах Камчатской сейсмофокальной зоны. Соответствующие изменения внесены в Камчатский региональный каталог.

*Ключевые слова:* Камчатский каталог землетрясений, сейсмофокальная зона, гипоцентр, артефакт.

### ВВЕДЕНИЕ

Камчатский региональный каталог землетрясений (KRSC)<sup>1</sup> позволяет достаточно детально проследить форму Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны севернее 50° с.ш., достигающей глубин 650–700 км. Однако на протяжении многих лет юго-западнее Камчатки на больших глубинах в ограниченной области систематически фиксировались события, существенно смещенные к западу от основной поверхности, вокруг которой концентрируются землетрясения сейсмофокальной зоны. Каждое из этих «аномальных» событий можно было бы рассматривать, как случайную грубую ошибку определения координат. Но за многие годы они оказались распределены в пространстве

не хаотично, а сформировали ограниченную, закономерно расположенную группу. Если предположить, что определения координат данных событий заслуживают доверия, то с тектонической точки зрения их положение оказывается весьма необычным. В то же время мировые каталоги NEIC (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) и ISC (<ftp://ftp.isc.ac.uk/pub/isc/catalogue>) не фиксировали в этом районе аналогичного аномального расположения землетрясений. Поэтому требовалось проверить надежность данного наблюдения и, если речь идет об ошибках в определении гипоцентров, по-возможности, их устранить. В настоящей работе исследуется часть Камчатского регионального каталога за период 1962–2009 гг. включительно. Гипоцентры всех землетрясений этого периода наблюдений определены по единой стандартной методике (Чебров и др., 2016).

### АНОМАЛЬНАЯ ГРУППА ГИПОЦЕНТРОВ

При изучении систематических различий в координатах землетрясений, определенных Камчатской региональной и мировыми

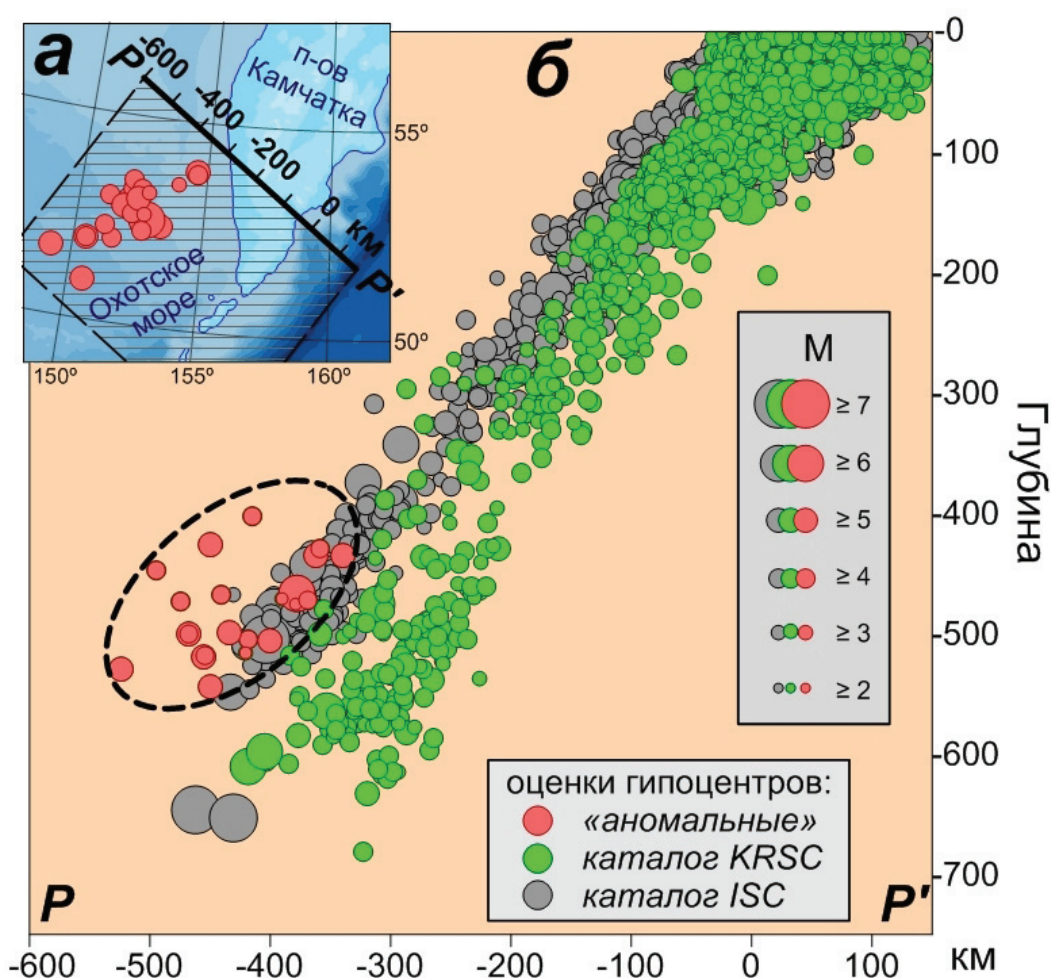
<sup>1</sup>Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук». URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>. В настоящее время в публикациях данных мировых сейсмических сетей соответствующая аббревиатура агентства: «KRSC». — URL: <http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency=KRSC>.

сейсмическими сетями, мы обратили внимание на группу событий, существенно выпадающих по этим параметрам из общих закономерностей (Ландер, Левина, 2008).

В цитируемой работе показано, что для Камчатского каталога характерно расположение гипоцентров землетрясений юго-восточнее соответствующих мировых оценок. Типичные смещения эпицентров составляют около 20 км для мелкофокусных событий и возрастают до 150–200 км в нижней части сейсмофокальной зоны. Смещение гипоцентров объясняется скоростной аномалией, связанной с присутствием под Камчаткой высокоскоростного наклонного слэба погружающейся Тихоокеанской плиты. Трассы волн, распространяющихся к далеким

и близким станциям, выходят из местных гипоцентров почти в противоположных направлениях. Соответственно слэб по разному влияет на направления распространения и времена пробега волн, фиксируемых, с одной стороны, на Камчатке, с другой – по всему остальному миру. В результате на юге Камчатки сейсмофокальная зона, построенная по данным KRSC, выглядит более крутой (примерно на  $7^\circ$ ) и смещенной к юго-востоку по сравнению с аналогичным построением по данным мировых сетей, в частности по каталогу ISC (рис. 1).

Однако в Камчатском каталоге, по состоянию на конец 2009 г., присутствовало также 22 компактно расположенных на глубинах 400–550 км землетрясений, для которых указанная выше



**Рис. 1.** Положение аномальной группы землетрясений (красные кружки) на карте (а) и вертикальном разрезе вкост сейсмофокальной зоны (б). На карте (а) указано сечение PP' вертикальной плоскости разреза, на которую спроецированы гипоцентры из широкой прямоугольной области, ограниченной пунктиром. На разрезе (б) приведены соответствующие гипоцентры землетрясений сейсмофокальной зоны, определенные различными сетями: камчатской региональной и мировой. Аномальная группа землетрясений из каталога KRSC выделена пунктирным овалом.

**Fig. 1.** The position of the anomalous group of earthquakes (red circles) on the map (a) and in a vertical section across the seismic focal zone (b). The map (a) shows the trace PP' of the vertical plane of the section, on which hypocenters are projected from a wide area bounded by a dotted line. The section (b) shows the corresponding hypocenters of earthquakes of the seismic focal zone, defined by various networks: Kamchatka regional and Worldwide. The anomalous group of earthquakes from the KRSC catalog is marked with a dashed oval.

закономерность нарушалась. В основном, это события с магнитудами 4–4.5. Их смещение относительно мировых определений было либо незначительным, либо направленным в противоположную сторону на северо-запад. В рамках Камчатского каталога эти события оказываются смещенными на 100–150 км к северо-западу относительно тренда основной сейсмофокальной зоны. Такое их положение требует либо тектонического объяснения, либо проверки на артефакт.

### ЗАВИСИМОСТЬ РЕШЕНИЯ ОТ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИПОЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Для проверки устойчивости результатов гипоцентры 22 аномальных землетрясений были переопределены по методике, существенно отличающейся от стандартной, принятой при построении Камчатского регионального каталога. При этом был сохранен старый набор исходных данных о временах вступлений сейсмических фаз. Была использована программа расчета гипоцентров «НММ» (Свидетельство ..., 2018), ориентированная, в частности, на устранение грубых ошибок во входных данных, возникающих при неправильной идентификации сейсмических фаз.

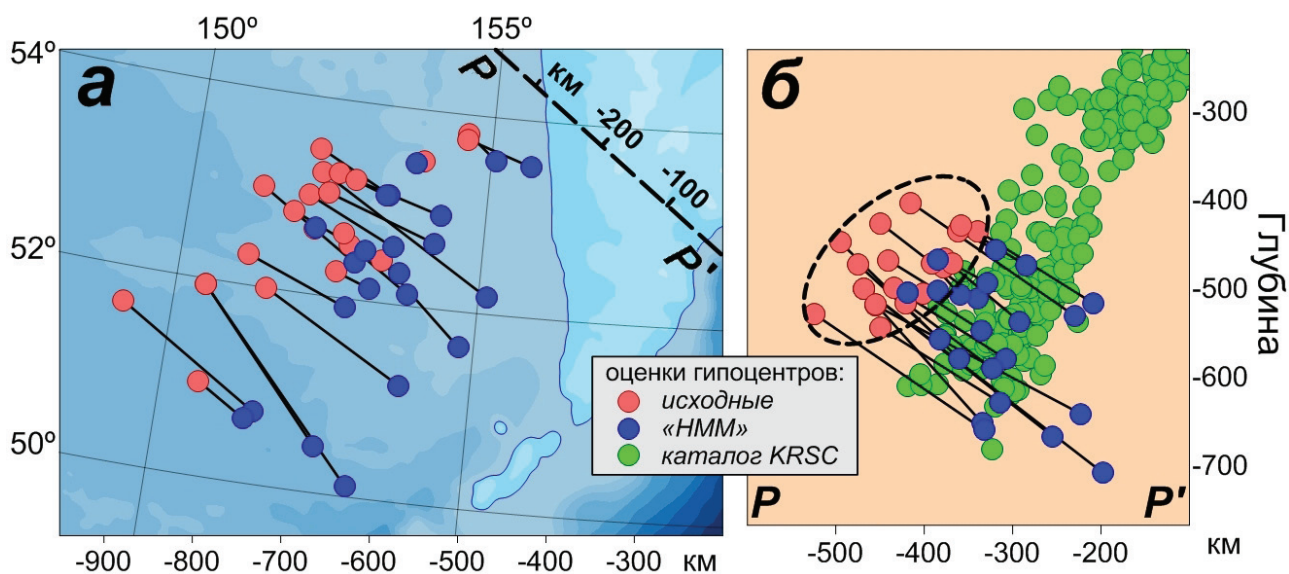
Алгоритм НММ основан на пространственном переборе по системе вложенных трехмерных сеток и вычислении первых разностей времен вступлений, исправленных на теоретическое время пробега от пробного гипоцентра до соот-

ветствующей станции. Для поиска решения используется минимаксный критерий. На каждом шаге перебора фиксированная доля наихудших разностей отбраковывается. За оптимальный гипоцентр принимается точка в пространстве, для которой разность, максимальная по усеченному набору станций, достигает минимума. Очаговое время не участвует в переборе и определяется после его окончания по станционным временам вступлений и положению наилучшего гипоцентра. Автоматическое исключение данных, хуже всего вписывающихся в имеющийся набор, позволяет повысить устойчивость результата.

В результате автоматического пересчета аномальных событий по программе НММ новые положения большинства гипоцентров оказываются значительно ближе к основной сейсмофокальной зоне и, фактически, перестают быть «аномальными» (рис. 2). Такая ситуация позволяет предположить, что причиной появления аномальной группы землетрясений является присутствие в исходном сейсмическом бюллетене не верно идентифицированных фаз, по-видимому, устраненных в процессе работы НММ.

### РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КАМЧАТСКОЙ СЕТИ НА ЮГО-ЗАПАДЕ РЕГИОНА

Направления смещений пересчитанных гипоцентров относительно исходных весьма устойчивы (рис. 2), несмотря на различия в



**Рис. 2.** Сравнение исходных гипоцентров аномальной группы с оценками, рассчитанными программой НММ, на карте (а) и разрезе (б). Соответствующие оценки соединены линиями. Для сравнения с другими рисунками на разрезе также приведены (зелеными кружками) землетрясения сейсмофокальной зоны согласно Камчатскому каталогу.

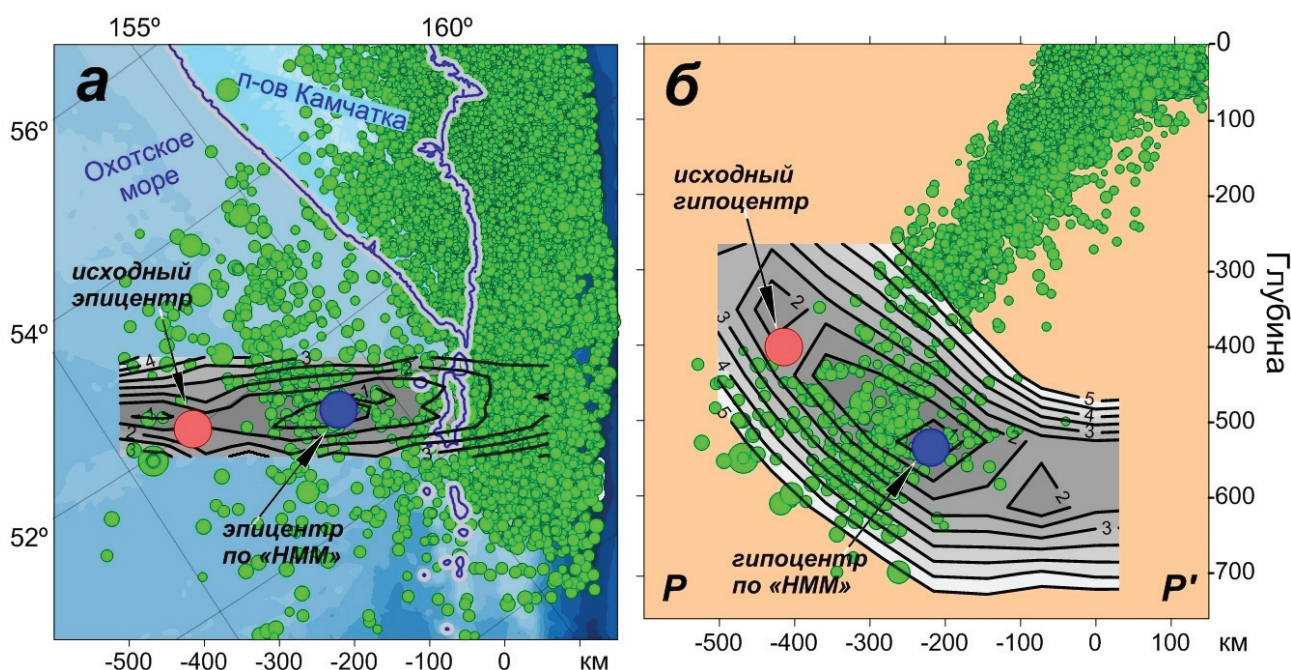
**Fig. 2.** Comparison of the initial hypocenters of the anomalous group with the estimates calculated by the HMM program on the map (a) and section (b). The corresponding estimates are connected by lines. For comparison with other figures in the section, earthquakes of the seismic focal zone are also shown (green circles) according to the Kamchatka catalog.

наборах отбракованных станций. Это позволяет предположить, что ошибки в гипоцентрии в данном случае могут быть связаны с общим расположением аномальной группы землетрясений относительно Камчатской региональной сети. Для количественного ответа на этот вопрос мы исследовали функции, характеризующие разрешающую способность сети для данного региона.

Программа НММ в процессе перебора пробных гипоцентров составляет трехмерные карты максимальных невязок времен пробега использованных фаз, рассчитанные на достаточно подробной пространственной сетке. Поверхности уровня такой карты ограничивают области соответствующего разрешения. Для всех пробных гипоцентров, лежащих внутри построенной области, невязки на всех станциях (кроме отбракованных) не превосходят заданного «уровня разрешения». Заметим, что при выбранном вероятностном распределении невязок те же области можно рассматривать как доверительные. Форма областей разрешения заранее не установлена и, вообще говоря, может оказаться произвольной,

в том числе они могут состоять из нескольких отдельных частей. Построенные подобным образом области разрешения индивидуальны для каждого землетрясения. Но, за исключением окрестности оптимального гипоцентра, их форма часто слабо зависит от конкретных ошибок и определяется в основном расположением использованных станций.

На рисунке 3 приведен пример набора областей разрешения разного уровня для одного из аномальных событий — землетрясения 14 июля 1974 г.  $K=11.3$  ( $ML=4.7$ ). Представлены горизонтальное и вертикальное сечения поверхностей уровня трехмерной карты максимальных невязок. Для обоих сечений в каждой точке плоскости сохраняется максимальное из проектируемых в нее значений. Цифра на изолинии указывает допустимое значение невязки (в секундах), при котором возможные гипоцентры лежат в пределах области, ограниченной данной изолинией. В данном примере расстояние между исходным и пересчитанным гипоцентрами составляет ~250 км. Из (рис. 3б) следует, что данное



**Рис. 3.** Области разрешения для типичного землетрясения из аномальной группы — 14 июля 1974 г.  $K=11.3$  ( $ML=4.7$ ). Приведены изолинии проекции трехмерной функции максимальных невязок на горизонтальную (а) и вертикальную (б) плоскости. В обоих случаях в каждой точке плоскости сохраняется максимальное из проектируемых в нее значений. Вертикальная плоскость (б) параллельна сечению  $PP'$ , изображенному на рис. 1. Карта (а) повернута таким образом, чтобы направление ее оси абсцисс совпадало с направлением вертикального сечения. Цифры на изолиниях — значения соответствующего уровня разрешения (максимальной невязки) в секундах. Фоном (зелеными кружками) показаны соответствующие проекции землетрясений Камчатской сейсмофокальной зоны, согласно каталогу KRSC.

**Fig. 3.** Resolution areas for a typical earthquake from the July 14, 1974.  $K=11.3$  ( $ML=4.7$ ) anomalous group. The contours of the projection of the 3D function of the maximum residuals on the horizontal (a) and vertical (b) planes are also given. The vertical plane (b) is parallel to the section  $PP'$  shown in fig.1. The map (a) is rotated so that the direction of its abscissa axis coincides with the direction of the vertical section. The numbers on the contours are the values of the corresponding resolution level (maximum residual) in seconds. The background (green circles) shows the corresponding projections of earthquakes in the Kamchatka seismic focal zone, according to the KRSC catalog.

смещение возникает при невязках не менее 2 с. Пространственное разрешение (максимальный размер области, ограниченной изолинией 2 с.), соответствующее такой характерной невязке, составляет на обоих сечениях ~500 км.

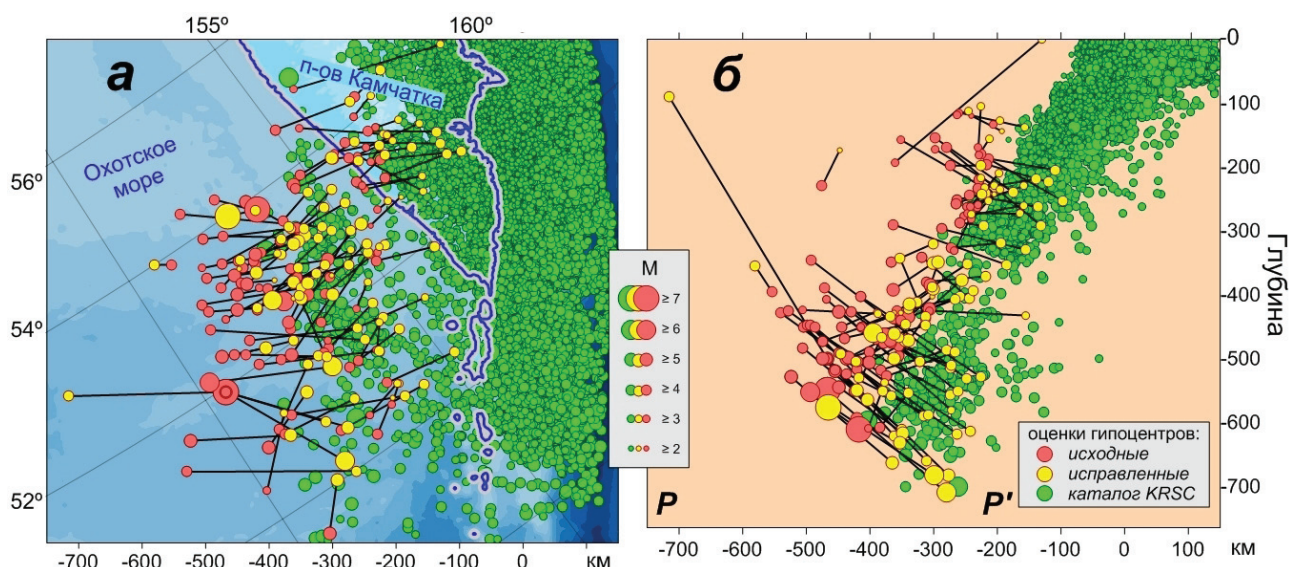
Для гипоцентров глубоких землетрясений, происходящих под Охотским морем и рассчитанных только по данным Камчатской сети, области разрешения (или доверительные области решений) представляют собой узкие «трубки», вытянутые вдоль окружностей, расположенных в вертикальных плоскостях, приблизительно ортогональных зоне субдукции (рис. 3). При ошибках во времена пробега сейсмических фаз из этого района (например, из-за неточности регионального годографа), составляющих первые секунды, неопределенность в определении положения гипоцентра может достигать нескольких сотен километров.

### ИЗМЕНЕНИЯ, ВНЕСЕННЫЕ В КАМЧАТСКИЙ КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Предыдущее обсуждение демонстрирует, что появление в Камчатском каталоге аномальной группы глубоких землетрясений является артефактом. Для каждого из землетрясений группы существуют альтернативные решения гипоцентров, практически не уступающие исходным по качеству (величине невязок), но располагающиеся в пределах основной Камчатской сейсмофокальной зоны.

Поэтому для ряда землетрясений, входящих в Камчатский каталог, было проведено переопределение гипоцентров согласно стандартной методике (Гусев, 1979), использованной для всех событий, произошедших до 2009 г. включительно (с целью сохранить однородность каталога). При этом мы не ограничились исходной аномальной группой, и включили в пересматриваемую выборку также землетрясения из прилегающих районов. Следуя сделанным выше выводам, при переопределении гипоцентров основное внимание уделялось устранению ненадежных вступлений, которое в данном случае проводилось вручную согласно решению аналитика. Кроме того, учитывая, что большинство переопределяемых землетрясений являются глубокими, в ряде случаев допускалось использование скорректированного для таких событий регионального годографа. Результаты новых расчетов и их сравнение со старыми приведены на (рис. 4).

Всего было повторно обработано 115 землетрясений, произошедших за период 1962–2009 гг. Из них для 102 событий получены решения, не уступающие по качеству исходным, но расположенные вблизи основной сейсмофокальной зоны. Для 13 событий не удалось найти удовлетворительное альтернативное решение. Для этих землетрясений в каталоге сохранены старые параметры гипоцентров. Но такие события не составляют компактную пространственную группу и отнесены к неизбежным редким грубым ошибкам. Все описанные изменения внесены в Камчатский каталог.



**Рис. 4.** Результаты переопределения гипоцентров 115 землетрясений, показанные на карте (а) и вертикальном разрезе (б). Соответствующие исходные и исправленные оценки соединены линиями. Фоном (зелеными кружками) показаны землетрясения сейсмофокальной зоны согласно Камчатскому каталогу.

**Fig. 4.** Results of redefinition of hypocenters of 115 earthquakes, shown on the map (a) and vertical section (b). The corresponding initial and revised estimates are connected with lines. The background (green circles) shows earthquakes of the seismic focal zone according to the Kamchatka catalog.

## ВЫВОДЫ

Присутствовавшая до недавнего времени в Камчатском каталоге группа глубоких землетрясений, расположенных под Охотским морем в стороне от основной сейсмофокальной зоны, являлась артефактом. Проведенный анализ и повторный расчет гипоцентров позволили уточнить положение этих событий. В настоящее время в Камчатском каталоге подобная группа землетрясений отсутствует.

Мы благодарны рецензентам статьи за сделанные полезные замечания, позволившие улучшить изложение ее содержания. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-05-00407.

## Список литературы

- Гусев А.А. Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 74–81 [Gusev A.A. Determination of hypocenters of nearby earthquakes of Kamchatka on a computer // Journal of Volcanology and Seismology. 1979. № 1. P. 74–81 (in Russian)].
- Ландер А.В., Левина В.И. Систематические ошибки определения гипоцентров камчатских землетрясений — результат преломления волн на границах погружающейся плиты // Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы.

Т. 1: Сейсмические процессы и катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 117–126 [Lander A.V., Levina V.I. Systematic errors in determining the hypocenters of Kamchatka earthquakes — the result of wave refraction at the boundaries of the sinking plate // *Izmenenie okruzhayushchej sredy i klimata, prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy. Sejsmicheskie processy i katastrofy*. 2008. V. 1. P. 117–126 (in Russian)].

Чебров В.Н., Левина В.И., Ландер А.В. и др. Региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов 1962–2010 гг.: технология и методика создания // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. Обнинск: ГС РАН, 2016. С. 396–406 [Chebrov V.N., Levina V.I., Lander A.V. et al. Regional catalog of earthquakes of Kamchatka and the Commander Islands 1962–2010 // *Earthquakes of the Northern Eurasia*, 2010. Obninsk: GS RAN. 2016. P. 396–406 (in Russian)].

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660921 «Программа определения координат гипоцентра землетрясения и его магнитуды по временам вступления и амплитудам сейсмических волн на основе минимаксного критерия (НММ)». Автор: Ландер А.В. (RU). 29 августа 2018 г. [Certificate of state registration of computer program № 2018660921 «Program for determining the coordinates of an earthquake hypocenter and its magnitude by the times of entry and amplitudes of seismic waves based on the minimax criterion (НММ)». Lander A.V. (RU). 2018 (in Russian)].

AN ARTIFACT IN THE KAMCHATKA EARTHQUAKE CATALOG:  
STUDY AND ELIMINATION

A.V. Lander<sup>1</sup>, N.A. Shevchenko<sup>2</sup>, E.A. Matveyenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS, Russia*

<sup>2</sup>*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Russia*

According to the available data from the Kamchatka Regional Catalog, in the southwestern part of the Kamchatka region, deep earthquakes systematically occurred away from the main seismic focal zone. The paper shows that these anomalous events in the catalog are an artifact caused by the ambiguity of solutions for the hypocenters of earthquakes, which occur in the region located away from the seismic network. The results can be improved by eliminating the station data with the maximum residuals of the arrival times of the waves. Hypocenters were relocated for 102 deep earthquakes from an extended area covering anomalous events. Most of the new solutions lie within the Kamchatka seismic focal zone. The corresponding changes have been added to the Kamchatka regional catalog.

**Keywords:** Kamchatka earthquake catalog, seismic focal zone, hypocenter, artifact.