

УДК 550.348.436

## **ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНАМ**

**<sup>1</sup>Середкина А.И., <sup>2</sup>Козьмин Б.М.**

*<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: ale@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов, Якутск, пр. Ленина, 39, e-mail: b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

**В работе приведены результаты определений тензора сейсмического момента (ТСМ) землетрясений Южной Якутии по амплитудным спектрам поверхностных волн. Всего ТСМ рассчитан для четырех сейсмических событий с  $M_w=4.1-5.4$ , произошедших на территории региона с 2008 по 2014 г. Был выполнен сеймотектонический анализ полученной информации.**

Ключевые слова: тензор сейсмического момента землетрясения, поверхностные волны, Южная Якутия, Олёкмо-Становая зона, фокальный механизм, активный разлом, кинематика разлома

## **DETERMINATION OF THE EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS IN SOUTH YAKUTIA FROM SURFACE WAVE DATA**

**<sup>1</sup>Seredkina A.I., <sup>2</sup>Kozmin B.M.**

*<sup>1</sup>Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Lermontova st., 128, e-mail: ale@crust.irk.ru*

*<sup>2</sup>Diamond and precious metal geology institute SB RAS, Yakutsk, Lenina ave., 39, e-mail: b.m.kozmin@diamond.ysn.ru*

**We described seismic moment tensor (SMT) determinations of the earthquakes in South Yakutia from the data on surface wave amplitude spectra. In total the SMT has been calculated for four seismic events with  $M_w=4.1-5.4$ ,**

**occurred in 2008–2014. Seismotectonic analysis of observed information was made.**

Key words: seismic moment tensor, earthquake, surface waves, South Yakutia, Olekma-Stanovoy zone, focal mechanism, active fault, kinematics of fault

### **Введение**

Тензор сейсмического момента (ТСМ), как известно, содержит достаточно полную информацию об очаге (его энергии и механизме), которую можно извлечь из наблюдений сейсмических сигналов с длинами волн намного превышающими размеры источника. Для землетрясений с  $M \geq 5.0$  оперативные данные о ТСМ предоставляет ряд сейсмологических агентств (GCMT, NEIC, USGS). Как правило, в различных регионах на долю таких событий приходится не более 1%. Не составляет исключения и Южная Якутия, где для основной массы землетрясений рутинная обработка ограничивается оценкой их фокальных механизмов по знакам первых вступлений продольных сейсмических волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой, а специальным исследованиям ТСМ посвящено не так много публикаций [Emmerson et al., 2006; Sloan et al., 2011].

В данной работе для землетрясений Южной Якутии средних магнитуд рассчитан ТСМ по амплитудным спектрам поверхностных волн, проведено сопоставление полученных результатов с литературными данными, а также кратко рассмотрена сеймотектоническая позиция очагов исследуемых сейсмических событий.

### **Материалы и методы исследования**

Для решения поставленных задач использовались сведения о 4 землетрясениях с  $m_b=4.1-5.4$ , произошедших на территории Южной Якутии за период с 2008 по 2014 г. (табл. 1).

Таблица 1

Параметры исходных данных

| № | Дата,<br>г м ч | t <sub>0</sub> ,<br>ч мин с | Эпицентр |        | mb  | Δ <sub>min</sub> ,<br>км | Δ <sub>max</sub> ,<br>км | ΔT, с | N  | Модель<br>коры |
|---|----------------|-----------------------------|----------|--------|-----|--------------------------|--------------------------|-------|----|----------------|
|   |                |                             | φ°, E    | λ°, N  |     |                          |                          |       |    |                |
| 1 | 2              | 3                           | 4        | 5      | 6   | 7                        | 8                        | 9     | 10 | 11             |
| 1 | 2008.11.08     | 08:45:55.8                  | 56.83    | 123.20 | 5.0 | 2171                     | 8921                     | 30-55 | 8  | 2              |
| 2 | 2008.12.01     | 16:24:10.0                  | 57.32    | 120.53 | 4.1 | 2445                     | 4491                     | 30-50 | 9  | 1              |
| 3 | 2009.01.26     | 18:51:59.1                  | 57.40    | 120.78 | 5.2 | 2428                     | 7003                     | 30-90 | 15 | 1              |
| 4 | 2014.01.04     | 19:34:25.6                  | 56.80    | 129.50 | 5.4 | 3243                     | 5627                     | 40-90 | 11 | 2              |

Примечание. Столбцы: 2 – дата (год, месяц, число); 3 – время в очаге по Гринвичу (час, минута, секунда); 4, 5 – координаты эпицентра; 6 – магнитуда по объемным волнам (по ISC); 7, 8 – минимальное и максимальное эпицентральные расстояния соответственно; 9 – диапазон периодов; 10 – число используемых станций; 11 – модель коры в окрестности очага землетрясения: 1 – 3SMAC, 2 – CRUST 2.0 (см. текст).

Материалом исследования служили записи выбранных землетрясений на широкополосных каналах цифровых сейсмических станций сетей IRIS. Положение станций выбиралось таким образом, чтобы они находились в разных азимутах от эпицентра рассматриваемого события (Рис. 1, А). Минимальное используемое эпицентральное расстояние составило около 2000 км, а максимальное – около 9000 км (табл. 1).

Спектры основной моды волн Рэлея и Лява были получены для каждой трассы «эпицентр-станция» с помощью метода спектрально-временного анализа [Левшин и др., 1986] в диапазоне периодов колебаний от 30 до 90 с (табл. 1). Анализу подвергались только сейсмограммы с высоким соотношением сигнал/шум и нормальной поляризацией.

TSM (в приближении двойной пары сил – double-couple) и глубина гипоцентра рассчитывались по полученным амплитудным спектрам поверхностных волн с привлечением дополнительной информации о знаках первых вступлений объемных волн на региональных станциях [Букчин, 1989, Lasserre et al., 2001]. Корректность применения данного метода к региональным сейсмическим событиям средних магнитуд рассмотрена в работе [Середкина, Мельникова, 2014].

Строение земной коры под сейсмическими станциями задавалось моделью 3SMAC [Nataf, Ricard, 1996] в окрестности очага землетрясения – моделями CRUST 2.0 [Bassin et al., 2000] или 3SMAC, в зависимости от того, какая из них обеспечит меньшее значение функции нормированной невязки. Для описания верхней мантии и расчета затухания поверхностных волн использовалась сферически симметричная модель PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]. Оценка качества полученного решения производилась с помощью функции нормированной невязки ( $\epsilon$ ) [Lasserre et al., 2001].

### Результаты исследования

Результаты расчетов ТСМ рассматриваемых землетрясений приведены на рисунке 1 (Б, В) и в таблице 2.

Таблица 2

Очаговые параметры исследуемых землетрясений

| № | Дата,<br>г м ч | $M_0 \cdot 10^{17}$ ,<br>Н·м | $M_w$ | Ось Т<br>(растяжения) |     | Ось Р<br>(сжатия) |     | Ось В<br>(промежуточная) |     | $\epsilon$ |
|---|----------------|------------------------------|-------|-----------------------|-----|-------------------|-----|--------------------------|-----|------------|
|   |                |                              |       | AZM°                  | PL° | AZM°              | PL° | AZM°                     | PL° |            |
| 1 | 2              | 3                            | 4     | 5                     | 6   | 7                 | 8   | 9                        | 10  | 11         |
| 1 | 2008.11.08     | 0.160                        | 4.8   | 125                   | 37  | 33                | 3   | 299                      | 53  | 0.297      |
| 2 | 2008.12.01     | 0.044                        | 4.4   | 172                   | 52  | 318               | 33  | 59                       | 17  | 0.271      |
| 3 | 2009.01.26     | 2.300                        | 5.5   | 168                   | 31  | 337               | 59  | 75                       | 5   | 0.313      |
| 4 | 2014.01.04     | 1.500                        | 5.4   | 138                   | 27  | 256               | 42  | 26                       | 36  | 0.322      |

Примечание. Столбцы: 2 – дата (год, месяц, число); 3 – скалярный сейсмический момент; 4 – моментная магнитуда; 5–10: параметры осей растяжения (Т), сжатия (Р) и промежуточной оси (В): AZM – азимут оси, PL – угол погружения; 11 – значение функции нормированной невязки.

Необходимо отметить, что для землетрясений 26 января 2009 г. и 4 января 2014 г. имеется информация о ТСМ в GCMТ-каталоге. При этом решения фокальных механизмов, оценки скалярного сейсмического момента и моментной магнитуды достаточно хорошо согласуются между собой. Для первого сейсмического события значение глубины гипоцентра, рассчитанное в данной работе, также не противоречит данным GCMТ-каталога (12 км) и результатам [Sloan et al., 2011] (8 км). Для второго землетрясения разброс в

значениях глубины очага составляет около 13 км (GСMT-каталог:  $h=20.9$  км). Похожие закономерности при определении глубин гипоцентров различными методами были отмечены ранее для землетрясений Прибайкалья [Середкина, Мельникова, 2014].

### **Сеймотектонический анализ**

С целью выявления взаимосвязей сейсмологических данных с геолого-геофизическими сведениями параметры фокальных механизмов землетрясений Южной Якутии, построенные по амплитудным спектрам поверхностных волн, сопоставлялись с данными обработки макросейсмических проявлений этих событий, пространственным расположением их афтершоковых последовательностей и морфо-кинематической характеристикой активных разломов, к которым были приурочены эпицентры отмеченных подземных толчков. Все очаги рассмотренных землетрясений произошли в пределах Олёкмо-Становой сеймотектонической зоны (ОСЗ) в Южной Якутии, протягивающейся от р. Олёкмы к Охотскому морю, где господствует сеть разрывных нарушений субширотного регионального Станового структурного шва архейского возраста [Горнштейн и др., 1976].

Именно в центральной части ОСЗ в зоне влияния Станового шва произошло Алданское землетрясение 2008 г. (№ 1, табл.1). По геологическим данным для этого разлома характерны сдвиговые и взбросо-надвиговые движения [Имаев и др., 2000]. Сравнение решения фокального механизма события 2008 г. со структурными элементами Станового разлома указывает, что плоскость разрыва последнего ассоциируется с нодальной плоскостью NP1 в очаге землетрясения, ориентированной также субширотно, по которой отмечены левобокковые подвижки (Рис. 1, Б).

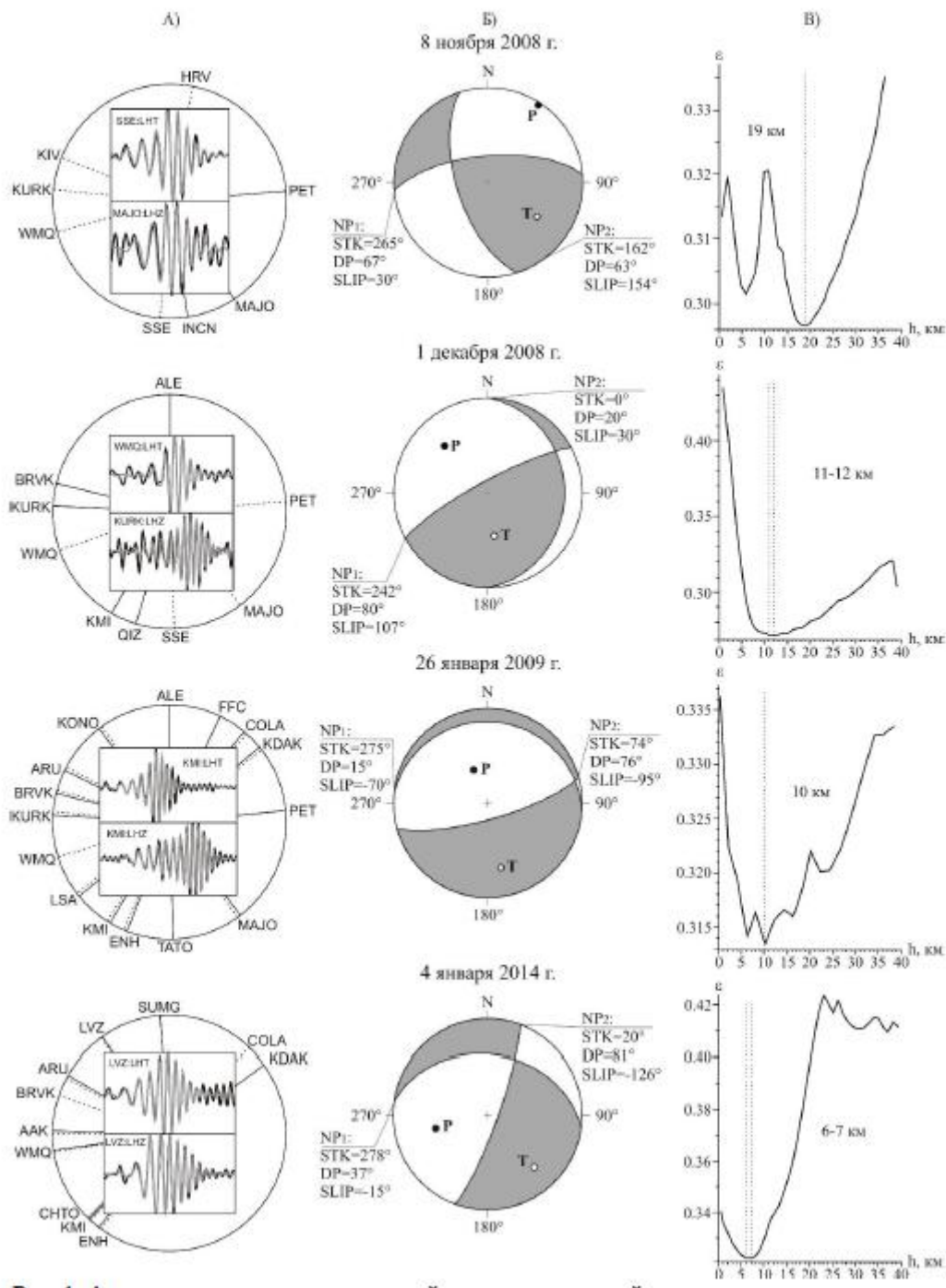


Рис. 1. Азимутальное распределение сейсмических станций, используемых для анализа очаговых параметров (А), механизм очага (в проекции нижней полусферы) (Б) и зависимость функции нормированной невязки от глубины очага (В) для исследуемых землетрясений Южной Якутии

В широтном направлении, как и плоскость NP1, расположились изосейсты Алданского землетрясения, вытянутые по простиранию Станового шва (Рис. 2,

Б). Однако серия афтершоков этого толчка была ориентирована субдолготно (Рис. 2, А) в соответствии с положением нодальной плоскости NP2, которая совпадает по простиранию с новейшим локальным разломом, пересекающим с юга на север древний Становой шов вдоль р. Алдан. Таким образом, каждая из выявленных в очаге плоскостей разрыва была по-своему «рабочей».

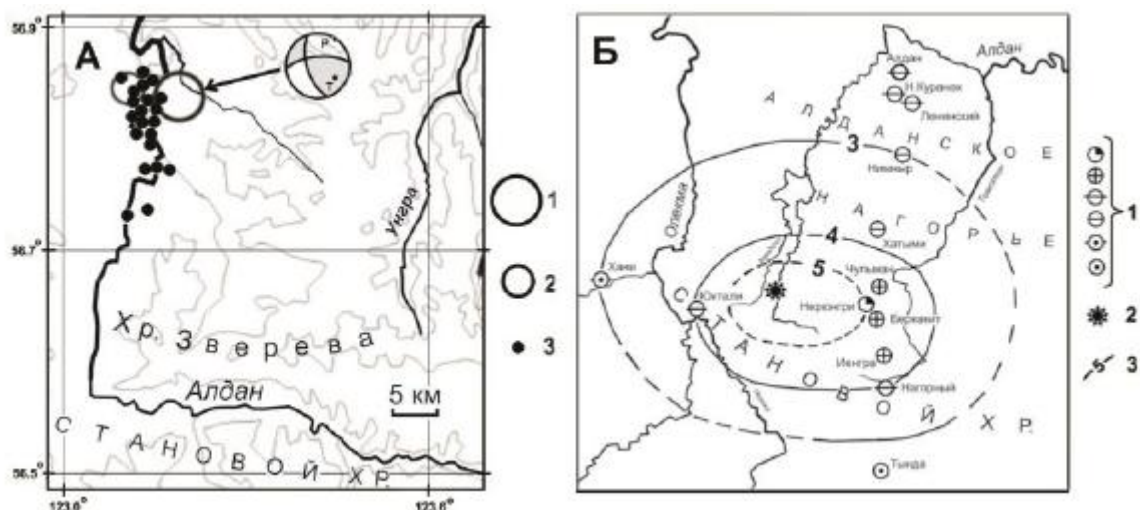


Рис. 2. Особенности проявлений Алданского землетрясения 8 ноября 2008 г. в Южной Якутии

А – пространственное распределение эпицентров: 1– главное событие ( $M_w=4.8$ ,  $K_p=13.5$ ); 2-3 – афтершоки: 2 –  $K_p=9-10$ , 3 –  $K_p \leq 8$ . Отдельно показана стереограмма главного толчка (по данным Рис. 1). Б – карта изосейст. 1 – интенсивность сотрясений в баллах шкалы MSK-64, 2 – инструментальный эпицентр, 3 – изолинии балльности.

Два последующих решения очаговых параметров принадлежат сотрясениям, произошедшим в 2008-2009 гг. на территории Олёкмо-Чарского нагорья в зоне перехода от северо-восточного окончания Байкальского рифта к западному флангу ОСЗ (табл. 1 и 2). Исследуемые подземные толчки относятся к роевым, составляющим Чароудинский рой землетрясений, возникший в 2005 г., но действующий до сих пор. За прошедшие 10 лет здесь зарегистрировано около 5 тыс. роевых событий [Шибаяев и др., 2011]. В пределах данного роя известны три сильных ощутимых землетрясения (два в 2005 г. и одно в 2009 г.) с

$M_w=5.4-5.8$ . Для всех них подвижки в очаге согласно каталога GCMТ и нашего решения 2009 г. соответствовали сбросам. По этим данным можно утверждать, что здесь господствует стабильный рифтовый режим. Однако параметры механизма очага события 2001 г. (табл. 2, №2 и Рис.1) показывают, что режим растяжения может в отдельных случаях сменяться режимом сжатия (взбросо-надвиговые смещения в очаге).

Последнее землетрясение (табл. 1 и 2, №4) произошло на восточном краю ОСЗ примерно в 100 км к северу от зоны Станового разлома на территории Алданского нагорья. Его эпицентр приурочен к разломному узлу, образованному Тыркандинским региональным дизъюнктивом северо-западного простирания и субширотным Гонамским локальным нарушением (Рис. 3).

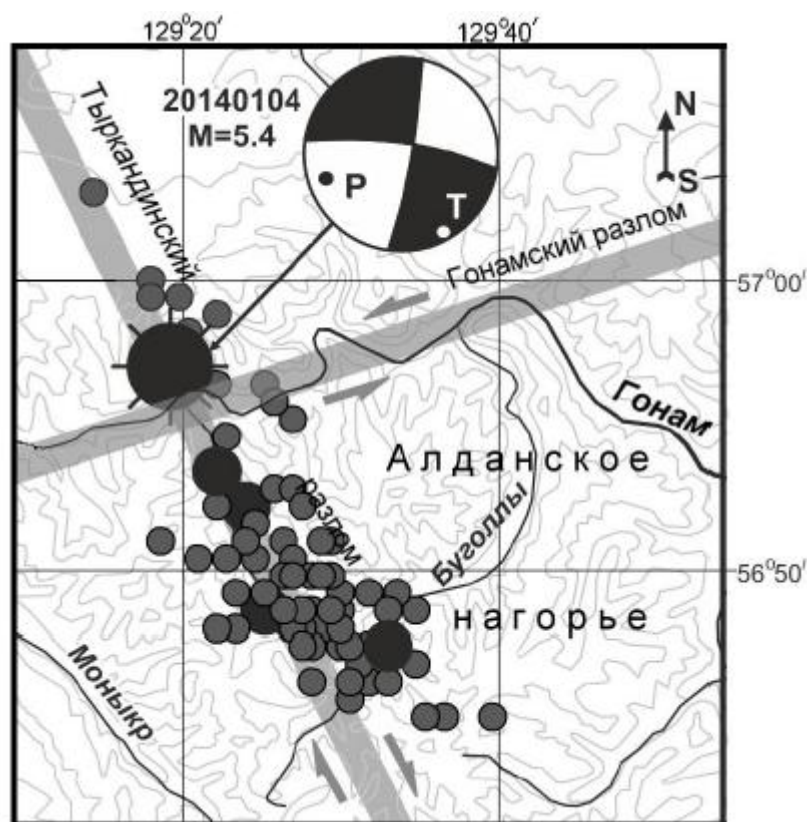


Рис. 3. Проявления Гонамского землетрясения 2014 г. на Алданском нагорье (Южная Якутия)

Местоположение основного события (большой круг), остальные – афтершоки. В стереограмме – решение фокального механизма из каталога GCMТ (<http://www.globalcmt...>).



Кинематика первого из них, по геолого-геофизическим сведениям, представляет комбинацию сдвиговых и сбросовых перемещений, а второго – соответствует сдвигу [Парфенов и др., 1985]. Скорее всего разрыв в очаге произошёл здесь по плоскости NP2, ориентированной близдолготно. Об этом свидетельствует вытянутость афтершоковой области Гонамского землетрясения 2014 г. в северо-западном направлении, близком к простиранию Тыркандинского разлома. Сравнивая параметры механизма очага из каталога GCMT с нашим решением для этого события, обнаруживается совпадение в ориентации поверхности разрыва NP2 и различие в положении нодальной плоскости NP1, которая оказалась более пологой (Рис. 1 и 3). Это позволяет предположить, что Гонамский сдвиг, составляющий тектонический узел с Тыркандинским разломом, может представлять собой пологий надвиг с наклоном на север под углом в  $37^\circ$ .

### **Выводы**

Использование для землетрясений Южной Якутии методики расчета ТСМ по амплитудным спектрам поверхностных волн показало, что результаты вычислений хорошо согласуются с данными мировых сейсмологических агентств. Следовательно, с ее помощью можно улучшить качество оценок фокальных механизмов в тех случаях, когда их решения другими способами имеют неоднозначность, и значительно расширить информационную базу об очаговых параметрах региональных землетрясений средних магнитуд.

В заключение можно отметить, что полученные результаты в дальнейшем могут способствовать повышению надежности детальных исследований напряженно-деформированного состояния земной коры, выявлению особенностей сеймотектонических процессов, детализации морфо-кинематических характеристик активных разломов и построению более реалистичных геодинамических моделей для территории Южной Якутии.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-05-31173).*

## Список литературы

1. Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1989. – № 9. – С. 34–41.
2. Горнштейн Д. К., Мокшанцев К. Б., Петров А. Ф. Разломы восточной части Сибирской платформы // Разломная тектоника Якутской АССР. – Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР. – 1976. – С. 10–63.
3. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии – М.: ГЕОС, 2000. – 227 с.
4. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г. и др. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. – М.: Наука, 1986. – 278 с.
5. Парфенов Л.М., Козьмин Б.М., Имаев В.С. и др. Геодинамика Олекмо-Становой сейсмической зоны. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. – 136 с.
6. Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента землетрясений Прибайкалья по амплитудным спектрам поверхностных волн // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 103–114. Doi: 10.7868/S0002333714030090
7. Шибяев С.В., Петров А.Ф., Козьмин Б.М. и др. Чаруодинский рой землетрясений 2005 г. и его ощутимые землетрясения; Чаруодинское-I 10 ноября в 19h29m с  $K_p=15.7$ ,  $M_w=5.8$ ,  $I_0=8$  и Чаруодинское-II 11 декабря в 15h 54m с  $K_p=14.8$ ,  $M_w=5.7$ ,  $I_0=7$  (Южная Якутия) // Землетрясения Северной Евразии. 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 404 – 418.
8. Bassin, C., Laske, G., Masters, G. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // EOS Trans AGU. – 2000. – V. 81. – F897.
9. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary Reference Earth Model // Phys. Earth Planet. Inter. – 1981. – 25. – P. 297–356.
10. Emmerson B., Jackson J., McKenzie D., Priestley K. Seismicity, structure and rheology of the lithosphere in the Lake Baikal region // Geophys. J. Int. – 2006. – 167. – P. 1233–1272.
11. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
12. Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R. Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ( $M_w=5.2$ ) and 1995 July 21 Yongen ( $M_w=5.6$ ) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // Geophys. J. Int. – 2001. – 144 (1). – P. 206–220.
13. Nataf H.-C., Ricard Y. 3SMAC: on a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // Phys. Earth Planet. Inter. – 1996. – 95. – P. 101–122.
14. Sloan R.A., Jackson J.A., McKenzie D., Priestley K. Earthquake depth distributions in Central Asia, and their relations with lithosphere thickness, shortening and extension // Geophys. J. Int. – 2011. – 185. – P. 1–29. Doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04882.x