

УДК 550.34:517

© М.А. Хритова, Н.А. Гилева

М.А. Хритова, Н.А. Гилева

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КАК СРЕДСТВО ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИБАЙКАЛЬЯ

Введение

Прибайкалье относится к высокосейсмичным регионам России [1], входит в единый Центрально-Азиатский сейсмический пояс. Сильнейшие землетрясения неоднократно происходили в Байкальском регионе в прошлом: одно из первых известных землетрясений – «Великое трясение» 01.02.1725 г. (ориентировочно $M = 8.2$) [2]. За последние 20 лет в Прибайкалье произошли три сильных землетрясения (7-8 баллов): Южно-Байкальское землетрясение 25.02.1999 г. ($M_w = 6.0$) [3]; Кичерское 21.03.1999 г. ($M_w = 6.0$) [4] и Култукское 27.08.2008 г. ($M_w = 6.3$) [5]. Сильным событиям может предшествовать форшоковая активность (Кичерское, Южно-Байкальское землетрясения), и сильные землетрясения могут сопровождаться многочисленными афтершоками (Кичерское, Култукское землетрясения). С переходом сейсмологической сети Байкальского региона на цифровую регистрацию увеличилось число регистрируемых землетрясений до 8-9 тысяч слабых и сильных событий в год. Таким образом, изучение сейсмического режима Байкальского региона является актуальной задачей.

Одним из распространенных математических методов обработки данных является кластерный анализ – задача разбиения определенного множества объектов на группы, называемые кластерами, так, чтобы каждый кластер состоял из схожих объектов, а объекты разных кластеров существенно отличались [6, 7]. Этот вид анализа предполагает такие цели, как понимание данных путем выявления кластерной структуры и обнаружение новизны, т. е. выделение нетипичных объектов, которые не удается присоединить ни к одному из кластеров.

Имеется большое разнообразие задач в сейсмологии, которые решаются методами кластерного анализа. Одной из таких задач является исследование структуры сейсмичности. А именно, применение индекса Моришиты при анализе пространственного распределения толчков до и после сильных землетрясений [8]. По графику индекса Моришиты можно определить характер пространственного распределения эпицентров землетрясений выбранного каталога: случайный, равномерный, кластеризованный [9].

Задача идентификации сейсмических событий по природе источника (тектонические землетрясения, промышленные взрывы, шумы и т.д.) также может быть решена средствами кластерного анализа. Так, например, для классификации локальных сейсмических событий, наблюдаемых на записях станций Архангельской сейсмической сети, использовались иерархический и метод k -средних [10].

Немаловажным направлением в сейсмологии, где применяется кластерный анализ, является разработка алгоритмов прогнозирования сейсмической активности. В частности, алгоритмическая система FCAZ (Fuzzy Clustering and Zoning) для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [11].

В данной работе описано решение задачи анализа сейсмического процесса в пространстве и во времени с помощью разработанной программы кластеризации каталога землетрясений.

Методика

Ниже рассматривается метод кластерного анализа, разработанный для выделения кластеров в поле эпицентров землетрясений. Входными данными для изучения сейсмического режима являются параметры: время возникновения, географические координаты, глубина, энергетический класс.

В основе программы реализован алгоритм кластеризации методом ближайшего соседа [7]. Каталог представляется совокупностью n событий e_i :

$$e_i = \{x_p, y_p, z_p, t_p, K_i\}, i \in [1, n], \quad (1)$$

где x_p, y_p – координаты эпицентра события; z_p – глубина землетрясения; t_p – его время; K_i – энергетический класс. Для каждого события e_i определяется его ближайший сосед $N(e_i)$:

$$e_j = N(e_i), \text{ если } S(i, j) = \inf \{S(1, j), S(2, j), \dots, S(n, j)\}, \quad (2)$$

где $S(i, j)$ – расстояние между событиями e_i и e_j . В качестве степени близости двух сейсмических событий, меры расстояний между событиями, рассматривается обычное расстояние в пространстве между землетрясениями:

$$S(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (3)$$

В программе реализована возможность выбора меры степени близости двух сейсмических событий: расстояние между эпицентрами, расстояние в пространстве между землетрясениями с учетом их глубины (формула 3), мера расстояния в пространстве с учетом энергетических характеристик событий. Очевидно, что обычное расстояние не является показательным для сравнения событий, имеющих различный энергетический класс. Поэтому вводится дополнительная мера расстояний в радиусах сейсмического очага [9].

Далее все события объединяются в кластеры Cl_k , $k \in [1, m]$ по следующим правилам:

- если $e_i \in Cl_k$ и $e_j = N(e_i)$, тогда $e_j \in Cl_k$;
- если $e_i \in Cl_k$ и $S(i, j) \leq S_{\min}$, тогда $e_j \in Cl_k$;
- если для любого $j \in [1, n]$ $S(i, j) > S_{\max}$, тогда $e_j \cap Cl_k = \emptyset$, $k \in [1, m]$.

S_{\min} , S_{\max} – параметры алгоритма, выставляются в настройках программы, их значения зависят от скученности эпицентров выбранного каталога. В программе выводится гистограмма распределения количества землетрясений по расстоянию между событиями. По данной гистограмме можно определить оптимальные значения параметров S_{\min} и S_{\max} .

Таким образом, из множества событий каталога выделяются кластеры, содержащие схожие объекты по пространственному и энергетическому признакам.

Следующим этапом для учета интервала времени между событиями отдельно анализируется каждый выделенный кластер. События в кластере сортируются относительно времени в очаге, далее сравнивается время каждого события со временем предшествующего элемента кластера, если разность времен меньше заданного параметра, то данные элементы образуют подкластер внутри выделенного кластера. В итоге каждый кластер в свою очередь разбивается на подкластеры по временному признаку.

Последним этапом удаляются из каталога некластеризованные элементы и кластеры, имеющие малое количество элементов. Соответствующий порог также выставляется в настройках программы.

Программа кластеризации каталога землетрясений Байкальского региона

Для рассмотрения разработанной программы кластеризации поля землетрясений Прибайкалья выбраны Култукский каталог, район Южного Байкала, и каталог с сейсмическими событиями, произошедшими на территории Среднего Байкала, район сел Максимиха и Турка.

Култукская последовательность

27 августа 2008 года на юге озера Байкал произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_w = 6.3$, которое сопровождалось большим числом повторных толчков [12, 13]. Култукский каталог содержит 1791 событие с энергетическим классом $K_p \geq 4$ за период наблюдения с 27 августа по 28 декабря 2008 года. Эпицентры землетрясений расположены в районе Южного Байкала в пределах географических координат 51.23-52.01° с.ш., 103.01-104.90° в.д.

Помимо основного толчка (27 августа в 01 ч 35 мин, энергетический класс $K_p = 15.9$, географические координаты эпицентра 51.598° с.ш. 104.038° в.д, глубина 14.1 км) были зарегистрированы три сильных афтершока:

- 27 августа в 01 ч 41 мин, $K_p = 13.2$, координаты эпицентра 51.616° с.ш. 104.029° в.д, глубина 7 км;
- 27 августа в 02 ч 07 мин, $K_p = 12.3$, координаты эпицентра 51.631° с.ш. 103.918° в.д, глубина 5.3 км;
- 30 августа в 13 ч 53 мин, $K_p = 12.1$, координаты эпицентра 51.621° с.ш. 104.005° в.д, глубина 11.3 км.

После первого этапа кластеризации методом ближайшего соседа из каталога удалось определить 295 пространственных кластеров. Мерой степени близости было выбрано пространственное расстояние между очагами землетрясений с учетом их глубин.

Для идентификации каждому кластеру присваивается индивидуальный номер, на экранной форме элементы, принадлежащие одной группе, помечаются одинаковым цветом (рис. 1).

В левой части программы приведена таблица с кластеризованным каталогом землетрясений, в первом столбце указан номер кластера; вверху приведена гистограмма распределения количества землетрясений по кластерам, значительное количество событий попадает в кластеры 219, 226 и 236; в нижней правой части показана схема расположения выделенных кластеров, звездочкой показан основной толчок.

Программа позволяет получать трехмерную (3D) модель расположения выделенных кластеров (рис. 2). Имеется возможность вращения построенной 3D-модели, что позволяет рассмотреть расположение выделенных групп землетрясений с разных сторон и под различными углами. Программа позволяет редактировать основные графические настройки: пределы и шаг по осям, размер эпицентров землетрясений, цвет плоскостей и др.

После процедуры выделения подкластеров с учетом временного признака и удаления некластеризованных и слабо кластеризованных элементов

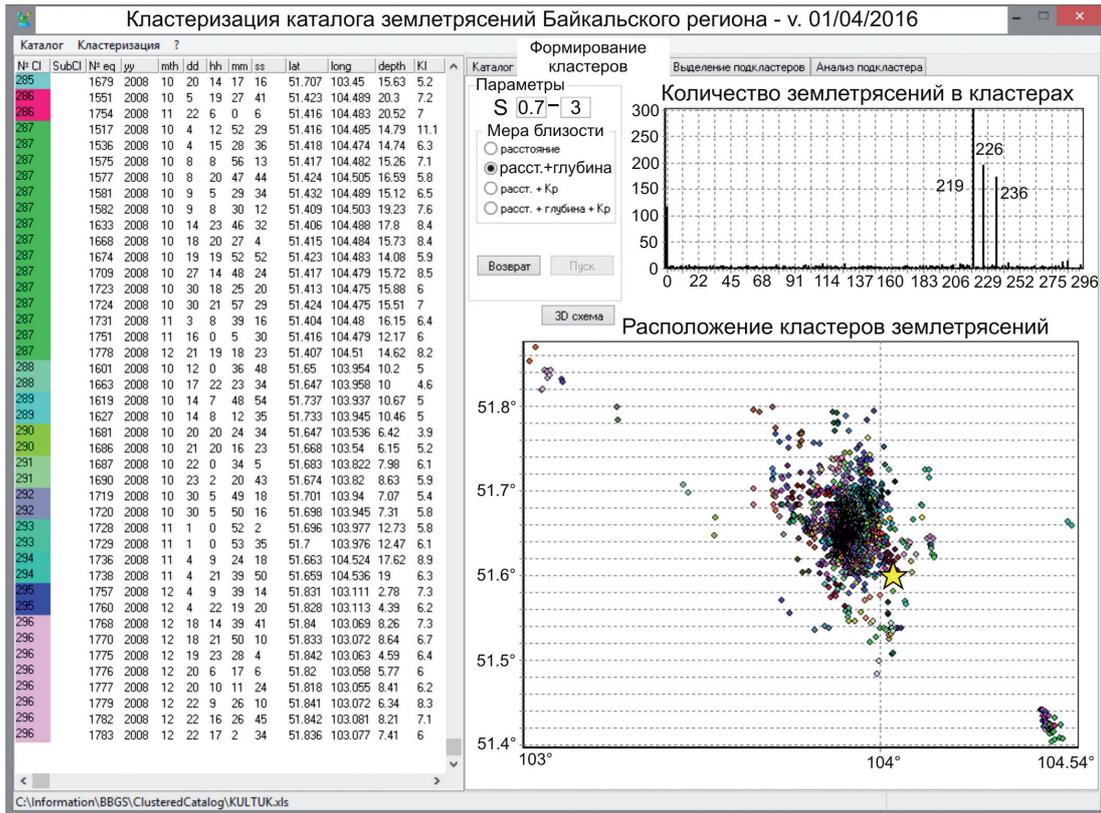


Рис. 1. Экранная форма программы после выделения площадных кластеров для Култукского каталога. Пояснения см. в тексте

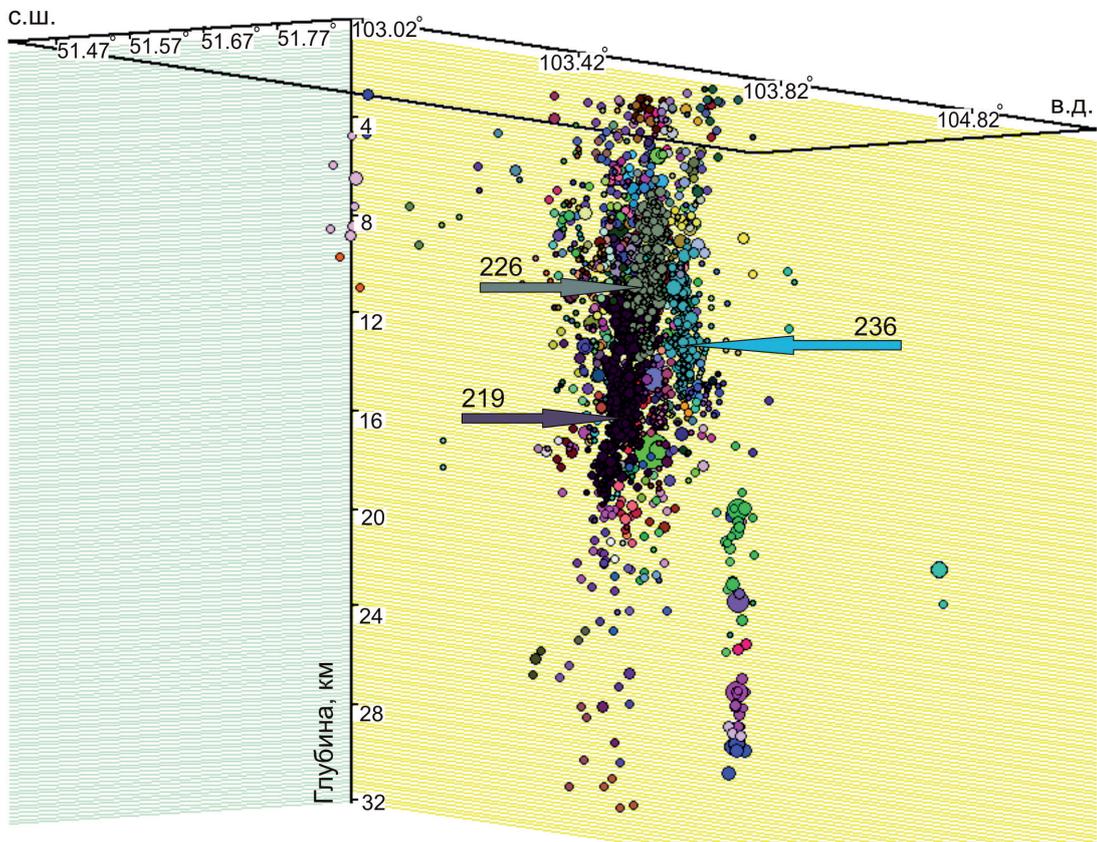


Рис. 2. Трехмерная модель площадных кластеров Култукского каталога. Стрелками показаны самые многочисленные кластеры: 219, 226 и 236

происходит обновление экранной формы программы (рис. 3). В таблице остаются землетрясения, которые вошли в подкластеры, насчитывающие не менее указанного количества элементов. Для выбранного примера: в качестве временного интервала между двумя соседними событиями выбраны одни сутки, количество элементов в оставляемых подкластерах должно быть ≥ 10 . Каждому подкластеру внутри кластера также присваивается индивидуальный номер и цвет. В программе доступны карта размещения выделенных подкластеров и гистограммы распределения количества землетрясений и выделившейся энергии по кластерам.

Таким образом, из Култукского каталога за период с 27 августа по 28 декабря 2008 года всего выделено 13 подкластеров по пространственному и временному признакам (подкластер 0.0 содержит некластеризованные элементы). Наибольшее количество землетрясений сгруппировалось в подкластерах: 219.0 – 227 событий, 226.0 – 101 событие, 236.3 – 76. По выделившейся энергии лидером является подкластер 283.0 (0.398 1012 Дж, 12 землетрясений), отметим, что этот подкластер

пространственно удален от основных групп событий (рис. 3, рис. 4).

Программа также позволяет получать 3D-модель расположения подкластеров поля землетрясений. По трехмерному отображению подкластеров для Култукской последовательности можно увидеть: что событиям кластера 226 соответствуют глубины 3-10 км, землетрясения кластера 219 определены на большой глубине 10-17 км. Кластер 236 расположен немного восточнее от основного поля эпицентров на глубине 6-12 км (рис. 4). Землетрясения 219 группы происходили в сроки с 27 августа по 24 сентября 2008 г.; события кластера 226 начались в это же время, закончились позднее – 18 октября; землетрясения 236 кластера – с 4 сентября по 14 октября; 4-5 октября 2008 года произошли землетрясения подкластера 283.0.

Далее для каждого выделенного подкластера и оставшихся кластеров строятся гистограммы распределения количества событий и суммарной энергии по времени с заданным периодом (рис. 5а, б). По построенным гистограммам можно проследить процесс активизации и затухания землетрясений для выбранного кластера или подкластера.

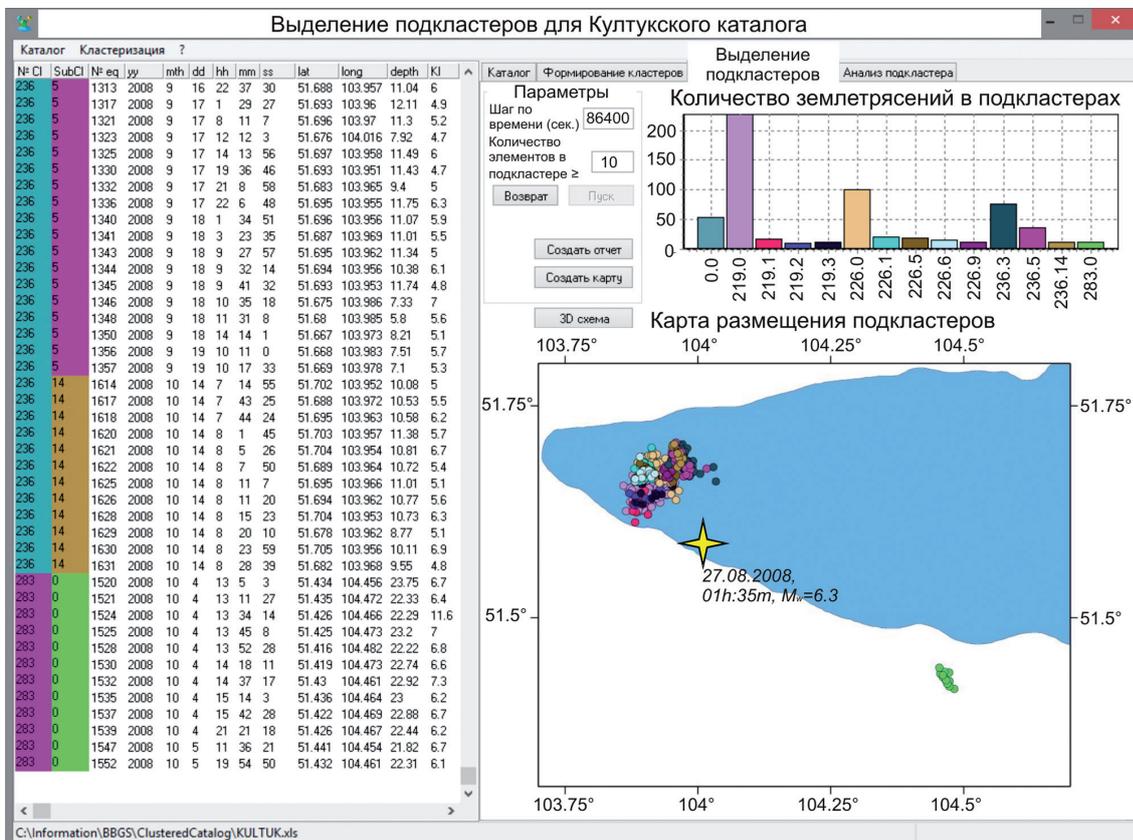


Рис. 3. Экранная форма программы после выделения временных подкластеров Култукского каталога. Пояснения см. в тексте

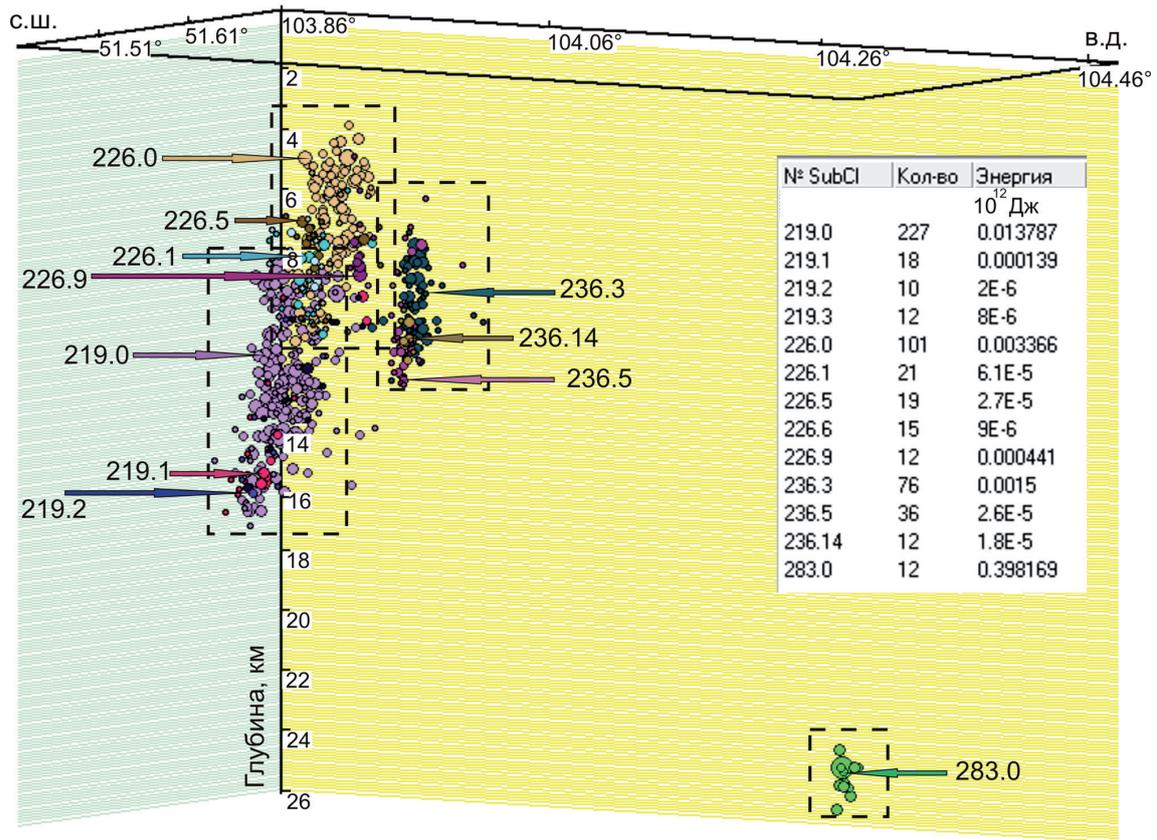


Рис. 4. Трехмерная модель подкластеров Култукского каталога. Стрелками показаны подкластеры, на врезке для каждого подкластера приведено количество элементов и суммарная выделившаяся энергия

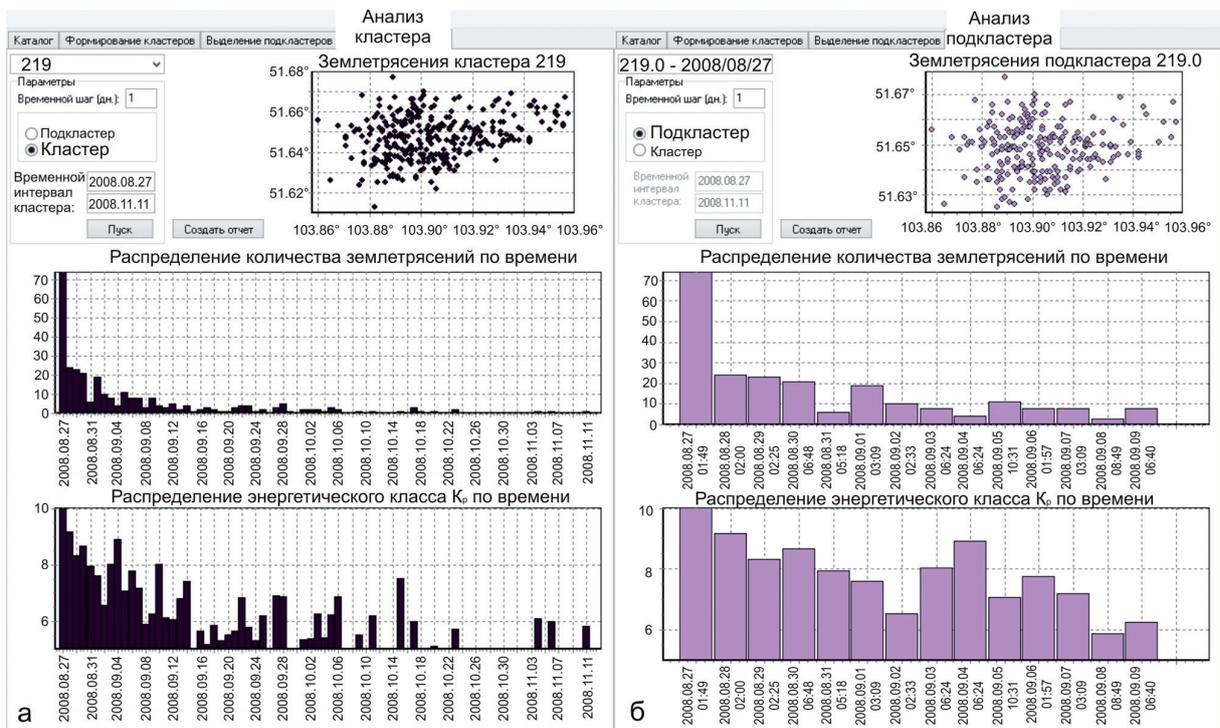


Рис. 5. Экранная форма программы кластеризации: а – образ экрана при анализе кластера 219, б – образ экрана при анализе подкластера 219.0. Пояснения см. в тексте

Землетрясения Среднего Байкала, район с. Максимиха и с. Турка

Следующим для анализа взят каталог землетрясений, произошедших на территории Среднего Байкала.

Эпицентры сейсмических событий лежат в пределах географических координат 52.7-53.7° с.ш., 107.5-109.5° в.д.

Данный район характеризуется постоянной высокой сейсмичностью [14, 15]. За период с 01.01.2008 по 31.12.2014 гг. каталог содержит 6766 землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 5.6$. Также за указанный период произошло 5 сильных событий с $K_p \geq 12$:

- 20 мая 2008 г. в 20 ч 42 мин, $K_p = 14.3$, координаты эпицентра 53.30° с.ш. 108.49° в.д. (Максимихинское землетрясение);
- 21 мая 2010 г. в 22 ч 34 мин, $K_p = 12.1$, координаты 53.30° с.ш. 108.50° в.д.;
- 27 сентября 2010 г. в 13 ч 00 мин, $K_p = 12.6$, координаты 53.32° с.ш. 108.47° в.д.;
- 16 июля 2011 г. в 18 ч 38 мин, $K_p = 14.5$, координаты 52.88° с.ш. 108.49° в.д. (Туркинское землетрясение);
- 22 декабря 2014 г. в 03 ч 05 мин, $K_p = 12.2$, координаты 53.08° с.ш. 108.09° в.д.

На рис. 6 приведен образ экрана программы после первого этапа пространственной кластеризации поля землетрясений района Среднего Байкала.

После первого этапа кластеризации методом ближайшего соседа из каталога удалось определить 905 пространственных кластеров. Значительное количество событий попадает в кластеры 478, 666 и 694. На карте расположения кластеров (рис. 6) подписаны самые многочисленные кластеры, звездочкой отмечены землетрясения с $K_p \geq 12$. В кластер 478 попадает Максимихинское землетрясение 20.05.2008 г., кластер 666 содержит Туркинское событие 16.07.2011 г.

Так как рассматриваемый каталог содержит события за большой временной период в 7 лет, при формировании подкластеров выбраны следующие параметры: в качестве временного интервала между двумя соседними событиями выбрано 20 суток, количество элементов в оставляемых подкластерах должно быть ≥ 10 . Из каталога (52.7-53.7° с.ш., 107.5-109.5° в.д.) за период с 01.01.2008 по 31.12.2014 гг. всего выделено 11 подкластеров по пространственному и временному признакам. На рис. 7 видно, что Максимихинская группа землетрясений (478 кластер) разделилась на 3 подкластера: 478.0, 478.1, 478.2, Туркинская группа событий

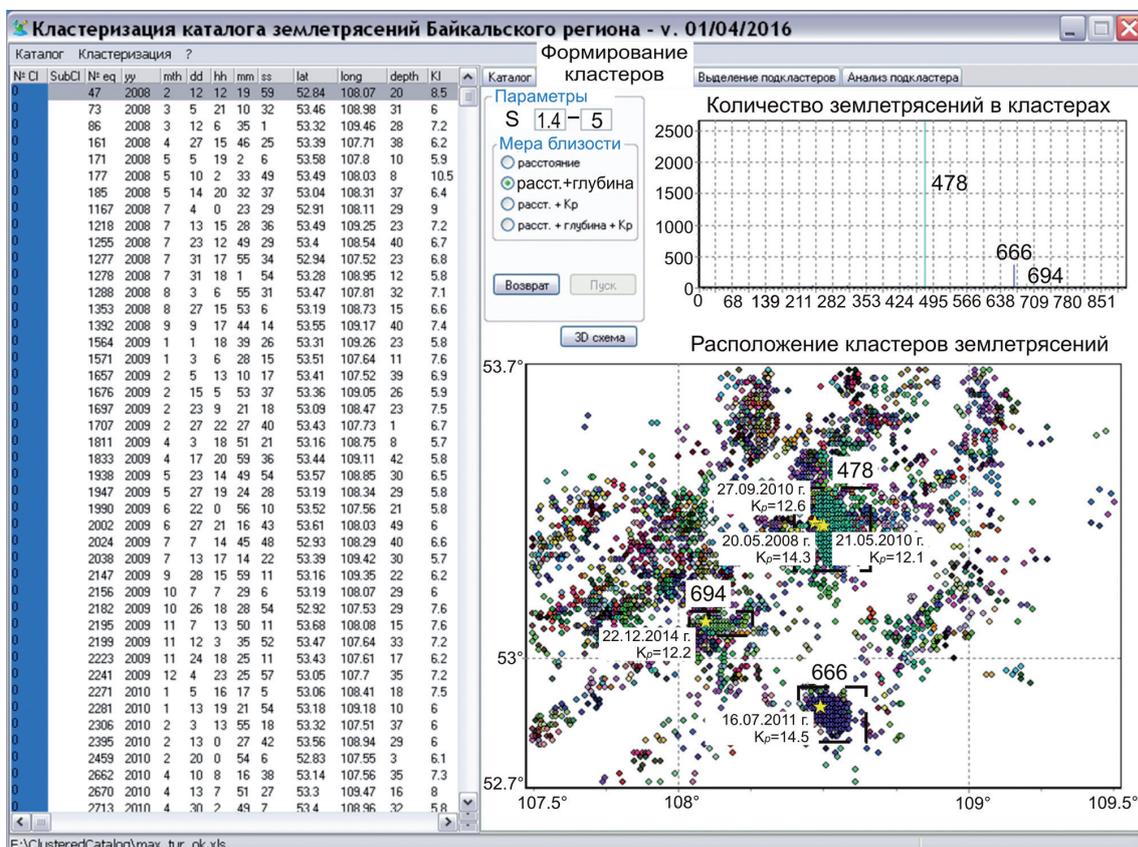


Рис. 6. Экранная форма программы после выделения площадных кластеров для каталога землетрясений района Среднего Байкала. Пояснения см. в тексте

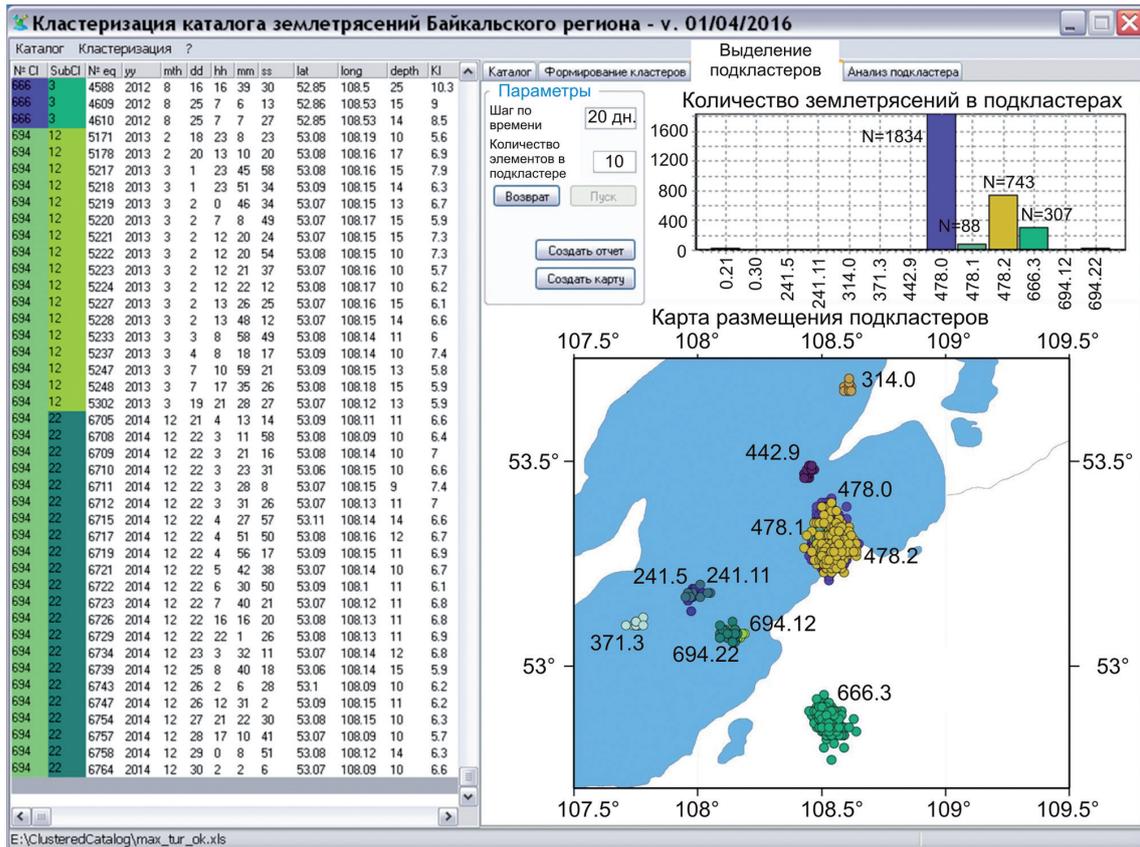


Рис. 7. Экранная форма программы после выделения временных подкластеров каталога землетрясений Среднего Байкала. Пояснения см. в тексте

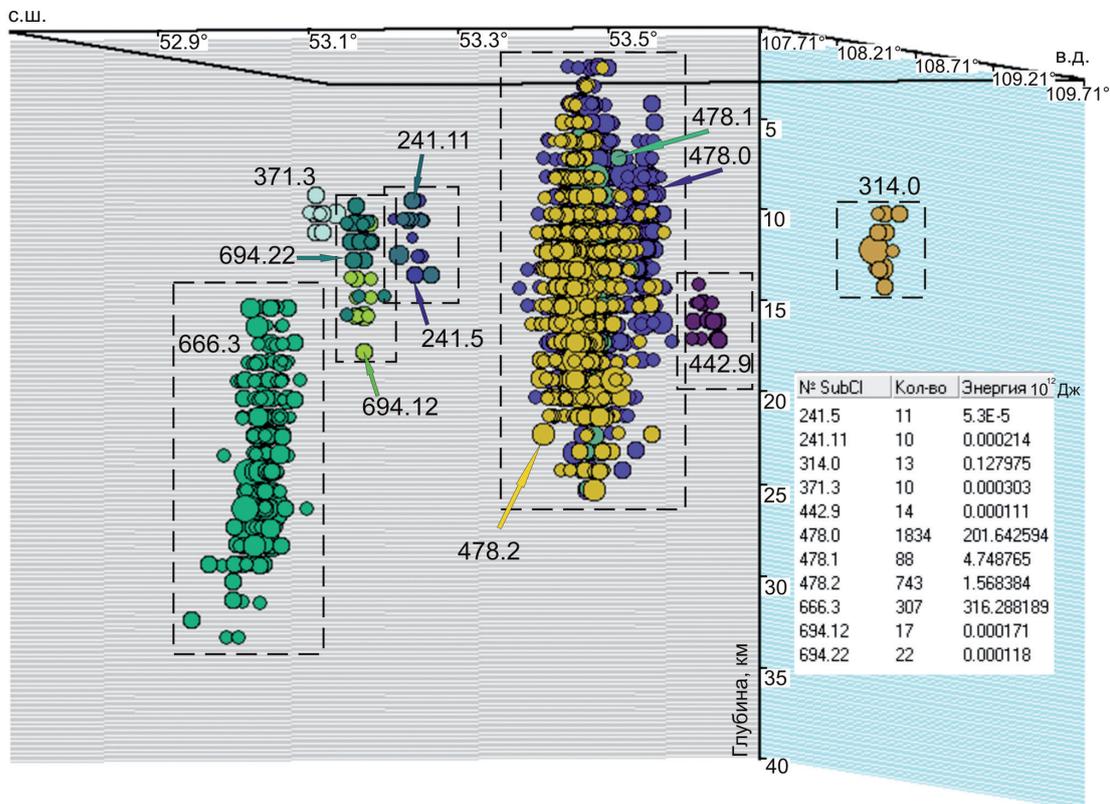


Рис. 8. Трехмерная модель подкластеров каталога землетрясений Среднего Байкала. Стрелками показаны подкластеры, на врезке для каждого подкластера приведено количество элементов и суммарная выделяющаяся энергия

соответствует подкластеру 666.3. По гистограмме распределения количества землетрясений по подкластерам видно, что самая многочисленна группа землетрясений – 478.0 (1834 события), в подкластере 478.1 – 88 событий, в 478.2 – 743, в 666.3 – 307.

По трехмерной модели расположения подкластеров можно увидеть глубинное распределение землетрясений (рис. 8). Для Максимихинской последовательности, кластер 478, характерны глубины до 5-17 км, землетрясения Туркинской последовательности определены на глубине 15-30 км.

Для подкластера 478.0 построена гистограмма распределения количества событий и суммарной энергии по времени с заданным периодом 2 суток (рис. 9). По гистограмме видно, что активизация произошла 27 января 2008 г., задолго до основного толчка, после наблюдался умеренный фон сейсмичности – до 20 мая 2008 г., на это время приходится максимальное количество афтершоков и максимальная выделившаяся энергия. Далее пошел спад сейсмической активности и наблюдался умеренный

фон, также наблюдались всплески активности 14 ноября 2009 г., 10 февраля 2010 г. и 21 мая 2010 г.

Заключение

В работе приведен обзор разработанной программы кластеризации поля гипоцентров землетрясений для исследования сейсмичности Байкальского региона. Приложение тестировалось и используется в Байкальском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

В статье выполнен анализ землетрясений Култукской последовательности (27.08.2008 г.) и сейсмических событий территории Среднего Байкала за период 01.01.2008–31.12.2014 гг. Разработанное программное обеспечение позволяет выделить сейсмически активные зоны, проследить пространственно-временное развитие сейсмического процесса, оценить количество и выделившуюся энергию землетрясений. В настоящее время в основе

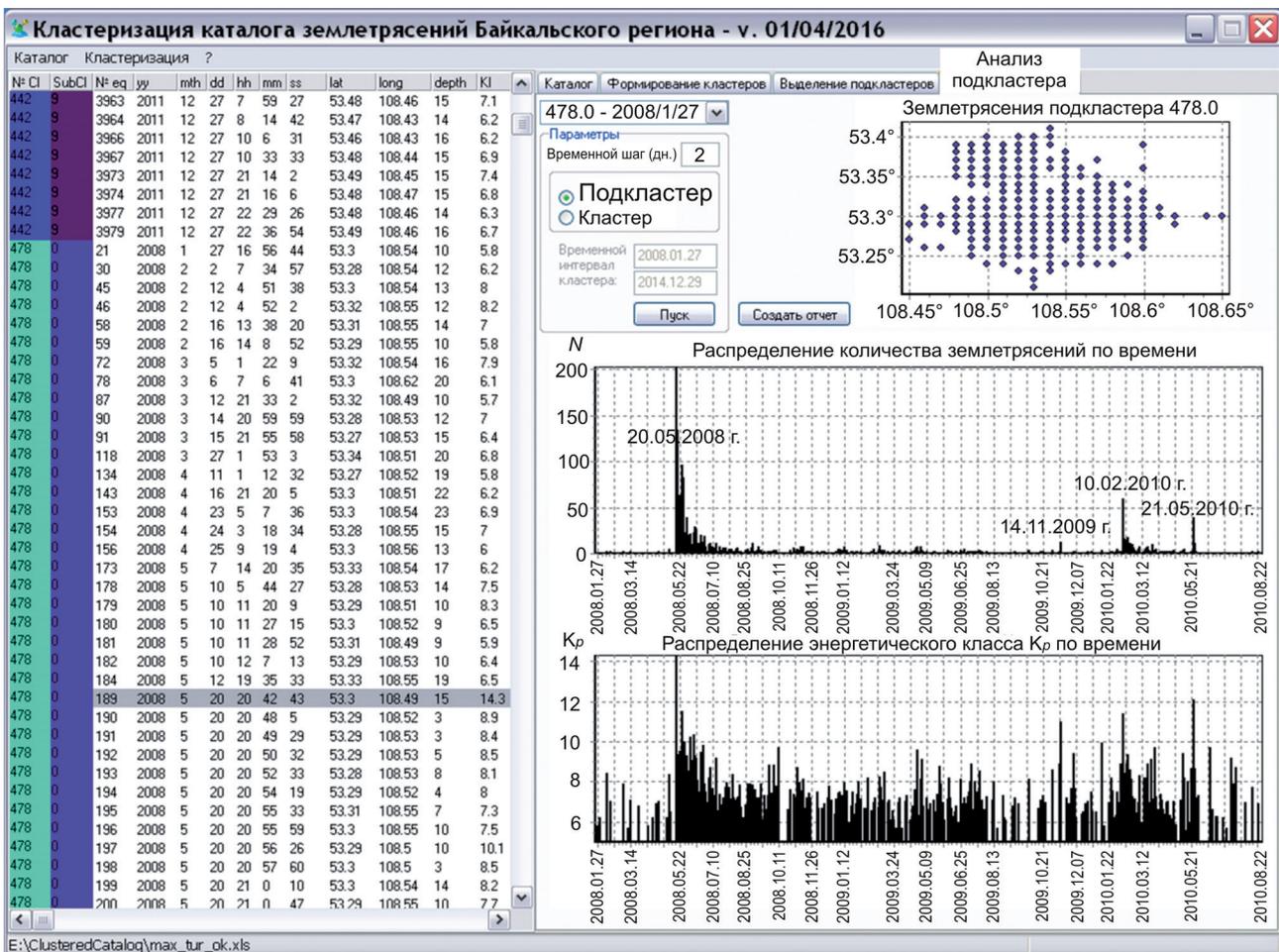


Рис. 9. Образ экрана при анализе подкластера 478.0. Пояснения см. в тексте

программы заложен алгоритм кластеризации методом ближайшего соседа, в дальнейшем планируется апробирование других методов кластерного анализа.

Ключевые слова: сейсмический каталог, землетрясения, кластер, кластерный анализ, метод ближайшего соседа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. ОСР-97. М-б 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / Министерство науки и технологий РФ ; ОИФЗ РАН. – М., 1999. – 57 с.
2. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. – М. : Наука, 1977. – 536 с.
3. Радзиминович Н.А., Гилева Н.А., Мельникова В.И., Масальский О.К., Радзиминович Я.Б., Ружич В.В., Бержинская Л.П., Ордынская А.П., Емельянова И.А., Смекалин О.П. Южно-байкальское землетрясение 25 февраля 1999 года с $K_p=14.6$, $I_0=8$ (Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск : ФОП, 2005. – С. 264-279.
4. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Радзиминович Н.А., Ружич В.В., Масальский О.К., Радзиминович Я.Б., Бержинский Ю.А., Бержинская Л.П., Павленов В.А., Емельянова И.А. Кичерские землетрясения 21 марта 1999 года с $K_p=14.5$ и 14.2 , $I_0=7-8$ (Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск : ФОП, 2005. – С. 280-295.
5. Арефьев С.С., Быкова В.В., Гилева Н.А., Масальский О.К., Матвеев И.В., Матвеева Н.В., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В. Предварительные результаты эпицентральных наблюдений Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2008. – Т. 35. – № 4. – С. 5-15.
6. Мандель И.Д. Кластерный анализ. – М. : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
7. Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Кластерный анализ // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ : сборник / пер. с англ. А.М. Хотинского, С.Б. Королева ; под ред. И.С. Енюкова. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
8. Ouchi T, Uekawa T. Statistical analysis of the spatial distribution of earthquakes variations of the spatial distribution of earthquakes before and after large earthquakes. // Phys. Earth and Planet. Inter. – 1986. – № 44. – Р. 211-225.
9. Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – С. 52-58.
10. Иванова Е.В. Использование кластерного анализа для классификации и идентификации сейсмических событий с локальных расстояний // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2012. – № 2. – С. 23-27.
11. Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Агаян С.М. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. – 2013. – № 6. – С. 3-19.
12. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6.3$ на Юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. – 2012. – № 7-8. – С. 42.
13. Мельникова В.И., Гилева Н.А. Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с $M_w = 6.3$, $I_0 = 8-9$ (Южный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск : ГС РАН, 2014. – С. 386-405.
14. Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И. Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г. с $K_p = 14.3$, $M_w = 5.3$, $I_0 = 7$ (Центральный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск : ГС РАН, 2014. – С. 337-345.
15. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А. Особенности сейсмических активизаций среднего Байкала в 2008-2011 гг. // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 453. – № 6. – С. 680-685.