

*Е.И. Алёшина<sup>1</sup>, Л.В. Гунбина<sup>1</sup>, Б.М. Седов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Магаданский филиал ГС РАН, г. Магадан, [evgeniya@memsd.ru](mailto:evgeniya@memsd.ru), [glv@memsd.ru](mailto:glv@memsd.ru)

<sup>2</sup>Север-Восточный КНИИ ДВО РАН г. Магадан, [sedov@neisri.ru](mailto:sedov@neisri.ru)

### **Введение**

Исследования афтершоков и роев землетрясений важны, поскольку позволяют получить данные о параметрах гипоцентральных зон, суммарной выделенной упругой энергии, величина которой может быть использована для оценки максимального потенциального землетрясения. Через их характеристики, принципиально, можно выходить на прочность массивов пород, геодинамические и иные значения, определяющие сейсмичность конкретного района или структуры. Отметим, что особый интерес представляют повторяющиеся афтершоковые рои землетрясений, поскольку их данные должны ответить на один из главных вопросов сейсмологии: прогноз сейсмических событий. Ниже впервые приводятся данные анализа зон роев и афтершоков Северо-Востока России.

### **Рои и афтершоки Северо-Востока России**

В юго-западной части Магаданской области сеть сейсмических станций позволяет регистрировать без пропусков землетрясения с  $K_p \geq 7$ , эпицентры которых располагаются в сейсмических поясах Черского и Северо-Охотском.

По данным регионального каталога землетрясений Северо-Востока России за период 1952–2013 гг., составленного Магаданским филиалом ГС РАН, было выявлено несколько афтершоковых зон эпицентров и роев землетрясений (рис. 1). Большинство зон располагается на концах достаточно протяжённых тектонических нарушений. Это позволяет предполагать концентрацию геодинамических воздействий аналогичных образованию трещин, механизм образования которых известен [17].

### **Характеристика зон роев землетрясений**

Между посёлками Галимый и Меренга в 1998 г. наблюдался рой, включающий более 200 землетрясений, из которых локализованы 73 события с  $K_p=8.1-11.1$  [10]. Эти землетрясения располагаются компактной группой, вытянутой в субширотном направлении. Длина зоны около 40 км, ширина – 20 км. Глубины изменяются от 0 до 42 км, большинство гипоцентров находятся на глубинах около 10 км. Главным структурным элементом этого района является Верхнесугойская кайнозойская впадина. Она приурочена к Буксундинскому глубинному разлому северо-восточного простирания [12]. По геолого-геофизическим данным впадина возникла в результате сбросо-сдвиговых движений по разломам. Она заполнена отложениями общей мощностью свыше 200 м. Очаговая область землетрясений пространственно тяготеет к юго-восточному окончанию впадины, где вертикальная амплитуда смещений по безымянному разлому составляет более 200 м. По геологическим данным большинство разломов имеют северо-восточное простирание и характеризуются левосторонними сдвигами [7].

В 2004 г., восточнее роя, произошедшего в 1998 г. возник другой рой землетрясений, названный Наяханским. Он включал 17 землетрясений с  $K_p=7.2-10.0$ , зарегистрированных в период с 21 января по 5 марта 2004 г [3]. Рой находится вблизи побережья Гижигинской губы. Эпицентры этих событий приурочены к северному краю Наяханского вулканического поля. Их область вытянута в субмеридиональном направлении, ее длина около 40 км, ширина – 12 км (см. рис. 1). Отметим, что в плане все эпицентры, кроме одного, располагаются севернее очага самого сильного события с  $K_p=10.0$ .

В районе Наяханского вулканического поля рои землетрясений также возникали в 1981 г., 1990 г., 2007 г., 2008–2009 гг. и 2010 г. В 1981 г. и 1990 г. их эпицентры располагались в Охотском море. В 2007 г. зарегистрированы 12 землетрясений с  $K_p=7.2-9.7$ . Область эпицентров слегка вытянута в субмеридиональном направлении. В 2010 г. зарегистрированы 19 землетрясений с  $K_p=7.1-10.5$ . Область эпицентров имеет изометричную форму размером 27x24 км, длинная ось вытянута в субмеридиональном направлении. Следует отметить, что только зона роя, произошедшего в 1998 г., имеет субширотное простирание, остальные зоны – субмеридиональное. Глубины гипоцентров изменяются от 0 до 33 км, большинство событий находятся на глубинах 4–6 км и 33 км.

Рой, названный Маратским, располагается примерно в 110 км к северо-западу от пос. Омсукчан. Он включает 76 толчков с  $K_p=7.1-10.8$ . Их эпицентры находятся между Сугойским и Насучанским синклиниями, в пределах Нягаинской мульды, между крупными разломами –

Маратским и Ветровским. Продольная ось овального облака роя имеет протяженность около 70 км и вытянута в север–северо-восточном направлении. Длина поперечной оси около 15 км.

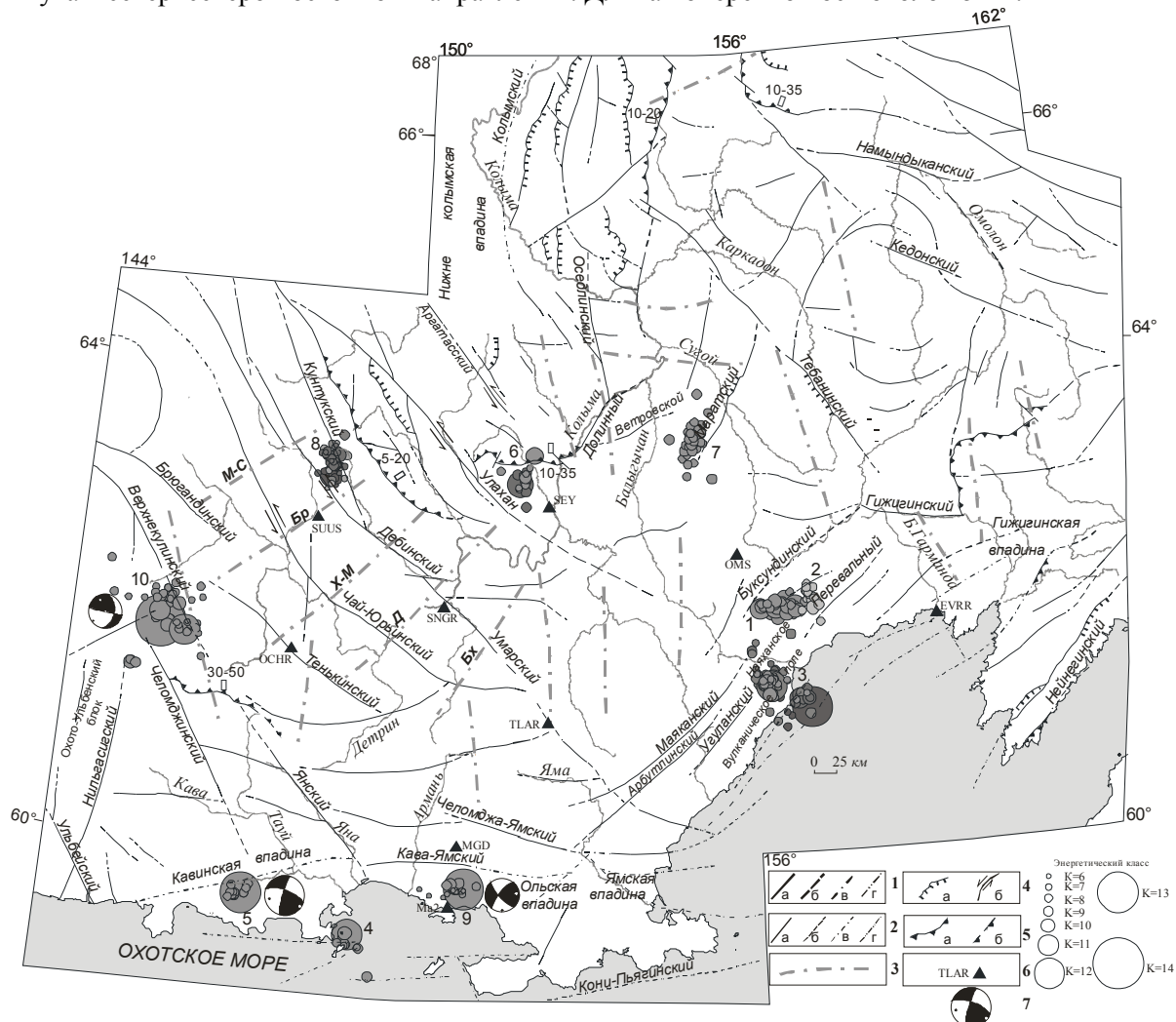


Рис. 1. Схема тектонического районирования Охотско-Колымского водораздела [3] и положение эпицентров землетрясений афтершоковых зон и роев. Условные обозначения: 1 – крупнейшие разломы: установленные (а), предполагаемые (б), скрытые под молодыми образованиями (в) и в акватории моря (г); 2 – прочие тектонические нарушения: установленные (а), предполагаемые (б), скрытые под молодыми образованиями (в) и в акватории моря (г); 3 – скрытые разломы фундамента: М-С – Малък-Сиенский, Бр – Берелёхский, Х-М – Хейджано-Мылгинский, Д – Детринский, Бх – Бахапчинский; 4 – разломы с указанием угла наклона поверхности сместителя: надвиги (а), сдвиги (б); 5 – краевые ограничения установленных (а) и предполагаемых (б) шарьяжей, интерпретированная амплитуда их смещения, м; 6 – сейсмическая станция; 7 – механизм очага. Цифрами обозначены афтершоковые зоны: 1 – Галимый-Меренга 1998 г.; 2 – Наяханская 2004 г.; 3 – Наяханская 1981, 1990, 2007, 2008, 2009, 2010 гг.; 4 – Спафарьевская 2001 г.; 5 – Мотыклейская 2001 г.; 6 – Сеймчанская 2002–2003 гг.; 7 – Маратская 2004 г.; 8 – Дебин-Кунтукская 2003, 2008, 2009, 2011 гг.; 9 – Ланкучанская 2009–2010 гг.; 10 – Верхнекулинская 2010–2011 гг.

В 30 км северо-западнее пос. Сеймчан в 2002 г. в один день и, практически, в одном и том же месте произошли два землетрясения с  $K_p=10.9$  и  $K_p=11.3$ . Эти землетрясения ощущались в Сеймчане с интенсивностью до 4 баллов. Первое из них, по-видимому, является сильным форшоком. Также локализованы 6 афтершоков с  $K_p \geq 7.3$ , хотя слабых событий было больше, их параметры не определены из-за недостаточного количества данных. Область эпицентров Сеймчанского роя имеет меридиональное простирание на расстояние 33 км [4]. В 2003 г. здесь так же наблюдалась повышенная сейсмичность. Область из 20 эпицентров с  $K_p=6.5-10.6$  вытянута в север–северо-восточном (субмеридиональном) направлении. Её протяжённость около 40 км. Отметим, что все слабые эпицентры располагаются только южнее очага самого сильного землетрясения с  $K_p=10.6$ .

В 38 км от г. Сусуман 14 мая 2003 г. произошло сильное землетрясение  $K_p=11.1$ . Ему предшествовал один форшок (29 марта с  $K_p=9.3$ ). Оно сопровождалось серией афтершоков с  $K_p=6.2-8.6$ . Все землетрясение, включая форшок и афтершоки, располагались в районе Иньяли-Дебинского

синклиория, в пределах Морджотской тектоно-магматической зоны, между двумя разломами северо-западного простирания – Дебинским и Кунтукским [2]. Форшок и все афтершоки находились севернее эпицентра основного толчка. Все землетрясения располагаются на глубинах 0–33 км, у большинства гипоцентров глубина 4–6 км. Глубина гипоцентра основного толчка 6 км. Землетрясение с  $K_p=11.1$  ощущалось в Сусумане с интенсивностью 4 балла. Многие респонденты отмечали нарастающий подземный гул.

Впоследствии, после сильного события 2003 г., в этом районе, между разломами Дебинский и Кунтукский, в 2008, 2009 и в 2011 гг. возникали рои слабых землетрясений с  $K_p=5.6–10.1$ . Две трети событий имели малый энергетический класс ( $K_p \leq 8$ ). Область всех эпицентров роя Дебин-Кунтук вытянута в северо-западном направлении (вдоль разломов). Длина большой оси – около 40 км, малой – около 30 км. Отмечается некоторое смещение областей эпицентров со временем на север, т.е. эпицентры 2003 г. располагаются южнее эпицентров 2008 г., 2009 г. и 2011 г. Отметим, что поскольку в этом районе обрабатываются мелкие россыпи золота, некоторые события малых энергетических классов, возможно, являются взрывами.

#### **Характеристика основных афтершоковых зон**

Афтершоковые землетрясения являются более частыми событиями по сравнению с роями на Северо-Востоке России. Для них характерны и более длительные периоды действия.

#### **Ланкучанская афтершоковая зона**

Ланкучанское землетрясение, произошедшее 26 декабря в 23<sup>h</sup> 22<sup>m</sup>, было наиболее сильным ( $K_p=12.9$ ) в Примагданье за весь период инструментальных наблюдений (с 1952 г.) на Северо-Востоке России. Названо оно по ближайшей речке Ланкучанке. Максимальный макросейсмический эффект в г. Магадане достигал 6 баллов. Это землетрясение сопровождалось сильным подземным гулом, похожим на удаленный взрыв, который был слышен на расстоянии до 30 км от эпицентра. При проведенных на следующий день полевых обследованиях эпицентральной зоны не было найдено следов схода снежных лавин и срывов снежных карнизов. Временная локальная сеть сейсмостанций, установленная в эпицентральной зоне, зарегистрировала более 100 афтершоков, из них локализованы 33. Суммарная сейсмическая энергия, выделившаяся в эпицентральной зоне составила  $\Sigma E=1,001 \cdot 10^{13}$  Дж. В очаге основного толчка 26.12.2009 г. высвободилась энергия, равная  $E=1.0 \cdot 10^{13}$  Дж или 99,9% от суммарного ее значения.

Все афтершоки Ланкучанского землетрясения располагаются западнее эпицентра основного толчка, лишь один из них (05.06.2010 в 06<sup>h</sup> 02<sup>m</sup> с  $K_p=7.8$ ) – восточнее. Большая ось области эпицентров вытянута вдоль тектонических нарушений северо-восточного простирания, пересекающих Киш-Анмандыканскую зону разломов [6]. Вблизи их пересечения находится эпицентр основного события – Ланкучанское землетрясение. Протяженность большой оси около 40 км, азимут простирания – 110°. Длина малой оси – около 11 км. Глубина гипоцентра главного события 10 км, глубины афтершоков изменяются от 7 до 33 км.

#### **Верхнекулинская афтершоковая зона**

В верховьях р. Кулу, на границе с Якутией (Саха) 2 августа 2010 г. в 14<sup>h</sup> 17<sup>m</sup>, произошло Верхнекулинское землетрясение с  $K_p=13.6$ . Оно ощущалось на значительной территории, максимальный макросейсмический эффект в г. Сусуман достигал 5 баллов. Землетрясение сопровождали форшоки и афтершоки. Суммарная сейсмическая энергия, выделившаяся в эпицентральной зоне Верхнекулинского землетрясения составила  $\Sigma E=4.041 \cdot 10^{13}$  Дж. В очаге основного толчка 02.08.2010 г. высвободилась энергия, равная  $E=3.981 \cdot 10^{13}$  Дж, или 98,5% от суммарного ее значения.

Эпицентры основного толчка, форшоков и афтершоков располагались в пределах Верхнеиндигирского синклиория и были приурочены к зоне сочленения Верхнекулинского разлома северо-западного простирания и Майско-Ульбейского разлома северо-восточного простирания. Это одна из наиболее сейсмически активных зон Северо-Востока России. Здесь и ранее неоднократно происходили сильные землетрясения. Так 13 января 1972 г. произошло Кулинское землетрясение с  $K_p=14.0$ . Его эпицентр располагался восточнее, в 82 км от эпицентра 2010 г. В ноябре 2011 г. здесь произошло землетрясение с  $K_p=11.6$ . Область эпицентров Верхнекулинского роя 2009–2011 гг. вытянута вдоль Верхнекулинского разлома на расстояние около 60 км, а вдоль Майско-Ульбейского разлома на 50 км. Азимут простирания большой оси около 155°. Гипоцентры всех землетрясений расположены на глубинах до 33 км.

#### **Мотыклейская афтершоковая зона**

Мотыклейское землетрясение с  $K_p=13.1$  произошло 7 января 2001 г. в 06<sup>h</sup> 27<sup>m</sup>. Оно ощущалось в посёлках Магаданской области с интенсивностью до 6 баллов. Землетрясение сопровождалось

серией из 15 афтершоков с  $K_p=7.2-8.6$ . Мотыклейское землетрясение приурочено к одноимённой неотектонической впадине, заполненной континентальными рыхлыми песчано-глинистыми отложениями неоген-четвертичного возраста, максимальной мощностью до 1200 м (по данным бурения) [12]. Впадина отмечается отрицательными локальными аномалиями силы тяжести  $\Delta g_B$ . В основании впадины залегают вулканогенные толщи Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. О современной активности разломов Мотыклейской впадины свидетельствуют геотермальные источники. Область эпицентров афтершоков вытянута вдоль субширотного Кава-Ямского разлома. Протяжённость большой оси афтершоковой зоны около 22 км, малой – около 12 км. Главное событие и большинство афтершоков находятся на глубине 6 км.

#### Спафарьевская афтершоковая зона

Спафарьевское землетрясение с  $K_p=12.0$  произошло 4.01.2001 г. в 14<sup>h</sup> 57<sup>m</sup>. Оно ощущалось в г. Магадане и посёлках Магаданской области с интенсивностью 3–5 баллов. Землетрясение сопровождалось 9 афтершоками с  $K_p=7.1-9.6$ . Землетрясение и его афтершоки приурочены к Спафарьевскому поднятию фундамента, протяжённостью около 200 км [15]. Глубина залегания акустического фундамента, по данным морской сейсморазведки МОГТ, менее 0.5 км. На юге поднятие ограничено субширотным разломом, по которому амплитуда вертикальных смещений составляет 1–4.5 км. Поднятие разбито поперечными разломами с правосторонним сдвигом, при горизонтальной амплитуде до 1 км. Эти нарушения субпараллельны друг другу при северо-западном простирании (азимут около 135°). Их направления близки сейсмогенным разломам сейсмического пояса Черского [11]. Зона эпицентров афтершоков Спафарьевского землетрясения также вытянута в северо-западном направлении на расстояние около 20 км, длина малой оси – 12 км. Основное событие и большинство афтершоков находятся на глубине 6 км.

#### Заключение

Исследования зон роев и афтершоков Северо-Востока России позволили выявить следующие основные закономерности.

1. Большинство афтершоковых зон и роев приурочено к окончаниям (концевым частям) протяжённых тектонических нарушений. Это позволяет предполагать, что они связаны с разрядкой геодинамических напряжений, приводящих к продвижению зон разрывов.

2. Часть афтершоковых событий носит квазипериодический характер, сопровождающийся их повторением. При этом афтершоковые зоны перемещаются и не совпадают друг с другом. Это свидетельствует о том, что после разрядки напряжений и образования зоны нарушения сплошности среды область концентрации напряжений смещается.

3. Гипоцентры афтершоков образуют эллипсовидные области. Положение проекций гипоцентров Ланкучанской, Верхнекулинской, Мотыклейской и Спафарьевской афтершоковых зон на вертикальную плоскость показывают, что большая ось области афтершоков имеет субвертикальный наклон, что подтверждается механизмами очагов (рис. 2).

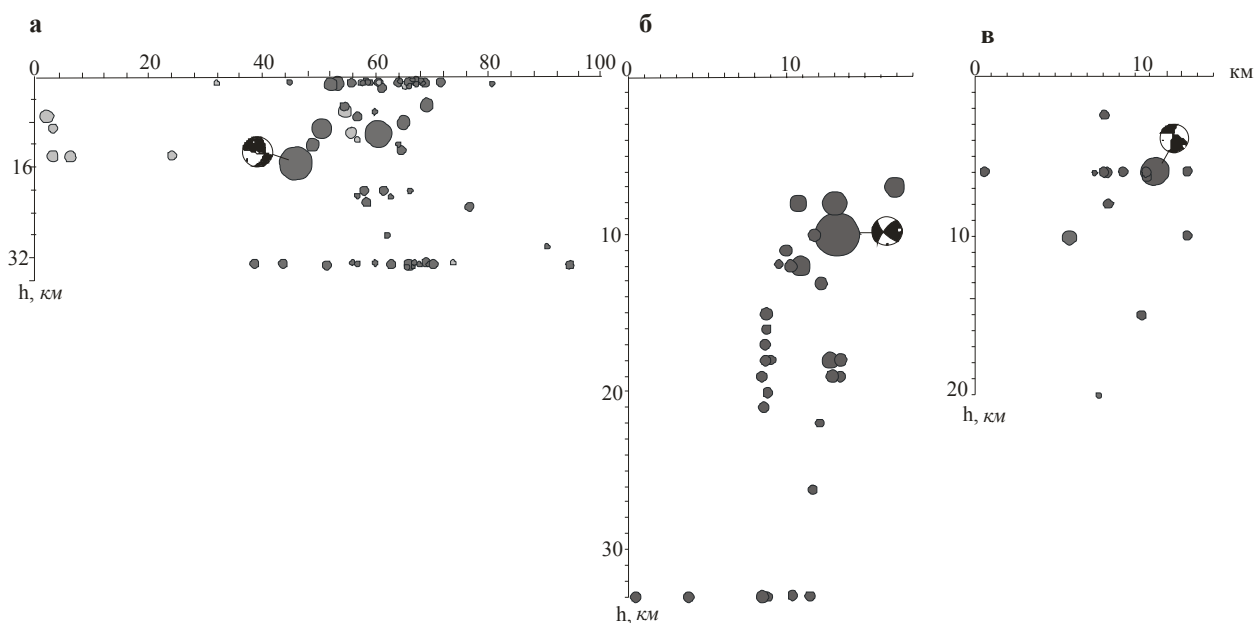


Рис. 2. Положение проекций гипоцентров основного толчка и афтершоков Верхнекулинского (а), Ланкучанского (б) и Мотыклейского (в) землетрясений на вертикальную плоскость

4. Главное событие, практически всегда, является ограничивающим положение афтершоков с одной из сторон эллипсоида, за пределами которой события отсутствуют.

5. С основным событием связано выделение основной энергии (98–99%) от суммарной.

6. Наблюдается прямая зависимость между размерами афтершоковой зоны и величиной  $K_p$  главного события.

7. Для 6 афтершоковых зон получены разницы магнитуд между главным событием и сильнейшим афтершоком, которые изменяются от 1,0 до 2,4, при среднем значении 1,7. Согласно закону Бота, магнитуда сильнейшего афтершока на 1,2 меньше магнитуды главного толчка [13].

8. Главные события, предваряющие афтершоки, иногда сопровождаются звуком. Он напоминает нарастающий подземный гул или отдаленный взрыв. Звук слышен на расстоянии до 40 км от эпицентра. Он не является результатом каких-либо поверхностных явлений, поскольку при обследованиях эпицентральных зон землетрясений, произошедших зимой, не выявлено ни снежных лавин, ни срывов карнизов, свежих оползней и свалов грунтов.

9. Часть афтершоковых зон приурочена к термальным источникам: Мотыклейскому, Ланкучанскому, что позволяет предполагать растяжение в механизме землетрясений, что подтверждается решением механизма очага.

10. Суммарная энергия выделенная отдельным роем, существенно меньше, чем высвобождаемая в афтершоковой зоне.

11. Учитывая, что афтершоковые зоны являются одним из основных источников сведений о механизме землетрясений их исследование необходимо продолжить, используя не только кинематические данные (эпицентрию), но и динамические характеристики афтершоков (частотные спектры колебаний, векторные составляющие, затухание и т.д.)

#### **Список литературы**

1. Алёшина Е.И., Седов Б.М. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России // Развитие структуры и геодинамики северной границы Охотоморской плиты. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2009. – С. 11–13.
2. Алёшина Е.И., Гунбина Л.В., Комарова Р.С., Седов Б.М. Северо-Восток России // Землетрясения Северной Евразии в 2003 году. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 193–200.
3. Алёшина Е.И., Гунбина Л.В., Комарова Р.С., Седов Б.М. Северо-Восток России // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 199–206.
4. Алёшина Е.И., Гунбина Л.В., Лещук Н.М., Седов Б.М. Северо-Восток России // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 226–231.
5. Алёшина Е.И., Гунбина Л.В., Лещук Н.М., Седов Б.М. Северо-Восток России // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 223–232.
6. Аноров П.Н., Юдина Г.М., Соцкий Э.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000 Издание второе. Магаданская серия. О-56-I (Магадан), О-56-II (Ола). Комитет природных ресурсов по Магаданской области ФГУП «Магадангеология», 2001.
7. Геология СССР. Т. XXX. Северо-Восток СССР. Книга 1. Геологическое описание. – М.: Недра, 1970. – 548 с.
8. Гунбина Л.В., Алёшина Е.И., Лещук Н.М., Седов Б.М. Северо-Восток России // Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. – Обнинск: ГС РАН, 2005. – С. 177–181.
9. Гунбина Л.В., Карпенко Л.И., Алёшина Е.И., Смирнов В.Н. Ланкучанское землетрясение 26 декабря 2009 г. (Магаданская обл.) // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Пятой Международной сейсмологической школы. Владикавказ, 4-8 октября 2010 г. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 81-85.
10. Гунбина Л.В., Лещук Н.М., Седов Б.М. Северо-Восток России // Землетрясения Северной Евразии в 1998 году. – Обнинск: ФОР, 2003. – С. 169–172.
11. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. – М.: Геос, 2000. – 227 с.
12. Кузнецов В.М. Тектоническая карта Охотско-Колымского водораздела, масштаб 1:1000000. Магадан: «Магадангеология», 2000. – 8 листов.
13. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 670 с.
14. Lamont Doherty Earth Observatory (LDEO), Columbia University, 61 Route 9W, P.O. Box 1000, Palisades, NY 10964-1000, U.S.A. <http://www.globalcmt.org>
15. Sedov B.M. The Setting of the Okhotsk Sea Microplate Northern Boundary and its Seismicity // Abs. AGU, meeting, San-Francisco, 2004.
16. Stein S., Wysession M. Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Blackwell Publishers, 2003. – 500 p.
17. Tang C., Hudson J.A. Rock Failure Mechanism Explained and Illustrated. Taylor & Francis Group, London, UK-2010.-322 p.