

МУЛЬТИ-ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА НА КАМЧАТКЕ, 2011 - 2013 ГГ.

Любушин А.А.¹, Копылова Г.Н.², Касимова В.А.², Таранова Л.Н.²

¹ Институт физики Земли РАН, г.Москва, lyubushin@yandex.ru

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

Введение

Низкочастотный сейсмический шум является важным источником информации о процессах в земной коре, несмотря на то, что основная энергия его колебаний обусловлена процессами в атмосфере и океане: вариациями атмосферного давления и воздействием океанических волн на берег и шельф. Земная кора является средой распространения энергии от атмосферных и океанических процессов и, поскольку передаточные свойства коры зависят от ее состояния, то и статистические свойства микросейсм могут отражать изменения свойств литосферы, в т. ч. и перед сильными землетрясениями. В данной работе используется методика, представленная в серии статей [1-10], посвященных анализу прогностических свойств низкочастотного сейсмического шума с использованием данных от сети широкополосных сейсмических станций F-net в Японии и анализу глобального поля низкочастотных сейсмических шумов. В указанных работах на примере сильнейших землетрясений Японии 2003-2011 гг. показано, что анализ параметров микросейсмического фона является инструментом для динамической оценки сейсмической опасности в реальном времени. Построение карт распределения по пространству статистических параметров сейсмического шума в скользящем временном окне позволяет наглядно визуализировать динамику зарождения и развития областей повышенной сейсмической опасности. Метод также позволяет снимать сейсмическую опасность и определять области низкой сейсмической опасности.

Характеристика исходных данных

В качестве источников сейсмических данных использовались записи вертикальных компонент с частотой оцифровки 100 Гц (ВНЗ-записи) с 1 января 2011 г по 30 июня 2013 г. на 17-ти широкополосных сейсмических станциях Геофизической службы РАН (ГС РАН) на территории Камчатского края и о-ва Парамушир (рис. 1).

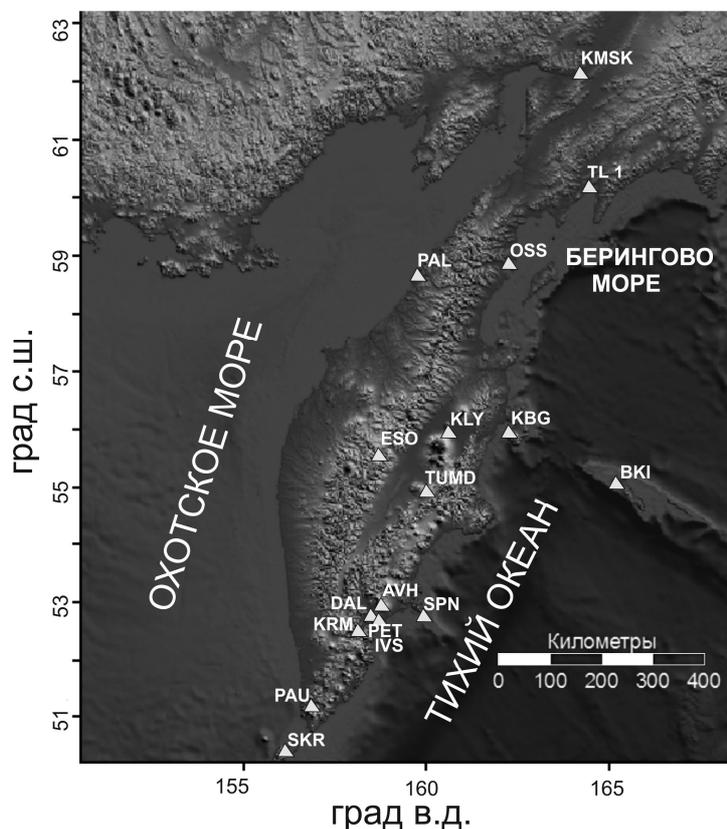


Рис. 1. Схема расположения сейсмических станций (расположение станций IVS и PETS практически совпадает)

Вычислялись средние значения в последовательных интервалах времени длиной 6000 отсчетов, и осуществлялся переход к шагу по времени 1 минута. Затем для рядов 1-минутных данных рассматривались последовательные интервалы времени длиной 1440 отсчетов или 1 сутки по каждой станции. Для суточных интервалов времени оценивались статистики сейсмического шума (см. ниже) после удаления трендов полиномом 8-го порядка.

Наличие сети станций позволяет строить ежесуточные карты распределения параметров сейсмического шума по пространству. Усреднение ежесуточных карт для дней, заключенных

между двумя датами, дает среднюю карту изменения параметров шума (пример см. рис. 2). Именно эти карты являются объектами геофизической интерпретации.

Используемые статистики сейсмического шума

Минимальная нормализованная энтропия вейвлет-коэффициентов шума En .

Пусть $X(t)$ - конечная выборка некоторого случайного сигнала, $t=1, \dots, N$ - индекс, нумерующий последовательные отсчеты (дискретное время). Определим нормализованную энтропию конечной выборки формулой: $En = -\sum_{k=1}^N p_k \cdot \log(p_k) / \log(N)$, где $p_k = c_k^2 / \sum_{j=1}^N c_j^2$. В силу построения

$0 \leq En \leq 1$. Здесь $c_k, k=1, N$ - коэффициенты ортогонального вейвлет-разложения с некоторым базисом. Использовались 17 ортогональных вейвлетов Добеши: 10 обычных базисов с минимальным носителем с числом обнуляемых от 1 до 10 и 7 симлетов Добеши с числом обнуляемых моментов от 4 до 10. Для каждого из базисов вычислялась нормализованная энтропия распределения квадратов коэффициентов и находился базис, обеспечивающий минимум величине En . Оценка величины En производилась в скользящем временном окне, состоящем из 1440 соседних минутных отсчетов, что составляет одни сутки. Таким образом, для каждой станции получался временной ряд значений минимальной нормализованной энтропии En с шагом по времени 1 сутки.

Мульти-фрактальный параметр $\Delta\alpha$ (ширина носителя спектра сингулярности).

Рассмотрим некоторое случайное колебание $X(t)$ на интервале времени $[t - \delta/2, t + \delta/2]$ длиной δ с центром во временной точке t . Рассмотрим размах $\mu(t, \delta)$ случайного колебания на этом интервале, т. е. разницу между максимальным и минимальным значениям $\mu(t, \delta) = \max X(s) - \min X(s)$, где минимум и максимум ищутся для временного индекса s из интервала: $t - \delta/2 \leq s \leq t + \delta/2$.

Если устремить $\delta \rightarrow 0$, то $\mu(t, \delta)$ будет также стремиться к нулю. Если скорость убывания определяется законом $\delta^{h(t)}$: $\mu(t, \delta) \sim \delta^{h(t)}$ при $\delta \rightarrow 0$, то величина $h(t)$ называется экспонентой Гельдера-Липшица. Если величина $h(t)$ не зависит от момента времени t : $h(t) = const = H$, то случайное колебание $X(t)$ называется моно-фрактальным, а величина H - экспонентой Херста. Если же экспоненты Гельдера-Липшица $h(t)$ различаются для разных моментов времени t , то случайное колебание называется мульти-фракталом и для него можно определить понятие спектра сингулярности $F(\alpha)$. Для этого мысленно выделим множество $C(\alpha)$ таких моментов времени t , которые имеют одинаковые значения α экспоненты Гельдера-Липшица: $h(t) = \alpha$. Множества $C(\alpha)$ существуют (т. е. содержат элементы, которые не являются пустыми множествами) не для всех значений α . Т. е. существуют некоторые минимальное α_{\min} и максимальное α_{\max} , такие, что лишь для $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ множества $C(\alpha)$ непустые. Мульти-фрактальный спектр сингулярности $F(\alpha)$ - это фрактальная размерность множества точек $C(\alpha)$. Параметр $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ является наиболее важной мульти-фрактальной характеристикой.

Оценки мульти-фрактальных характеристик сейсмического шума осуществлялась для одномоментных данных в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки. Использовался метод, основанный на анализе флуктуаций после устранения масштабно-зависимых трендов локальными полиномами 8-го порядка. Таким образом, так же как и для значений En , от каждой станции получались временные ряды значений $\Delta\alpha$ с шагом по времени 1 сутки.

Физические принципы, лежащие в основе использования статистик En и $\Delta\alpha$ для выделения сейсмически опасных регионов, основаны на предположении о консолидации малых блоков земной коры в пространственно-временную структуру больших размеров, которая становится способной накопить энергию для крупного сейсмического события [6-7, 9-10]. Высокие значения En могут быть связаны с увеличением консолидации малых блоков земной коры и, как следствие этого, с относительно малым числом высокоамплитудных вариаций сейсмического шума. Образование крупного консолидированного блока может сопровождаться уменьшением разнообразия передаточных и резонансных свойств среды, что, в свою очередь, приводит к уменьшению параметра $\Delta\alpha$ и к потере свойства мульти-фрактальности в изменениях сейсмического шума.

Построение карт статистик и их интерпретация

Для каждой станции ежесуточно можно получать оценки параметров $\Delta\alpha$ и En , что позволяет строить ежедневные карты изменения этих параметров по пространству. Чтобы получить такую цифровую карту для Камчатки, прямоугольная область с широтами 50 - 64° с. ш. и долготами 155 - 168° в. д., включающую в себя все станции (рис. 1), покрывалась равномерной сеткой узлов 50×50 . Каждому узлу с двойным целочисленным индексом (i, j) сопоставлялись значения $\Delta\alpha$ и En , равные медианам по заданному числу сейсмических станций, наиболее близких к рассматриваемому узлу. Карты для интервалов времени 2.5 года, 3 и 0.5 месяца были получены как совокупность медиан параметров от трех ближайших к каждому узлу станций. Усредненные карты были получены в результате усреднения ежедневных карт по всем дням внутри заданного промежутка времени.

На рис. 2, в качестве примера, приведены карты распределения параметров сейсмического шума $\Delta\alpha$ и En , усредненные за все время наблюдений (2.5 года). На этих картах по повышенным значениям En и по пониженным значениям $\Delta\alpha$ выделяется акватория Тихого океана как сейсмически опасный регион, что соответствует распределению очагов землетрясений в зоне субдукции Тихоокеанской океанической плиты под Охотоморскую плиту континентального типа. При этом внутриконтинентальный район центральной Камчатки, с точки зрения используемых критериев, является относительно «безопасным». Если следовать изложенной выше гипотезе о связи параметров сейсмического шума с подготовкой сильнейших землетрясений, то наиболее «опасными» регионами в долгосрочной перспективе являются район тихоокеанского побережья и Берингова моря с широтами 55-57°, который находится севернее эпицентра Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M=7.8$, а также северная часть Камчатского края на широтах 60-62°.

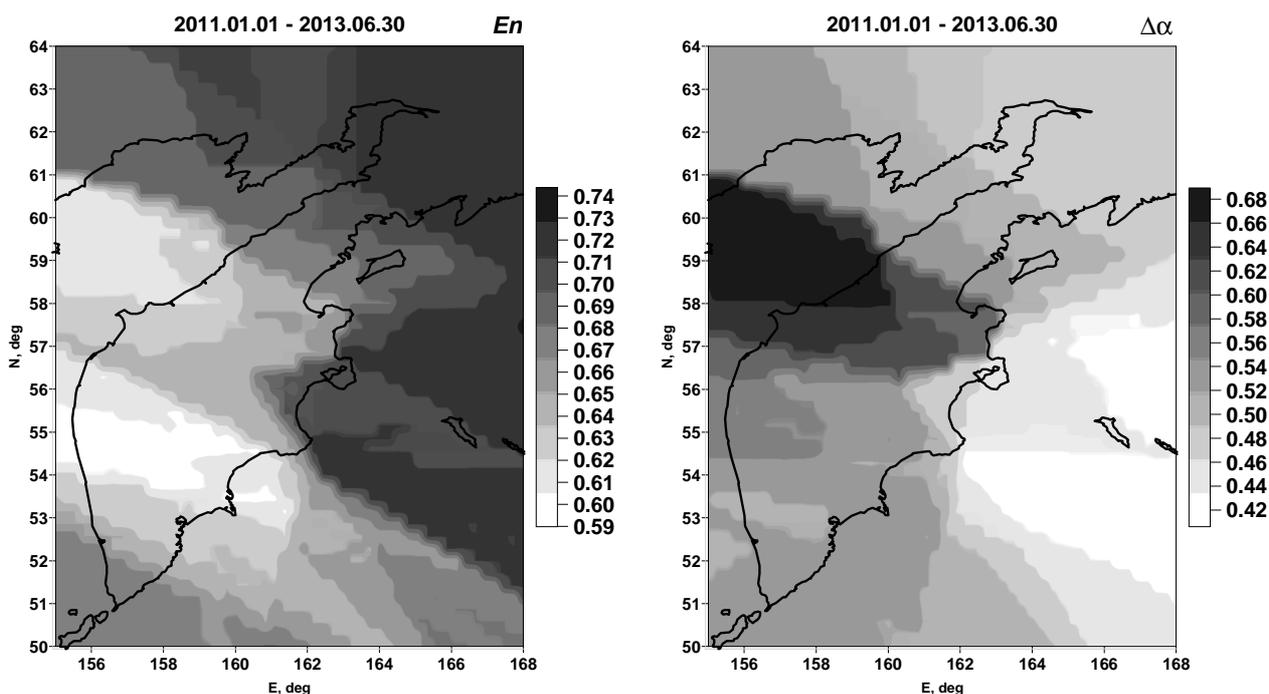
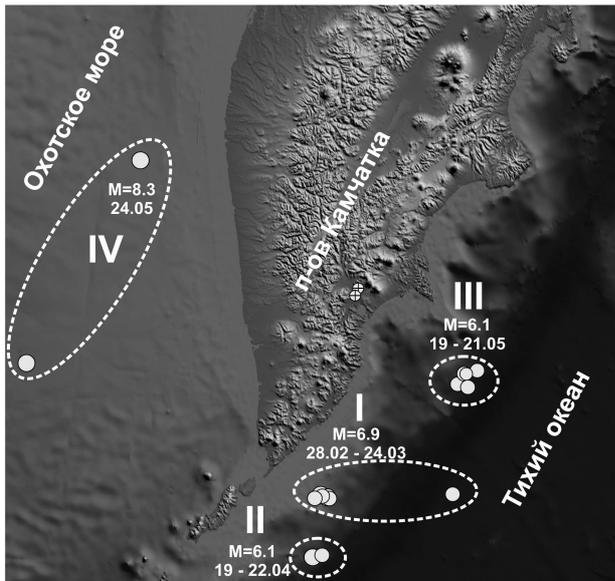


Рис. 2. Усредненные карты распределения значений параметров En и $\Delta\alpha$ за 30 месяцев наблюдений, с 01 января 2011 г. по 30 июня 2013 г.

С конца февраля по май 2013 г на южном участке Камчатской сейсмофокальной зоны наблюдалось усиление сейсмической активности в диапазоне глубин от первых десятков км до 600 км [11-12]. В это время произошли четыре группы сейсмических событий (рис. 3), включающих землетрясения с величинами максимальных магнитуд $M_{\text{макс}}=6.1-8.3$. На рис. 3 группы сейсмических событий I-III, произошедших с 28 февраля по 21 мая, были приурочены к диапазону глубин 40-80 км. Землетрясения 24 мая с $M_{\text{макс}}=8.3$ (IV на рис. 3) произошли на глубинах 600 км.



М=6.1 – 8.3 и указанием интервалов времени.

Рассмотрим, каким образом проявлялась подготовка и реализация этих землетрясений в изменении пространственно-временной структуры распределения параметров сейсмического шума. При этом будем полагать, что на рис. 2 отражено их относительно стационарное «фоновое» распределение. Детальный анализ карт, построенных по интервалам времени 3 и 0.5 мес. показывает, что существенное изменение структуры распределения параметров сейсмического шума происходило в интервале времени с октября 2012 по июнь 2013 г. (рис. 4).

Рис. 3. Схема эпицентров землетрясений с $K_s=13.5-17.0$, произошедших в феврале-мае 2013 г. (по данным Камчатского филиала ГС РАН). Цифрами I-IV и эллипсами показаны группы сейсмических событий с максимальными величинами магнитуд

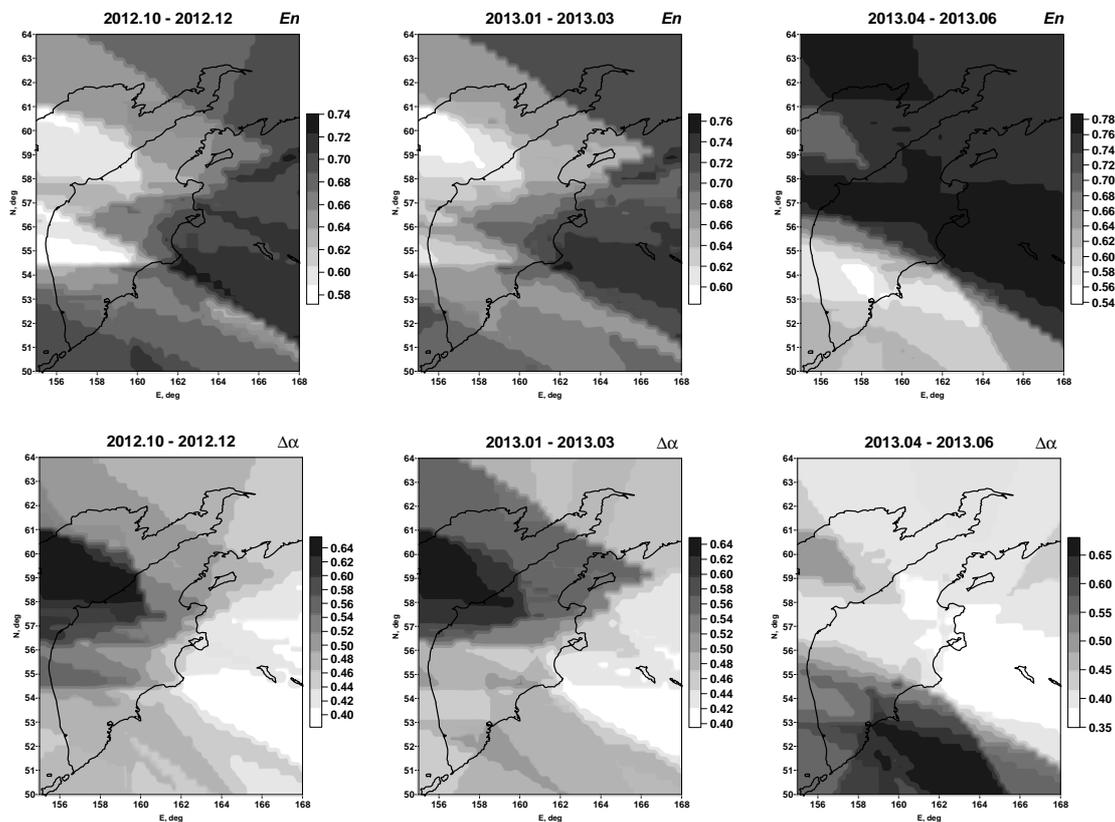


Рис. 4. Усредненные карты распределения значений параметров En и $\Delta\alpha$ за 3-хмесячные интервалы времени, с 01 октября 2012 г. по 30 июня 2013 г.

Южный участок Камчатской сейсмофокальной зоны (Тихоокеанское побережье Камчатки) выделяется по изменениям параметров En и $\Delta\alpha$ как умеренно «опасный» для возникновения сильных землетрясений на картах для интервалов времени октябрь – декабрь 2012 и январь-март 2013 гг. При этом, если рассматривать район мониторинга в целом, то на этих картах имеются зоны с более высокими (низкими) значениями статистик сейсмического шума. Например, для периода времени октябрь 2012 г. - март 2013 г. по повышенным величинам En и по пониженным величинам $\Delta\alpha$ более «опасные» районы располагались к северу от п-ова Кроноцкий, включая Камчатский пролив и п-ов Камчатский.

Карты за период времени апрель-июнь 2013 г. (рис. 4) демонстрируют резкую перестройку распределения параметров сейсмического шума на южном участке Камчатской сейсмофокальной

зоны. По понижению величины E_n и по повышению величин $\Delta\alpha$ район сейсмической активизации (группы сейсмических событий I-III, рис. 3) фиксируется как область «пониженной» сейсмической опасности. По-видимому, это свидетельствует об окончании начавшейся в феврале 2013 г. сейсмической активизации на юге Камчатки и о понижении опасности возникновения здесь более сильных землетрясений.

Район эпицентра мантийного землетрясения 24 мая с $M=8.3$ (группа IV, рис. 3) на всех картах E_n и $\Delta\alpha$ выделяется как область «пониженной» сейсмической опасности. Возможно, это указывает на слабую чувствительность низкочастотного сейсмического шума по отношению к процессам подготовки мантийных землетрясений.

Заключение

Представленные результаты анализа поля низкочастотного сейсмического шума на Камчатке за 2011 - июнь 2013 гг. согласуются с выдвинутой ранее гипотезой [6-7, 9] о связи изменения параметров E_n и $\Delta\alpha$ с подготовкой и реализацией сильных землетрясений. На кварталных картах E_n и $\Delta\alpha$ район сейсмической активизации на южном участке Камчатской сейсмофокальной зоны заблаговременно (примерно за 0.5 года) выделялась как умеренно выраженная область повышенной сейсмической опасности. Вместе с тем, для практического использования представленной методики в целях прогноза сильных землетрясений Камчатки необходимо решить ряд технических и методических задач.

Первоочередной задачей является обеспечение непрерывной регистрации сейсмического фона на Камчатке. В настоящее время записи сейсмического фона сильно фрагментированы. Используемый программный аппарат позволяет работать с сильно фрагментированными сейсмическими записями, если длительности фрагментов не менее суток, а перерывы между ними не превосходят 30-40% общей длительности. Однако очевидно, что обеспечение непрерывных данных резко повысит качество и надежность оценок параметров сейсмического шума. Также необходимо увеличение плотности широкополосных сейсмических станций на Камчатке, по крайней мере, в 2 раза. В этом случае мониторинг свойств сейсмического шума позволит с большей уверенностью и определенностью выделять подготовку сейсмических событий с магнитудами порядка 7 и более.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-05-00146.

Список литературы

1. Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // Физика Земли. 2008. № 4. С.17-34.
2. Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // Физика Земли. 2009. № 5. С.15-28.
3. Любушин А.А. Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // Физика Земли. 2010. № 6. С. 86-96.
4. Любушин А.А. Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 6. С.26-34.
5. Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С.9-35.
6. Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. 2012. № 8. С. 23-33.
7. Любушин А.А. Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности // Физика Земли. 2013. № 1. С. 11-20.
8. Любушин А.А. Карты линейной синхронизации свойств глобального поля низкочастотных сейсмических шумов // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 1. С. 41-53.
9. Lyubushin, A. Prognostic properties of low-frequency seismic noise. Natural Science. 2012. № 4. P. 659-666. doi: 10.4236/ns.2012.428087. <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=21656>
10. Lyubushin, A. How soon would the next mega-earthquake occur in Japan?. Natural Science. 2013. № 5. P. 1-7. doi: 10.4236/ns.2013.58A1001. <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=35770>
11. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Сильное землетрясение 28.02.2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки с магнитудой $M_w=6.8$ по данным оперативной обработки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 10-16.
12. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой $M_w=8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 17-24.