

УДК 550.371.2

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

<sup>1</sup>Гриб Н.Н., <sup>1,2</sup>Трофименко С.В., <sup>1</sup>Гриб Г.В., <sup>1,3</sup>Имаев В.С.

<sup>1</sup>Технический институт, филиал ФГАОУ ВПО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова», Нерюнгри, e-mail: grib@nfygu.ru;

<sup>2</sup>Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, e-mail: urovsky@yandex.ru;

<sup>3</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: imaev@crust.irk.ru

Геофизический мониторинг геологической среды – одно из основных направлений геодинамических исследований, который позволяет дистанционно отслеживать процессы в земной коре. Для прогностических целей представляет интерес статистика распределений аномалий электромагнитного излучения (ЭМИ), реализованная на выделенных периодах сейсмического процесса. Данная задача сводится к разделению источников электромагнитного излучения: экзогенной, эндогенной и техногенной природы. Закономерное изменение в статистике распределений аномалий ЭМИ по дням недели может быть следствием наложения двух процессов. Суммарный сигнал содержит эффект от ближних и дальних землетрясений за счет активизации поверхностных структур в зонах динамического влияния активизированных разломов, а также излучение от техногенной сейсмичности, которая приводит к временной поверхностной дезинтеграции блоков и, как следствие, уменьшение ЭМИ.

**Ключевые слова:** мониторинг, геологическая среда, импульсное электромагнитное излучение, сейсмическая активность

## GEOPHYSICAL MONITORING OF THE GEODYNAMIC PROCESSES IN THE EARTH CRUST

<sup>1</sup>Grib N.N., <sup>1,2</sup>Trofimenco S.V., <sup>1</sup>Grib G.V., <sup>1,3</sup>Imaev V.S.

<sup>1</sup>Technical Institute, branch of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Neriungry, e-mail: grib@nfygu.ru;

<sup>2</sup>Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, e-mail: urovsky@yandex.ru;

<sup>3</sup>Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, e-mail: imaev@crust.irk.ru

Geophysical monitoring of the geological environment is one of the main directions in the geodynamic research which makes it possible to follow the processes in the Earth Crust. For prediction purposes it is interesting to know the statistics of the distribution of electromagnetic radiation anomalies which manifests itself in the marked periods of seismic processes. The task is to divide the sources of electromagnetic radiation into exogenous, endogenous and of anthropogenic origin. The law-based change in the distribution statistics of electromagnetic anomalies may be the result of the superposition of two processes. The total signal contains the effect from the close and far away earthquakes due to the wake-up of surface structures in the zones of dynamic influences of activated fissures and also radiation from anthropogenic seismicity which leads to the temporary surface breakup of blocks and, as a consequence, to the decrease of electromagnetic radiation.

**Keywords:** monitoring, geological environment, pulsed electromagnetic radiation, seismic activity

Геофизический мониторинг геологической среды – одно из основных направлений геодинамических исследований, который позволяет дистанционно отслеживать процессы в земной коре. Теоретические разработки, модельные оценки параметров и возможных источников электромагнитных вариаций, лабораторные и полевые эксперименты по изучению сейсмозлектромагнитных явлений позволили установить физическую природу электромагнитного излучения (ЭМИ) горных пород в их естественном залегании в условиях изменяющегося деформационного процесса земных недр [1, 2, 3].

Цель работы: получить некоторую ясность в статистика распределений анома-

лий ЭМИ и связи их с геодинамическими процессами в земной коре.

### Материалы и методы исследования

Для прогностических целей представляет несомненный интерес статистика распределений аномалий ЭМИ, реализованная на выделенных периодах сейсмического процесса. Фактически данная задача сводится к задаче разделения источников электромагнитного излучения экзогенной, эндогенной и техногенной природы.

Предварительная подготовка данных заключалась в том, что в каждой из трех компонент сигнала: «север-юг»  $\epsilon_t^{im(N-S)}$ , «восток-запад»  $\epsilon_t^{im(E-W)}$  и «электрическая»  $\epsilon_t^{im(EL)}$  методом фильтрации выделялись импульсные помехи ( $\epsilon_t^{im}$ ), по критерию превышения среднестатистических значений максимумов суточных аномалий ЭМИ за годичный цикл

измерений ( $\epsilon_t^{crit}$ ). В результате данной процедуры из исходной базы данных формировался файл данных, удовлетворяющий условиям:

$$\epsilon_t^{im(N-S)} > \epsilon_t^{(N-S)crit}, \epsilon_t^{im(E-W)} > \epsilon_t^{(E-W)crit}, \epsilon_t^{im(EL)} > \epsilon_t^{(EL)crit} \quad (1)$$

где  $\epsilon_t^{(N-S)crit}$ ,  $\epsilon_t^{(E-W)crit}$ ,  $\epsilon_t^{(EL)crit}$  среднестатистические значения максимумов суточных аномалий ЭМИ за годичный цикл измерений соответствующих компонент.

Распределения аномалий ЭМИ  $\epsilon_t^{im}$  оценивалось по выборочным данным по двум пунктам регистрации электромагнитных излучений («Нерюнгри» – «Иенгра») на годичных реализациях. Средняя длина массива составила: для часовой статистики – более 100000 значений; для годовой статистики – 5602 значения.

На рис. 1 показаны результаты статистических построений в двух пунктах регистрации электромагнитных излучений («Нерюнгри» – «Иенгра»).

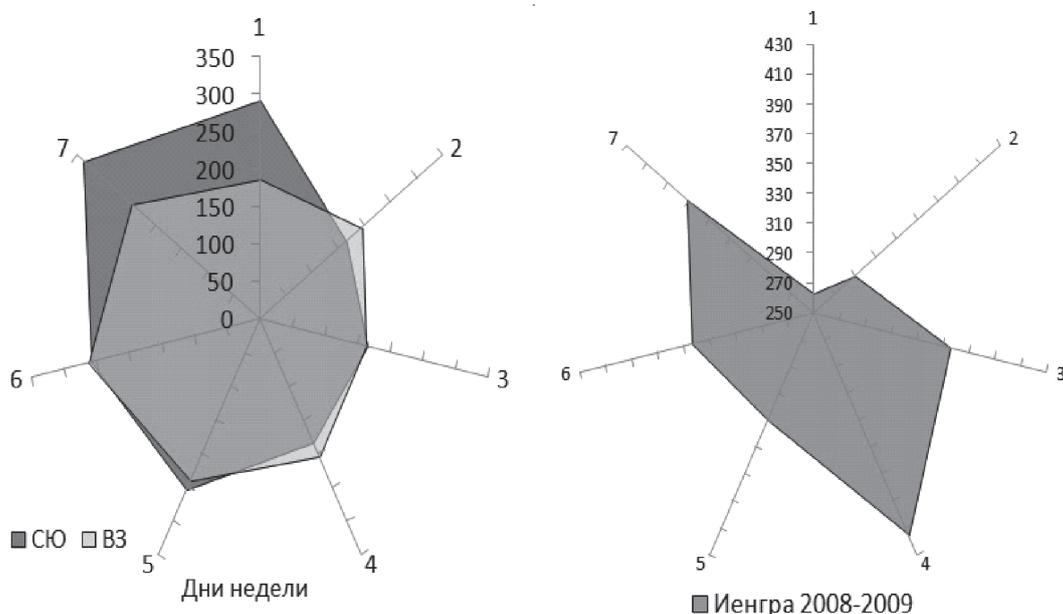


Рис. 1. Изменение частоты появления импульсной составляющей ЭМИ в течение недели в двух пунктах регистрации «Нерюнгри-Иенгра»

Для семидневной статистики для обоих пунктов регистрации «Нерюнгри» и «Иенгра» характерно наличие максимума интенсивности в воскресенье. Причем для пункта «Нерюнгри» данный эффект наблюдается только для «С-Ю» компоненты с двукратным превышением амплитуды. Для пункта «Нерюнгри» изменение частоты появления импульсных ЭМИ представлено выпуклой функцией с минимумом активности от вторника до четверга. В пункте «Иенгра» на среду-четверг приходится максимум активности с наличием линейного тренда. Данные по двум пунктам не коррелированы ( $K_{кор} < 0.2$ ), хотя максимум в воскресенье характерен для обоих пунктов регистрации.

Расположение пунктов регистрации относительно угольного разреза и систем активных разломов показано на рис. 2.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 показана статистика распределения взрывов в Нерюнгринском угольном разрезе, расположенном в 6 – 15 км на СЗ от г. Нерюнгри (рис. 3, а) и землетрясений в радиусе 100 км от карьера (рис. 3, б). Для того чтобы данные по взрывам и землетрясениям случайным образом не перемешивались, к рассмотрению принимались взрывы, для которых разность времен пробега  $t_s - t_p = (1-2)c$ , а для землетрясений  $2c < t_s - t_p < 10c$ .

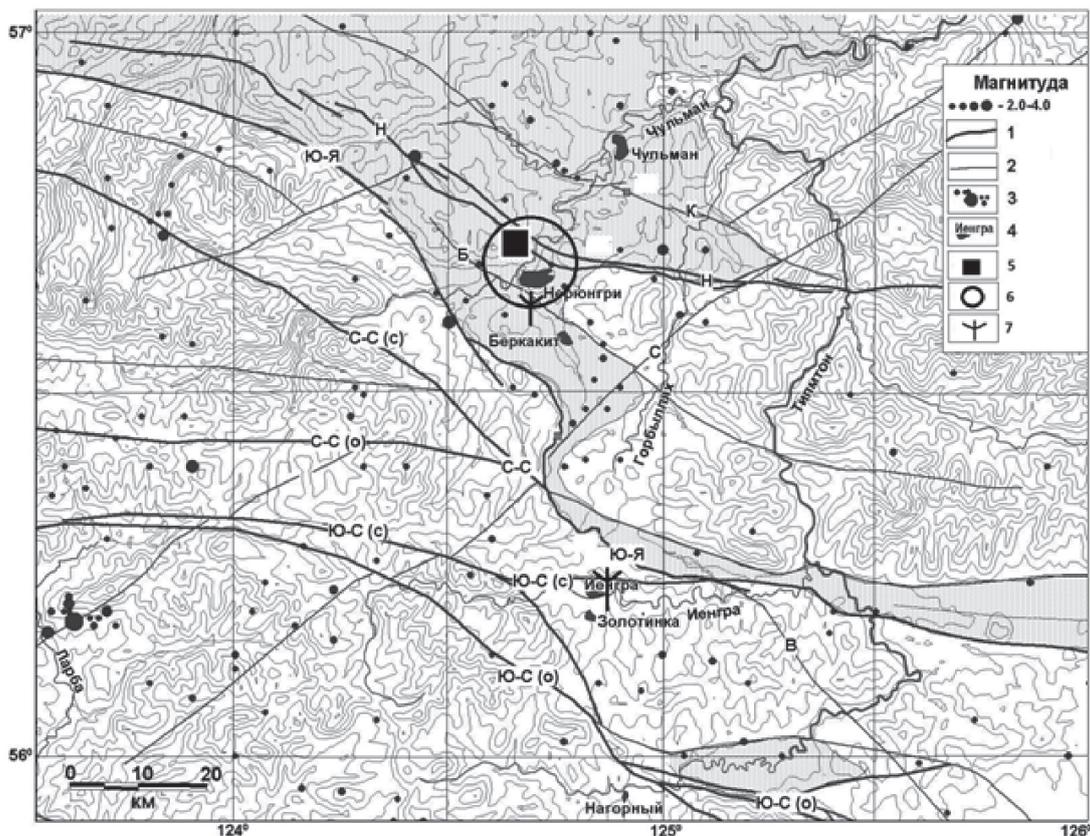


Рис. 2. Расположение пунктов регистрации ЭМИ в системе активных разломов Южной Якутии

1,2-активные разломы: К-Кабактинский; Н-Нижне-Нерюнгринский; Б-Беркакитский; С-Суннагино-Ларбинский; Ю-Я-Южно-Якутский; В-Верхне-Гонамский; С-С (с)-Северо-Становой (северная ветвь); С-С (о)-Северо-Становой (основная ветвь); Ю-С (с)-Южно-Становой (северная ветвь); Ю-С (о)-Южно-Становой (основная ветвь); 3-эпицентры землетрясений по каталогу ГС РАН; 4-населенные пункты; 5 – технологическая площадка Нерюнгринского угольного разреза; 6 – радиус корреляции техногенной и природной сейсмичности; 7 – пункты регистрации ЭМИ

Для сравнения, на рис. 4 представлена статистика распределения землетрясений по данным из каталога ГС РАН за весь период инструментальных наблюдений (рис. 4, а) и по всем землетрясениям, зарегистрированным НСС в период 2006 – 2010 г.г. (рис. 4, б). Коэффициент корреляции для массивов данных «взрывы-все землетрясения» составляет 0.92, что и отражают формы графиков на (рис. 3, а и 4, б). Для графиков

на (рис. 3, б и 4, а) коэффициент корреляции составляет 0.7, а для всех остальных случаев близок к нулю. Таким образом, вблизи карьера динамика сейсмичности в низкоэнергетической области ( $E < 10^7$  Дж) в значительной степени формируется под действием техногенного фактора. Для землетрясений вне радиуса корреляции распределение землетрясений на семидневных реализациях отличается равномерной статистикой с минимумом активности, приходящимся на пятницу (рис. 3, б и 4, а). Для данной статистики характерно наличие локального минимума, приходящегося на пятницу, и линейного отрицательного тренда. Причем, для землетрясений с энергией  $E > 10^8$  Дж (рис. 4, а) угловой коэффициент равен 1.25, а для низкоэнергетических классов  $E < 10^7$  Дж – 1.57. т.е. на максимум высвобождаемой упругой энергии в ближней зоне за счет взрывов и землетрясений (рис. 3, а и 4, б) может быть причиной снижения фоновой сейсмической активности.

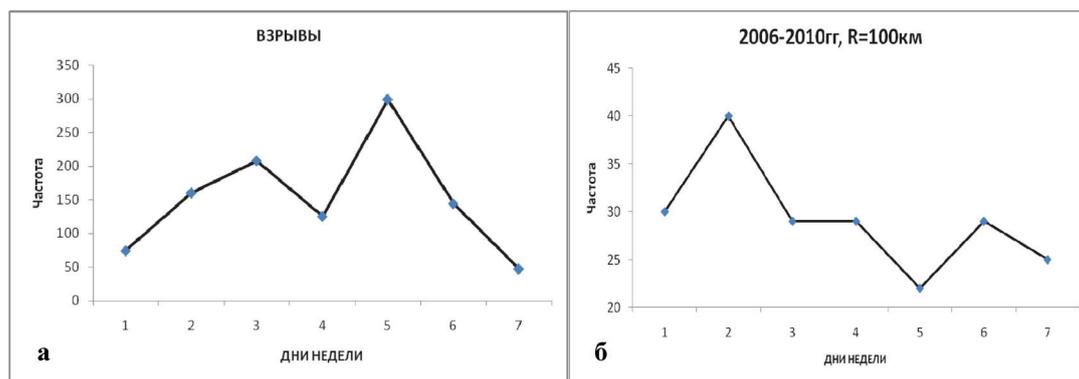


Рис. 3. Распределение взрывов и землетрясений за пределами радиуса корреляции (3-10с) по данным Нерюнгринской сейсмостанции за 2006-2010 гг.

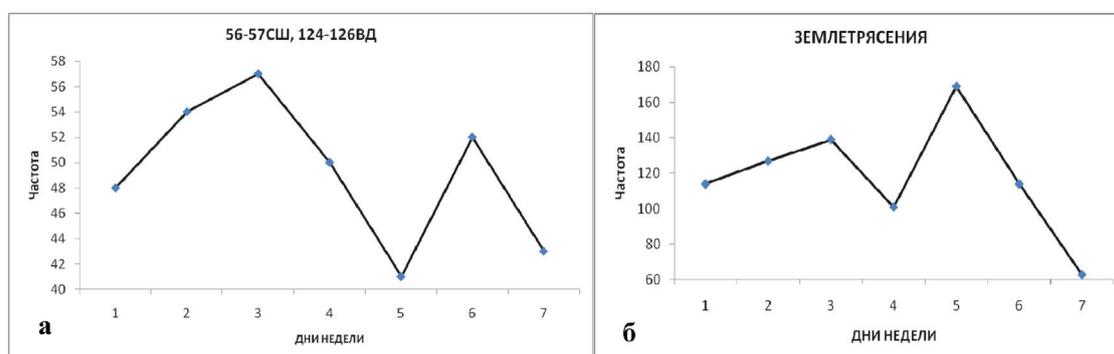


Рис. 4. Распределение землетрясений (345 событий) по данным каталога ГС РАН за 1962-2005 гг. (а) и всех землетрясений в ближней зоне (827 событий в пределах радиуса корреляции) по данным Нерюнгринской сейсмостанции за 2006-2010 гг. (б)

Закономерное изменение в статистике распределений выбросов по дням недели может быть следствием наложения двух процессов.

Во-первых, по аналогии со статистикой распределений слабых землетрясений (рис. 3, б) форма кривых подобна наблюдаемому эффекту «выходных дней» [6, 10], хотя в данном локальном случае наблюдается обратный эффект «выходных дней» т.е. на минимум сейсмической активности приходится максимум импульсных ЭМИ.

С другой стороны, известно, что распределения штормовых микросейсмических шумов и микро-землетрясений коррелируют с лунно-солнечными приливными вариациями силы тяжести. Эта избыточная сейсмическая энергия может трансформироваться в энергию электромагнитного излучения, что и наблюдается в статистике распределений регулярной составляющей  $\epsilon_t^{per}$  импульсных аномалий ЭМИ [4, 8, 9]. В контексте данного предположения аномалии ЭМИ  $\epsilon_t^{per}$  – это аналог штормовых микросейсм.

Дополнительно к изложенным причинам характерного проявления статистики распределений выбросов  $\epsilon_t^{im}$  ЭМИ суммарный сигнал может содержать эффект от ближних и дальних землетрясений за счет активизации поверхностных структур в зонах динамического влияния активизированных разломов при прохождении упругих волн. Согласно принципу суперпозиции электромагнитных волн оба эффекта могут проявляться одновременно, вследствие чего разделение суммарного сигнала в модели (1) весьма проблематично [5].

Однако в данном случае, в стационарной фазе развития сейсмического процесса, следовало бы в предельном случае ожидать равномерное распределение импульсных аномалий для случая активизации субширотных тектонических структур, простирающихся западнее пунктов регистрации.

Например, для представленной статистики распределений «ЭМИ – сейсмичность» характерна в среднем противофазное распределение числа событий на семидневных реализациях. То-есть, уве-

личение числа взрывов и землетрясений в радиусе корреляции приводит к уменьшению числа выбросов (импульсов) ЭМИ  $\epsilon_t^{im}$  в пункте «Нерюнгри», в противоположность с изменением регулярной (периодической) составляющей, где зависимость прямая. Для пункта «Иенгра» уменьшение числа событий в течение недели (рис. 3, б и 4, а) приводит к положительному тренду  $\epsilon_t^{im}$  (рис. 1).

Для сейсмического эффекта «выходных дней» природа явления связана с триггерной сейсмичностью (рис. 3, б и 4, а). Для электромагнитного излучения на данный эффект может накладываться и динамика деятельности промышленных и хозяйственных предприятий и как искажающий фактор может быть отнесен к техногенным эффектам.

В блоковой структуре земной коры [7] динамика  $\epsilon_t^{per}$  изменений контролируется кинематикой взаимодействия блоков и микроблоков и пропорциональна скорости диссипативных процессов энергии упругих деформаций. Причем периодические компоненты аномалий ЭМИ будут проявляться только при наличии подвижных систем активных разломов. При уменьшении сейсмической активности  $\Delta E / \Delta T$  (числа землетрясений за определенный интервал времени) увеличивается относительная деформация, как шовных зон, так и самих блоков. В этом случае, при сохранении постоянства горизонтальной составляющей тензора напряжений возможно образование новых микротрещин или обновление уже имеющихся при достижении предельной деформации разрушения для данного уровня иерархии блоков.

Для пункта «Нерюнгри» увеличение числа взрывов инициирует низкоэнергетическую сейсмичность и приводит к временной поверхностной дезинтеграции блоков. Вследствие этого, уменьшается деформация, снижается кинематика взаимодействия микроблоков и, как следствие, уменьшение числа  $\epsilon_t^{im}$  импульсов в тех же геодинамических условиях, что и находит отражение в динамике сейсмической активности в зоне влияния горных работ разреза Нерюнгринский.

### Выводы

1. Своевременно заметить опасные изменения сейсмического режима, свидетельствующие об усилении сейсмической активности, можно лишь при наблюдении в режиме непрерывного геофизического мониторинга.
2. Использование результатов сейсмологического и геофизического мониторинга позволит существенно повысить надежность прогнозирования опасного нарастания сейсмической активности и своевременно разработать действенные рекомендации по

уменьшению риска возникновения катастрофических техногенных землетрясений.

3. В блоковой модели земной коры прогноз сейсмической активности на основе геофизического мониторинга геологической среды – это прогноз события в заданном интервале времени в пространственных пределах, обусловленных блоковым строением земной коры и с энергией, не превышающей расчетную величину. Например, для электромагнитного мониторинга геологической среды можно записать:

$$F(\Delta T, \Delta L, E \pm \Delta E) \Leftrightarrow f(\epsilon_t^{im}, \epsilon_t^{reg}), \quad (2)$$

где  $f(\epsilon_t^{im}, \epsilon_t^{reg})$  – функция предвестника сейсмической активности ( $\epsilon_t^{im}$  и  $\epsilon_t^{reg}$  импульсная (выбросы) и регулярная составляющие сигнала ЭМИ);  $F(\Delta T, \Delta L, E \pm \Delta E)$  – прогнозная пространственно – временная функция параметров землетрясения. Причем априори функция источника сигнала не известна, т.е. для неё не известен тип модели, определяемой по (2). Поэтому, на современном этапе развития цифровых технологий геофизического мониторинга, одной из важнейших задач становится поиск закономерностей типа (2) и разработка физических моделей на основе геофизического эксперимента.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (ЗАДАНИЕ № 5.1771.2014К).*

### Список литературы

1. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1980. – 211 с.
2. Воробьев А.А. Физические условия залегания вещества в земных недрах. – Томск: Изд-во Томского политех. ин-та, 1971. – Ч. 1. – 270 с.
3. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмозлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1988. – 174 с.
4. Гриб Н.Н., Трофименко С.В., Никитин В.М. Вариации электромагнитного поля как отражение сейсмоструктурных процессов Олекмо-Становой зоны // Известия Томского политехнического университета. Том 314, №1, 2009. «Науки о Земле» – С. 48-53.
5. Гриб Н.Н., С.В. Трофименко, Г.В. Гриб, В.М. Никитин. Статистика сейсмичности и взрывов вблизи угольного разреза // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 134 – 138.
6. Гульельми А.В., Зотов О.Д. О геомагнитном эффекте «мировых дней» // Геомагнетизм и Аэрономия. 1986. Т. 26. № 5. С. 870-872.
7. Садовский М.А., Писаренко В. Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
8. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М. Электромагнитный мониторинг переходной зоны сочленения Алданского щита и Становой складчатой системы // Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 7-11 сентября 2009г., Владивосток.- ТОИ ДВО РАН, 2009.-С.256-259
9. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М., Муллаяров В.А. Результаты наблюдений за вариациями естественного электромагнитного поля Земли в Южной Якутии // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: Материалы IV международной конференции 14-17 августа 2007 г., с. Паратунка, Камчатской обл. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИКИР ДВО РАН, 2007. – С. 453-458.
10. Gutenberg B. Bull. Seismol. Soc. Am. 1945. N 35. P. 3-12.