

## ВНЕЗАПНЫЕ НАЧАЛА МАГНИТНЫХ БУРЬ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

### STORM SUDDEN COMMENCEMENTS AND EARTHQUAKES

**А.В. Гульельми**

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, guglielmi@mail.ru*

**И.П. Лавров**

*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН,  
Ярославская обл., Борок, Россия, lavrvania@mail.ru*

**А.Л. Собисевич**

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия, alex@ifz.ru*

**A.V. Guglielmi**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,  
Moscow, Russia, guglielmi@mail.ru*

**I.P. Lavrov**

*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS,  
Yaroslavl Region, Borok, Russia, lavrvania@mail.ru*

**A.L. Sobisevich**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia,  
alex@ifz.ru*

**Аннотация.** Статистически исследован вопрос о возможном воздействии внезапных начал геомагнитных бурь (SSC) на глобальную сейсмическую активность. Моменты SSC используются в качестве реперов для сравнительного анализа сейсмичности методом наложенных эпох. Для исследования отобрано 405 землетрясений за 1973–2010 гг. с магнитудами  $M \geq 5$  из представительной части каталога USGS. Проведен сравнительный анализ сейсмичности на интервалах  $\pm 60$  мин относительно репера. С высокой степенью достоверности установлено, что до репера количество землетрясений заметно больше, чем после него. Другими словами, SSC подавляет глобальную сейсмичность. Указаны работы, в которых обсуждаются химический, тепловой и силовой механизмы воздействия электромагнитного поля на горные породы. Подчеркнута незавершенность исследования связи SSC с землетрясениями, поскольку пока что не удалось понять и осмыслить эту связь на физико-математическом уровне. Сделан вывод о необходимости продолжения исследования в надежде найти ключ к решению интересной и важной проблемы.

**Ключевые слова:** геомагнетизм, сейсмичность, сейсмоэлектродинамика, солнечно-земные связи.

**Abstract.** We have investigated statistically the problem of possible impact of the geomagnetic storm sudden commencement (SSC) on the global seismic activity. SSC are used as reference points for comparative analysis of seismicity by the method of superposed epoch. We selected 405 earthquakes from 1973 to 2010 with  $M \geq 5$  magnitudes from a representative part of USGS Catalog. The comparative analysis of seismicity was carried out at the intervals of  $\pm 60$  min relative to the reference point. With a high degree of reliability, it was found that before the reference point the number of earthquakes is noticeably greater than after it. In other words, the global seismicity is suppressed by SSC. We refer to some studies in which the chemical, thermal and force mechanisms of the electromagnetic field action on rocks are discussed. We emphasize the incompleteness of the study concerning the correlation between SSC and earthquakes because we still do not succeed in understanding and interpreting the relationship in terms of physics and mathematics. The study need to be continued to solve this problem of interest and importance.

**Keywords:** geomagnetism, seismicity, seismoelectrodynamics, solar-terrestrial relations.

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее известным и, пожалуй, наиболее ярким примером спорадического воздействия Солнца на Землю является геомагнитная буря, которая развивается в магнитосфере вскоре после солнечной вспышки. Буря начинается с резкого сжатия магнитосферы фронтом межпланетной ударной волны. Магнитный импульс, регистрируемый при этом наземными и орбитальными обсерваториями, называется внезапным началом бури (SSC, storm sudden commencement) [Araki, 1994]. Импульсы SSC играют особую роль при исследовании солнечно-земных связей. В момент SSC в околоземном пространстве формируется специфическая комбинация параметров, которую теоретик использует как начальное условие при решении дифференциальных уравнений, моделирующих МГД-колебания магнитосферы. Для экспериментатора особый интерес пред-

ставляет тот факт, что SSC можно использовать при статистическом исследовании широкого круга геофизических явлений как надежный репер, четко разделяющий спокойное и возмущенное состояния магнитосферы.

В физике солнечно-земных связей есть ряд необычных проблем, к которым следует отнести возможное воздействие SSC на сейсмическую активность. Необычность состоит в том, что, с одной стороны, априори не существует простых физико-математических представлений о механизмах такого воздействия. С другой стороны, наблюдения свидетельствуют о вероятной модификации региональной [Соболев и др., 2001; Закржевская, Соболев, 2003, 2004] и локальной [Адушкин и др., 2012] сейсмичности после SSC.

Трудность интерпретации наблюдений указывает на необходимость дополнительного эксперимен-

тального исследования, чему и посвящена данная работа. Ее отличительной особенностью является то, что мы сосредоточили внимание на глобальной сейсмичности. Это позволило статистически надежно обнаружить еще одно эмпирическое подтверждение связи между SSC и землетрясениями.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТ АНАЛИЗА

Данные по SSC с 1973 по 2010 г. взяты из каталога [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\_DATA/SUDDEN\_COMMENCEMENTS/], о землетрясениях — из каталога Национального информационного центра о землетрясениях геологической службы США [USGS/NEIC, http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic\_global.html]. За указанный период зарегистрировано 1113 SSC. Времена их появления использовались в качестве реперов для проведения статистического анализа землетрясений методом наложенных эпох.

Был поставлен следующий вопрос: различается ли глобальная сейсмичность в двух смежных часовых интервалах: до SSC и после. Для поиска ответа была проведена предварительная селекция землетрясений, которая состояла в отборе только тех событий, которые произошли на интервалах  $\pm 60$  мин относительно репера. Выбор длительности определяется тем, что, с одной стороны, интервалы должны быть по возможности большими, чтобы иметь достаточное количество землетрясений для статистического анализа. С другой стороны, при изучении сейсмомагнитного эффекта SSC было бы нежелательно включать в анализ интервалы времени, захватывающие главную фазу геомагнитной бури или хотя бы часть главной фазы. Таким образом, выбор интервалов  $\pm 60$  мин является своего рода компромиссом.

Было накоплено 3352 события с магнитудами  $M \geq 1$ . Из этого многообразия для дальнейшего анализа была выбрана так называемая представительная часть (о важности использовать представительную выборку при статистическом исследовании землетрясений см. в работе [Смирнов, 1997]). На рис. 1 показано распределение землетрясений по магнитуде, причем прямая линия  $\lg N = 6.4 - 0.92M$  аппроксимирует представительную часть каталога, которая соответствует магнитудам  $M \geq 5$  и содержит 405 событий. Здесь  $N$  — число землетрясений с данным значением  $M$ . Коэффициент корреляции между  $N$  и  $M$  равен  $-0.93$  в представительной части.

На рис. 2 показано распределение землетрясений из представительной части каталога на интервалах времени  $\pm 60$  мин относительно репера. Видно, что до репера количество землетрясений заметно больше, чем после него. Точный подсчет дает 230 событий до репера и 173 события после него. Сформулируем нулевую гипотезу, которая соответствует представлению об отсутствии связи между землетрясениями и SSC: вероятности отдельному событию попасть в интервал  $-60 \div 0$  мин или  $0 \div 60$  мин одинаковы и равны 0.5. В действительности указанные вероятности равны 0.571 и 0.429 соответственно.

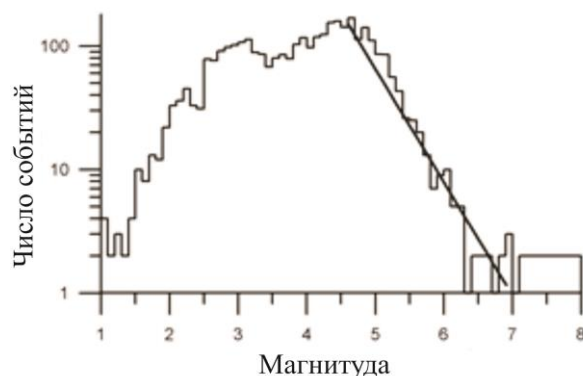


Рис. 1. Распределение землетрясений по магнитудам. Прямая линия аппроксимирует представительную часть каталога USGS

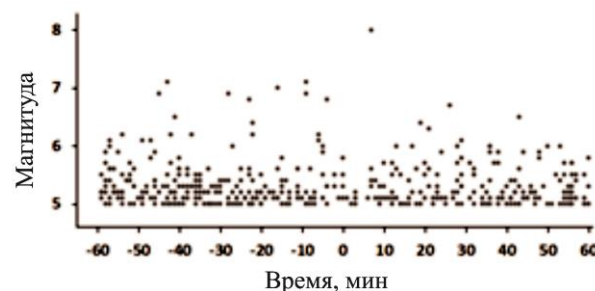


Рис. 2. Землетрясения с магнитудами  $M \geq 5$  на интервалах времени  $\pm 60$  мин относительно моментов SSC

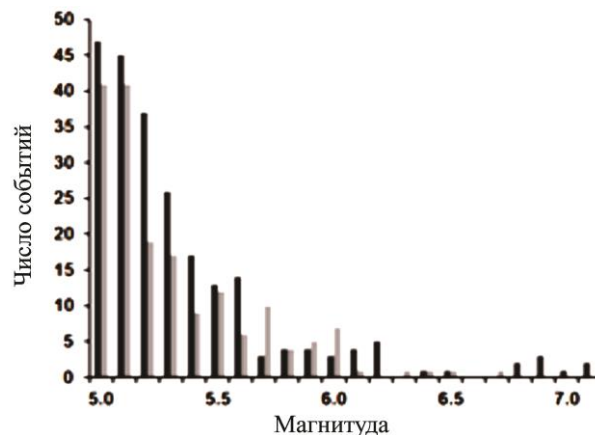


Рис. 3. Распределения землетрясений по магнитудам до SSC (черные столбики) и после (серые столбики)

Простой подсчет по схеме Бернулли свидетельствует, что различие эмпирических вероятностей существенно в том смысле, что нулевую гипотезу следует отвергнуть, причем вероятность ошибиться не превышает 0.01. Это означает, что SSC некоторым образом подавляет сейсмичность.

Данное заключение не вполне согласуется с результатом работ [Соболев и др., 2001; Закржевская, Соболев, 2003, 2004], в которых установлено, что сейсмичность может как подавляться, так и стимулироваться геомагнитными бурями с SSC. Вполне возможно, что указанное несоответствие связано с различиями в методиках отбора и обработки материала наблюдений. Особо важным нам представляется тот факт, что мы отбирали лишь весьма короткие интервалы времени относительно SSC.

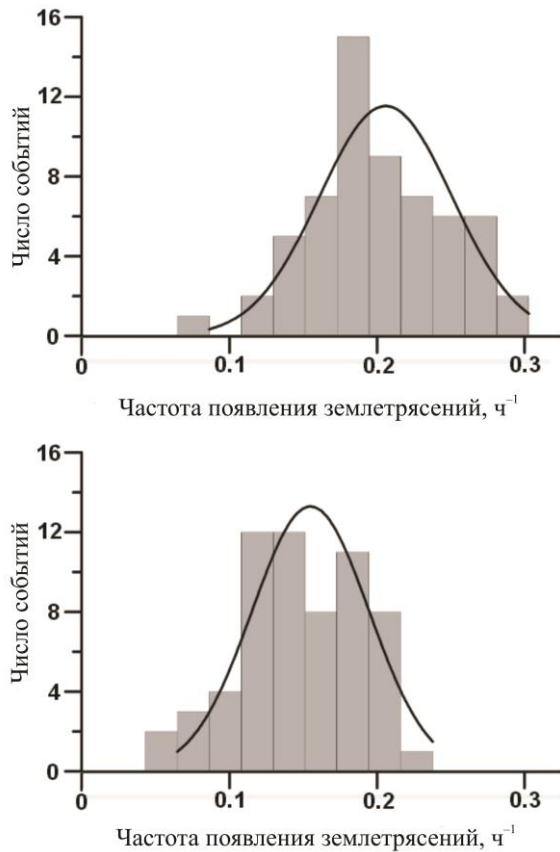


Рис. 4. Распределение землетрясений по частоте появления в часовых интервалах до SSC (вверху) и после (внизу). Гладкие кривые — нормальные распределения, аппроксимирующие эмпирические

Интересно сопоставить распределения землетрясений по магнитудам до SSC и после (рис. 3). Видно, что в большинстве интервалов  $M$  сейсмическая активность до SSC выше, чем после него. Применение критерия хи-квадрат свидетельствует о достоверном различии указанных распределений на уровне значимости 0.05.

Наконец, мы сопоставили распределения землетрясений по частоте появления до SSC и после. Построение эмпирических распределений производилось следующим образом. После накопления событий по методу наложенных эпох проводилось сглаживание скользящим средним с окном 5 мин и шагом 1 мин. При подсчете частоты появления землетрясений учитывалось, что общее количество SSC, используемых в качестве реперов, равно 1113 (см. раздел 1). Результат показан на рис. 4. Видно, что средние частоты появления землетрясений до SSC и после равны  $0.206 \text{ ч}^{-1}$  и  $0.154 \text{ ч}^{-1}$  соответственно. Доверительные интервалы для средних значений равны соответственно  $0.011 \text{ ч}^{-1}$  и  $0.009 \text{ ч}^{-1}$  на 95%-м уровне достоверности. Различия между средними значениями на  $5\sigma$  выглядят вполне убедительно. Таким образом, обнаружено некоторое понижение глобальной сейсмичности после SSC.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ

Воздействие электромагнитного поля на горные породы может быть силовым, тепловым или хими-

ческим. Идея химического воздействия высказывалась в связи с экспериментами по закачке в земную кору мощных импульсов тока от МГД-генератора (см., например, обзор [Бучаченко, 2014]). В нашем случае действие химического механизма можно представить себе следующим образом. Токи Фуко, индуцированные переменным магнитным полем, модифицируют гетерогенную среду в результате электрохимических реакций на межфазных границах. Это возможно, однако сомнительно, что локальные электрохимические превращения в горных породах под действием SSC могут повлиять на сейсмичность. Во всяком случае довольно трудно оценить продуктивность данной идеи без дополнительного исследования. Такое же сомнение возникает и в отношении теплового механизма. Можно корректно рассчитать нагрев горных пород индукционными токами Фуко, как это сделано, например, в работе [Файнберг и др., 2004], но не вполне ясно, каким образом такой нагрев влияет на вероятность возникновения землетрясения. Не намного лучше обстоит дело и с вопросом о силовом воздействии SSC на земную кору, но в этом случае можно поставить задачу, интересную, по крайней мере, с методической точки зрения [Гульельми, 1992]. Речь идет о пондеромоторном взаимодействии между корой и ядром Земли. Кратко изложим эту постановку.

Пондеромоторная сила, действующая на единичный объем горной породы, равна

$$\mathbf{F} = \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}$  — постоянное геомагнитное поле, источники которого сосредоточены в земном ядре,  $\mathbf{j}$  — плотность токов Фуко, индуцированных в земной коре магнитным импульсом SSC,  $c$  — скорость света. Магнитное поле внешних источников SSC почти однородно по периметру Земли. Можно считать, что оно перпендикулярно плоскости геомагнитного экватора и направлено с юга на север. Поле проникает в земную кору на глубину скин-слоя

$$\delta \sim c \sqrt{\tau / \sigma}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — характерное время нарастания переднего фронта SSC,  $\sigma$  — электропроводность горных пород. В тонком слое толщиной  $\delta$  и сосредоточены токи  $\mathbf{j}$ . Пользуясь правилом Ленца, нетрудно определить, что токи текут по азимуту с востока на запад. Тогда из формулы (1) следует, что пондеромоторные силы аксиально-симметричны. На геомагнитном экваторе силы направлены радиально к центру Земли, а на средних широтах в обоих полушариях силы имеют касательные составляющие, направленные к экватору.

Очевидно, что спорадическое взаимодействие такого рода между корой и ядром происходит не только при SSC, но и при других глобальных возмущениях геомагнитного поля. В настоящее время не ясно, насколько эффективными окажутся деформации земной коры при таком взаимодействии. Определение деформаций требует решения довольно сложной задачи теории упругости при заданном рас-

пределении пондеромоторных сил, приложенных к сферическому слою толщиной  $\delta$ . Следует заметить, что сама идея магнитного взаимодействия между корой и ядром Земли еще не объясняет, как можно интерпретировать связь землетрясений с SSC.

Теперь кратко обсудим тенденции экспериментального исследования сейсмоэлектромагнитных связей. Прежде всего выделим работы по искусственной модификации региональной сейсмичности путем закачки в земную кору импульсов тока от МГД-генератора [Тарасов, 1997; Тарасов и др., 1999, 2001; Авагимов и др. 2005; Бучаченко, 2014]. Публикации по исследованию геоэлектромагнитных предвестников землетрясений разделим на две категории. К первой отнесем статьи, посвященные анализу предвестников отдельных событий, например Суматра-Андаманского землетрясения или землетрясения Тохоку [Fraser-Smith et al., 1990; Bernardi et al., 1991; Гуфельд и др., 1992; Hayakawa et al., 1996, 2000; Merzer, Klempereger, 1997; Собисевич, Собисевич, 2010; Собисевич и др., 2010; Schekotov et al., 2012]. Вторая категория включает статьи, посвященные статистическому исследованию корреляционных связей между локальной, региональной или глобальной сейсмичностью и геоэлектромагнитными возмущениями [Husamidin, 2000; Закржевская, Соболев, 2002; Duma, Ruzhin, 2003; Balasis et al., 2011; Адушкин и др., 2012; Гульельми, Зотов, 2012; Зотов и др., 2013]. Следует подчеркнуть, что приведенные здесь ссылки не исчерпывают списка публикаций.

Из многообразия магнитных предвестников, исследованных в работах каждой категории, удобно выделить два класса предвестников: внутренние и внешние. Они характеризуются тем, что источники магнитных сигналов, предшествующих землетрясениям, располагаются соответственно в земной коре и во внешних геосферах (ионосфере и магнитосфере). Внутренние предвестники исследовались, например, в работах [Fraser-Smith et al., 1990; Гульельми, Зотов, 2012], а внешние — в работах [Закржевская, Соболев, 2002; Duma, Ruzhin, 2003]. К особому классу целесообразно отнести смешанные предвестники. В этом случае первичные источники магнитного поля никак не связаны с землетрясениями. Они располагаются в ионосфере и магнитосфере. Предвестник формируется вторичными (индуцированными) источниками в земной коре за счет пространственно-временной вариации электропроводности горных пород в процессе подготовки землетрясения. Интересный пример этого описан в работе [Schekotov et al., 2012]. Более подробное обсуждение систематики сейсмомагнитных связей выходит за рамки настоящего исследования (см., например, [Зотов и др., 2013]).

Следует отметить широкий спектр мнений по вопросу взаимосвязи электромагнитных и сейсмических явлений. Изредка появляются полемические статьи с резкой критикой результатов исследования по данной тематике (см., например, [Masci, 2011]). В большинстве же статей приводятся факты в пользу идеи реальности указанной связи. Далеко не полный список публикаций такого рода можно найти в обзорах [Hayakawa, 2001; Nattori, 2004; Гульельми, 2007].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы попытались поддержать интерес геофизического сообщества к обсуждавшейся уже не раз задаче, представив еще одно эмпирическое подтверждение связи между землетрясениями и SSC. Выбор именно этой частной задачи был мотивирован главным образом простотой ее формулировки. Удалось обнаружить понижение глобальной сейсмичности после SSC.

Мы не склонны преувеличивать познавательную ценность установленной связи между SSC и землетрясениями. В самом деле, описание любой эмпирической связи является лишь необходимым шагом к пониманию, т. е., в конечном счете, к построению физико-математической модели природного явления. Но теоретической интерпретации связи SSC с землетрясениями пока что найти не удалось. Мы считаем такое положение довольно критическим, поэтому необходимо продолжение исследований в надежде отыскать ключ к решению интересной и важной проблемы.

Авторы выражают благодарность Л.Е. Собисевичу за интерес к работе и стимулирующие обсуждения, а также составителям каталога SSC и каталога землетрясений USGS. Работа выполнена при финансовой поддержке по Программе № 4 фундаментальных исследований Президиума РАН и РФФИ (проекты № 13-05-00066, 15-05-00491).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // *Физика Земли*. 2005. № 6. С. 55–65.
- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. Отклик сейсмического фона на геомагнитные вариации // *ДАН*. 2012. Т. 444, № 3. С. 304–308.
- Бучаченко А.И. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // *УФН*. 2014. Т. 184, № 1. С. 101–108.
- Гульельми А.В. Пондеромоторные силы в коре и в магнитосфере Земли // *Физика Земли*. 1992. № 7. С. 35–39.
- Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // *УФН*. 2007. Т. 177, № 12. С. 1257–1276.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // *Физика Земли*. 2012. № 2. С. 84–87.
- Гуфельд И.Л., Рожной А.А., Тюменцев С.И. Возмущения радиоволновых полей перед Рудбарским и Рачинским землетрясениями // *Там же*. 1992. № 1. С. 102–107.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // *Там же*. 2002. № 4. С. 3–15.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 3. С. 63–75.
- Зотов О.Д., Гульельми А.В., Собисевич А.Л. О магнитных предвестниках землетрясений // *Физика Земли*. 2013. № 6. С. 139–147.
- Смирнов В.Б. Опыт оценки представительности данных каталогов землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 4. С. 93–105.
- Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений // *ДАН*. 2010. Т. 435, № 4. С. 548–553.

Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Дилатантные структуры и электромагнитные возмущения УНЧ-диапазона на этапах подготовки и развития крупного сейсмического события // Вестник ОНЗ РАН. 2010. Т. 2. NZ6027. С. 202–213. DOI: 10.2205/2010NZ000045.

Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С. 62–72.

Тарасов Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // ДАН. 1997. Т. 353, № 4. С. 542–545.

Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 152–160.

Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 10. С. 1641–1649.

Файнберг Э.Б., Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Васильева Т.А. Генерация тепловых потоков в недрах Земли мировыми геомагнитными бурями // Физика Земли. 2004. № 4. С. 54–62.

Araki T. A physical model of the geomagnetic sudden commencement // *Geophysical Monograph*. 1994. V. 81. P. 183–200.

Balasis G., Daglis I.A., Anastasiadis A., et al. Universality in solar flare, magnetic storm and earthquake dynamics using Tsallis statistical mechanics // *Physica*. V. A390. P. 341–346.

Bernardi A., Fraser-Smith A.C., McGill P.R., Villard O.G. ULF magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1991. V. 68. P. 45–63.

Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq variation // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2003. V. 3, N 3/4. P. 171–177.

Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., et al. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. P. 1465–1468.

Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes // *TAO*. 2004. V. 15, N 3. P. 329–360.

Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review // *Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan*. 2001. V. 121-A. P. 893–898.

Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O.A., Yumoto K. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993 // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 241–244. DOI: 10/1029/95GL02863.

Hayakawa M., Itoh T., Hattori K., Yumoto K. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia, on 17 February 1996 // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 1531–1534. DOI: 10/1029/1999GL005432.

Husamiddinov S.S. Seismoelectromagnetic and seismoionospheric effects preceding strong earthquakes in Uzbekistan // *J. Earthquake Prediction Res.* 2000. V. 8, N 3. P. 367–375.

Masci F. On the recent reaffirmation of ULF magnetic earthquakes precursors // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 2193–2198. DOI: 10.5194/nhess-11-2193-2011.

Schekotov A.Yu., Fedorov E.N., Hobara Y., Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012. V. 71. Iss. 18. P. 1707–1718. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i18.70.

[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUDDEN\\_COMMENCEMENTS/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUDDEN_COMMENCEMENTS/).

USGS/NEIC, [http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic\\_global.html](http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html).

## REFERENCES

Adushkin V.V., Ryabova S.A., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Response of the seismic background to geomagnetic varia-

tions. *DAN [Doklady Earth Sciences]*. 2012, vol. 444, no. 1, pp. 642–646 (in Russian). DOI: 10.1134/S1028334X12050157.

Araki T. A physical model of the geomagnetic sudden commencement. *Geophysical Monograph*. 1994, vol. 81, pp. 183–200.

Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Fainberg E.B. Electromagnetically induced spatial-temporal structure of seismicity. *Fizika Zemli [Izvestiya. Physics of the Solid Earth]*. 2005, vol. 41, no. 6, pp. 475–484 (in Russian).

Balasis G., Daglis I.A., Anastasiadis A., et al. Universality in solar flare, magnetic storm and earthquake dynamics using Tsallis statistical mechanics. *Physica A*. 2011, vol. 390, pp. 341–346.

Bernardi A., Fraser-Smith A.C., McGill P.R., Villard O.G. ULF magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1991, vol. 68, pp. 45–63.

Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *UFN [Physics-Uspekhii]*. 2014, vol. 57, no. 1, pp. 92–98 (in Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0184.201401e.0101.

Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq variation. *Haz. Earth Syst. Sci.* 2003, vol. 3, no. 3/4, pp. 171–177.

Fainberg E.B., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Vasil'eva T.A. Generation of heat flows in the Earth's interior by global geomagnetic storms. *Fizika Zemli [Physics of the Solid Earth]*. 2004, vol. 40, no. 4, pp. 315–322 (in Russian).

Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., et al. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 1990, vol. 17, pp. 1465–1468.

Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Tyumensev S.N. Radiowave field disturbances before Rudbar and Rachin earthquakes. *Fizika Zemli [Physics of the Solid Earth]*. 1992, no. 1, pp. 102–107 (in Russian).

Guglielmi A.V. Ponderomotive forces in the crust and magnetosphere of the Earth. *Fizika Zemli [Physics of the Solid Earth]*. 1992, no. 7, pp. 35–39 (in Russian).

Guglielmi A.V. Ultralow-frequency electromagnetic waves in the crust and magnetosphere of the Earth. *UFN [Physics-Uspekhii]*. 2007, vol. 50, no. 12, pp. 1197–1216 (in Russian). DOI: 10.1070/PU2007v050n12ABEH006413.

Guglielmi A.V., Zotov O.D. On magnetic disturbances before strong earthquakes. *Fizika Zemli [Physics of the Solid Earth]*. 2012, vol. 48, no. 2, pp. 171–173 (in Russian).

Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes. *TAO*. 2004, vol. 15, no. 3, pp. 329–360.

Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O.A., Yumoto K. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993. *Geophys. Res. Lett.* 1996, vol. 23, pp. 241–244. DOI: 10/1029/95GL02863.

Hayakawa M., Itoh T., Hattori K., Yumoto K. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia, on 17 February 1996. *Geophys. Res. Lett.* 2000, vol. 27, pp. 1531–1534. DOI: 10/1029/1999GL005432.

Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review. *Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan*. 2001, vol. 121-A, pp. 893–898.

Husamiddinov S.S. Seismoelectromagnetic and seismoionospheric effects preceding strong earthquakes in Uzbekistan. *J. Earthquake Prediction Res.* 2000, vol. 8, no. 3, pp. 367–375.

Masci F. On the recent reaffirmation of ULF magnetic earthquakes precursors. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, vol. 11, pp. 2193–2198. DOI: 10.5194/nhess-11-2193-2011.

Schekotov A.Yu., Fedorov E.N., Hobara Y., Hayakawa M. ULF magnetic field depression as a possible precursor to the 2011/3.11 Japan earthquake. *Telecommunications and Radio*

*Engineering*. 2012, vol. 71, iss. 18, pp. 1707–1718. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i18.70.

Smirnov V.B. Earthquake catalogs: Experience in evaluating data representativity. *Vulkanologiya i seismologiya* [Volcanology and Seismology]. 1998, vol. 19, no. 4, pp. 497–510 (in Russian).

Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh., Sobisevich A.L. Observations of ULF geomagnetic disturbances reproduced processes of preparation and development of tsunamigenic earthquakes. *DAN* [Doklady Earth Sciences]. 2010, vol. 435, no. 2, pp. 1627–1632 (in Russian). DOI: 10.1134/S1028334 X10120160.

Sobisevich L.E., Sobisevich A.L. Dilatation structures and ULF electromagnetic disturbances during the preparation and development of a strong seismic event. *Vestnik ONZ RAN* [Bull. of the Department of the Earth's Sciences RAS]. 2010, vol. 2, NZ6027, pp. 202–213 (in Russian). DOI: 10.2205/2010NZ000045.

Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A., Kharin E.P. On the relation between seismicity and magnetic storms. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. 2001, vol. 37, no. 11, pp. 917–927 (in Russian).

Tarasov N.T. Crustal seismicity variation under electric action. *DAN* [Doklady Earth Sciences]. 1997, vol. 353A, no. 3, pp. 445–448 (in Russian).

Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. The effect of high energy electromagnetic pulses on seismicity in Central Asia and Kazakhstan. *Vulkanologiya i seismologiya* [Volcanology and Seismology]. 2000, vol. 21, no. 4/5, pp. 627–639 (in Russian).

Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. The effect of electromagnetic impacts on seismicity of Bishkek geodynamic test area. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. 2001, vol. 42, no. 10, pp. 1558–1566 (in Russian).

Zakrzhevskaya N.A., Sobolev G.A. On possible effect of magnetic storms on seismicity. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. 2002, vol. 38, no. 4, pp. 249–261 (in Russian).

Zakrzhevskaya N.A., Sobolev G.A. The effect of magnetic storms with a sudden start on seismicity in different regions. *Vulkanologiya i seismologiya* [Volcanology and Seismology]. 2004, no. 3, pp. 63–75 (in Russian).

Zotov O.D., Guglielmi A.V., Sobisevich A.L. On magnetic precursors of earthquakes. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth]. 2013, vol. 49, no. 6, pp. 882–889 (in Russian).

[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUDDEN\\_COMMENCEMENTS/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUDDEN_COMMENCEMENTS/).

USGS/NEIC, [http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic\\_global.html](http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html).