

УДК 550.344

ПОИСК ИМПУЛЬСНЫХ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2023 г. В.А. Мартинес-Беденко¹, В.А. Пилипенко^{1,2}, К. Шиокава³,
В.А. Касимова⁴

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

³ Институт исследований околоземного пространства, Нагойский Университет, г. Нагоя, Япония

⁴ Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Автор для переписки: В.А. Пилипенко (e-mail: pilipenko_va@mail.ru)

В литературе появились многочисленные публикации, описывающие новый сейсмо-электромагнитный эффект – возникновение магнитных импульсов длительностью 1–40 с, которые обнаруживаются за первые минуты до землетрясений даже небольшой интенсивности на удалениях до 10 тыс. км. Было сделано предположение об универсальности процессов генерации импульсных предвестников и принципиальной возможности краткосрочного (за несколько минут) предупреждения о приближающемся землетрясении. В представленной статье исследована возможность появления ультранизкочастотных импульсов, предвещающих сейсмические события с магнитудами $M \geq 5.0$, по данным сети индукционных магнитометров на Дальнем Востоке. На записях этих высокочувствительных магнитометров постоянно встречаются импульсные возмущения, некоторые из которых наблюдаются синхронно на нескольких станциях, что исключает влияние локальных помех. Спектральный максимум порядка 7–8 Гц осцилляторной структуры, проявляющейся во многих импульсах, соответствует фундаментальной частоте Шумановского резонатора. Сопоставление магнитных наблюдений с данными сети регистрации молний *WWLLN* (*World Wide Lightning Location Network*) показало, что часть импульсов вызвана грозовыми разрядами в 650-километровой окрестности магнитной станции. Несмотря на то, что некоторые из импульсов наблюдаются непосредственно перед землетрясениями, говорить об их связи с сейсмической активностью с уверенностью нельзя. Подсчёт числа импульсов в пятиминутном интервале до и после сейсмического толчка показывает, что они распределены относительно момента землетрясения случайным образом. Видимо, импульсы преимущественно обусловлены ионосферным откликом на дальний грозовой разряд.

Ключевые слова: землетрясения, электромагнитные сигналы, предвестники землетрясений, грозы, магнитные импульсы, Шумановский резонатор.

Введение

Решение задач, связанных с поиском и распознаванием электромагнитных предвестников землетрясений, остаётся одним из основных направлений геофизики. Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал [Park et al., 1993; Hattori, 2004] указывает на перспективность исследований таких явлений в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне (0.01–10 Гц).

Возникновение аномальных электромагнитных ультранизкочастотных шумов обнаружено вблизи эпицентра за часы и дни до момента землетрясения [Molchanov et al., 1992; Hayakawa et al., 2009, 2013; Hayakawa, Molchanov, 2002]. Помимо этого, за одну–две недели до землетрясений в разных регионах была выявлена характерная закономерность – депрессия в ночные часы электромагнитных шумов в диапазоне от 0.01 до

0.1 Гц и возрастание мощности излучений в полосе частот 1–30 Гц [Schekotov et al., 2006]. На основании этих наблюдений предложена достаточно успешная модель прогноза землетрясений [Schekotov et al., 2020].

Аномальные УНЧ возмущения во время активизации сейсмической активности зачастую имели импульсный характер [Малышков, Джумабаев, 1987; Wright, 2021]. Так, индукционными магнитометрами сети *Quake Finder* в Калифорнии зарегистрированы короткие (1–30 с) импульсные сигналы с амплитудами 3–20 нТл за 13 дней до землетрясения 30.10.2007 с магнитудой $M=5.4$ на расстоянии 2 км от эпицентра [Bleier et al., 2009]. По оценкам, приведённым в работе [Bortnik et al., 2010], магнитное возмущение на частоте 1 Гц в данном событии может возбуждаться сейсмотеллурическим током в очаге с интенсивностью 10–100 кА. Также отмечалось, что плотность во времени магнитных импульсов в полосе 3–5 Гц в ночные часы возрасла за несколько дней до землетрясений на Камчатке в марте–мае 2016 [Schekotov et al., 2020].

И все же, ситуация с УНЧ электромагнитными предвестниками остаётся неоднозначной. Разные проявления электромагнитных эффектов в разрозненных наблюдениях, слабая повторяемость результатов и отсутствие обоснованного механизма генерации вызывают у некоторых исследователей сомнения в достоверности связи обнаруживаемых явлений с землетрясениями [Thomas, Love, Johnston, 2009; Masci, Thomas, 2015; Костерин, Пилипенко, Дмитриев, 2015]. Поэтому НАСА в 2015 г. даже был объявлен открытый конкурс с призом в 25 тыс. долларов на возможные алгоритмы идентификации электромагнитных сигналов перед землетрясениями.

В большой серии работ [Довбня и др., 2006; Довбня, Зотов, Щенетнов, 2008; Довбня, Пашинин, Рахматулин, 2019; Довбня, 2011, 2014, 2021] сообщалось о выявлении специфических импульсных сигналов за несколько минут перед землетрясениями на двух далеко разнесённых магнитных обсерваториях (на удалениях от эпицентра до 10 тыс. км). Эти широкополосные УНЧ импульсы по виду динамического спектра отличались от известных типов импульсных геомагнитных пульсаций (типа *Pi1B*). Данный результат может быть поистине крупным и неожиданным открытием в геофизике и заслуживает серьёзной проверки и обсуждения.

В настоящей работе исследована возможность появления УНЧ электромагнитных импульсов, предвещающих сейсмические события. Для проверки гипотезы о появлении импульсного магнитного предвестника были использованы данные сети современных индукционных магнитометров на Дальнем Востоке.

Исходные данные и методы анализа

Исходным материалом для анализа служили данные регистрации УНЧ вариаций электромагнитного поля на сети станций проекта *PWING (Study of Dynamical Variation of Particles and Waves in the Inner Magnetosphere Using Ground-Based Network Observations)*, развёрнутой в качестве наземной поддержки спутникового проекта *ERG* [Shiokawa et al., 2017]. Географические координаты станций приведены в табл. 1. Указанные станции оборудованы индукционными трёхкомпонентными магнитометрами с частотой регистрации 64 Гц.

В ходе исследования рассматривались только горизонтальные компоненты: в направлении север–юг (X) и восток–запад (Y). Вертикальная компонента (Z) данных магнитометров зашумлена, и поэтому не анализировалась. Амплитудно-частотная характеристика установки линейно растёт с частотой до плавного плато на частотах 1.5–5.0 Гц, а затем спадает из-за настройки фильтров усилителя. На центральной станции *MSR* чувствительность почти на порядок выше, чем на остальных станциях сети.

Таблица 1. Сведения о сети индукционных магнитометров проекта *PWING*

Станция	Код	Координаты		Начало работы
		φ, °с.ш.	λ, °в.д.	
<i>Magadan</i>	<i>MGD</i>	60.05	150.73	ноябрь 2008
<i>Paratunka</i>	<i>PTK</i>	52.97	158.25	август 2007
<i>Moshiri</i>	<i>MSR</i>	44.37	142.27	июль 2007
<i>Sata</i>	<i>STA</i>	31.02	130.68	сентябрь 2007
<i>Gakona</i>	<i>GAK</i>	62.39	214.78	март 2017
<i>Zhigansk</i>	<i>ZGN</i>	66.78	123.37	август 2009

Примечание. Расстояния между станциями: *STA–MSR*=1805 км, *MSR–PTK*=1514 км, *PTK–MGD*=915 км.

Магнитосферные колебания и шумы в наибольшей степени проявляются в *X*-компоненте, поэтому в дальнейшем для характерных событий приводится только менее зашумлённая *Y*-компонента.

Магнитограммы сопоставлялись в 10-минутном интервале до и после моментов землетрясений из каталога *ISC (International Seismological Centre)*. Выбирались землетрясения с магнитудами, превышающими пороговое значение $M=5.0$, в покрываемом сетью магнитометров регионе ($25\text{--}70^\circ$ с.ш., $110\text{--}220^\circ$ в.д.). За период 2016–2019 гг. таких событий оказалось 221, среди них и землетрясение с магнитудой $M=7.2$, произошедшее на Камчатке 30.01.2016 г. Размер анализируемой области и распределение сейсмичности в ней можно видеть на рис. 1, где показано положение станций и эпицентры землетрясений с $M>6.0$ за анализируемый период.

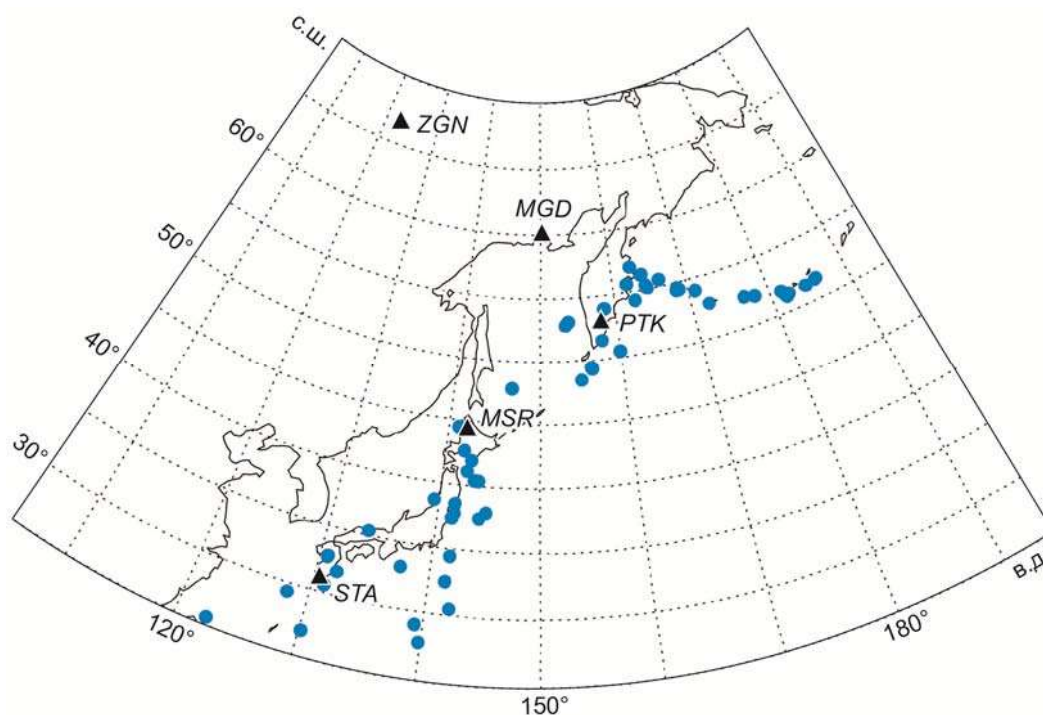


Рис. 1. Карта сейсмичности исследуемого региона. Треугольники – положение станций сети *PWING*; синие точки – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ за 2016–2019 гг.

Fig. 1. The seismicity map of the region under study. Triangles – position of *PWING* network stations; blue dots – the epicenters of earthquakes with $M \geq 6.0$ during 2016–2019

Для информации о грозовой активности в изучаемом регионе были использованы данные мировой системы регистрации молний *WWLLN*¹ (*World Wide Lightning Location Network*) за 2016 г. Эта система контролирует грозовые разряды в планетарном масштабе с помощью ультранизкочастотных (1–24 кГц) антенн на 28 станциях. Данная методика обеспечивает регистрацию молний с временной погрешностью менее 30 мкс и с ошибкой определения места разряда не более 15 км. Система фиксирует не более 5–10 % от полного числа молний, но около 90 % грозовых центров, в зависимости от плотности регистрирующих станций в изучаемом регионе. Расстояние до молнии для каждой станции рассчитывалось по формуле для определения расстояния между двумя географическими точками на глобусе и если оно оказывалось больше порогового ($R_0=650$ км), то такая молния игнорировалась. Величина R_0 была выбрана эмпирическим путём – достаточно большой, чтобы учесть все сильные разряды, но не слишком большой, чтобы избежать случайных совпадений с многочисленными очень дальними разрядами.

Результаты наблюдений

Ниже приведены примеры характерных типов импульсных возмущений геомагнитного поля, зарегистрированных в 10-минутном временном интервале до и после момента сейсмического толчка.

Отклик магнитометра на сейсмическую волну. Характерное транзитное возмущение на станции *PTK* после землетрясения 20.03.2016 г. с $M=6.4$ и глубиной очага $H=47$ км показано на рис. 2. Эпицентр землетрясения находится на расстоянии 330 км от станции *PTK*. На более удалённых станциях *MGD* ($R=977$ км) и *MSR* ($R=1844$ км) этот транзит уже не просматривается. Предположительно, данное возмущение вызвано индукционным или электрокинетическим эффектом осцилляций проводящей земной поверхности в поле сейсмической волны. Ни в этом, ни в других аналогичных событиях магнитный импульс, предвещающий приход фронта сейсмической волны в точку наблюдения не был отмечен. Физическая подоплёка этого наблюдения обсуждается далее.

Синхронные магнитные импульсы на нескольких станциях перед землетрясением. Индукционный магнитометр – высокочувствительный прибор, фиксирующий малейшие быстрые вариации геомагнитного поля. Из-за высокой чувствительности запись такого магнитометра содержит немало помех, в том числе и импульсных. Данные индукционных магнитометров в 30-минутной временной окрестности землетрясения 14.04.2016 г. ($M=6.0$, $H=10.2$ км), произошедшего в 15:03:47 UT, представлены на рис. 3. Сопоставление магнитограмм разных станций показывает, что помимо локальных импульсных помех, наблюдаются импульсы, которые одновременно регистрируются на нескольких станциях. Эти импульсы, очевидно, не связаны с локальными помехами, а являются откликом на некоторое глобальное природное возмущение.

Рассмотрим в увеличенном масштабе волновую форму импульсов. В качестве примера на рис. 4 приведены волновые формы синхронных импульсов, зарегистрированных в 15-секундном временном интервале на станциях *PTK* и *MGD* 14.04.2016 г. Импульсы в данном событии практически синхронны на станциях, разнесённых более чем на 900 км. Рассмотренный импульс сопровождается резко затухающим осцилляционным хвостом. Спектральный анализ выделяет максимум в диапазоне 7–8 Гц, соответствующий фундаментальной частоте Шумановского резонанса.

¹ <http://wwlln.net> (дата обращения: 01.04.2022)

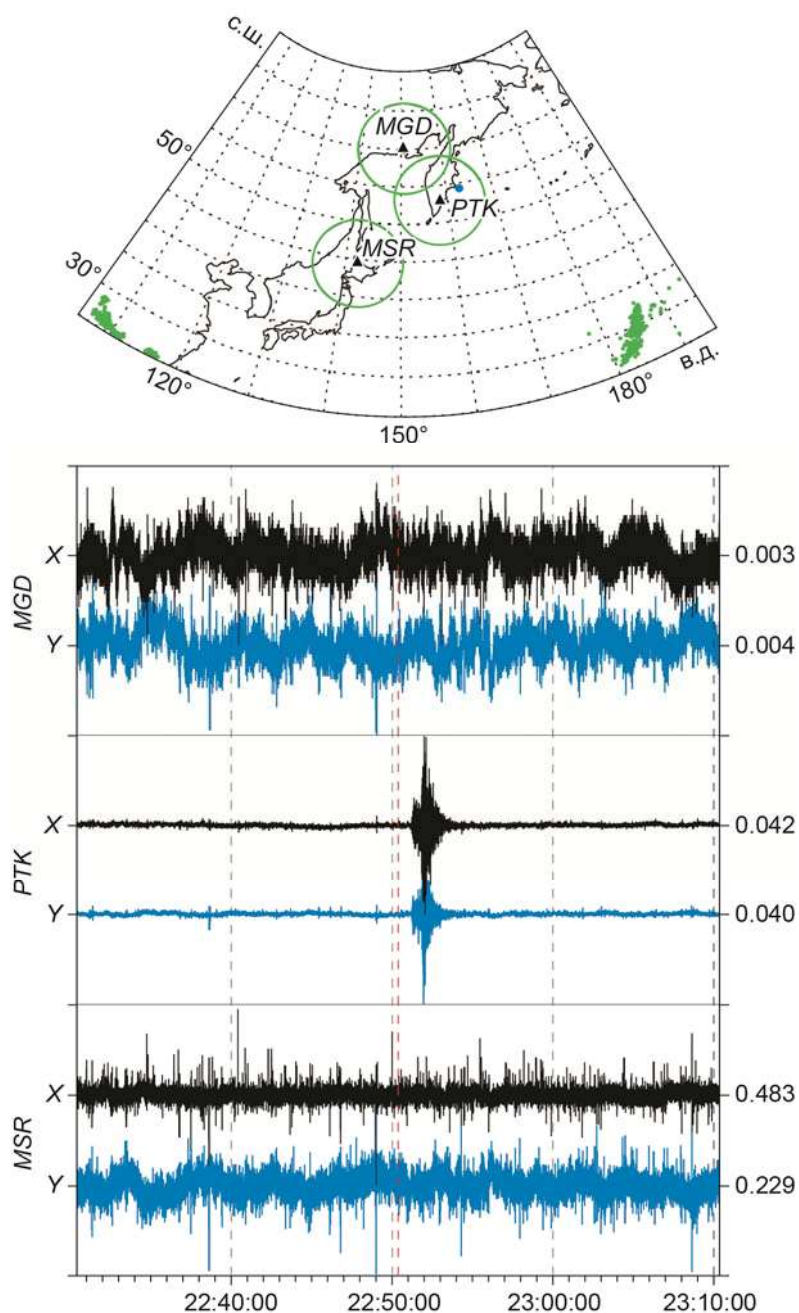


Рис. 2. Землетрясение 20.03.2016 г. ($M=6.4$, $H=47$ км), произошедшее в 22:50:22 UT

Вверху: расположение станций *MGD*, *PTK*, *MSR* (треугольники) и эпицентра землетрясения (синяя точка); зелёные точки – места грозовых разрядов; зелёная окружность – 650-километровая окрестность станций. *Внизу:* магнитограммы компонент *X* (черные графики) и *Y* (синие), полученные на указанных станциях. Красная штриховая линия – момент землетрясения; здесь и далее вертикальные серые пунктирные линии – временные метки, цифры справа – размах колебаний, усл. ед.

Fig. 2. Earthquake on March 20, 2016 ($M=6.4$, $H=47$ km), which occurred at 22:50:22 UT

Above: location of *MGD*, *RTK*, *MSR* stations (triangles) and earthquake epicenter (blue dot); green dots – places of lightning discharges; the green circle – the 650-kilometer vicinity of the stations. *Below:* magnetograms of the *X* (black plots) and *Y* (blue) components obtained at the indicated stations. The red dashed line – the moment of the earthquake; hereinafter, the vertical gray dotted lines – time marks, the numbers on the right – the range of oscillations, arb. units

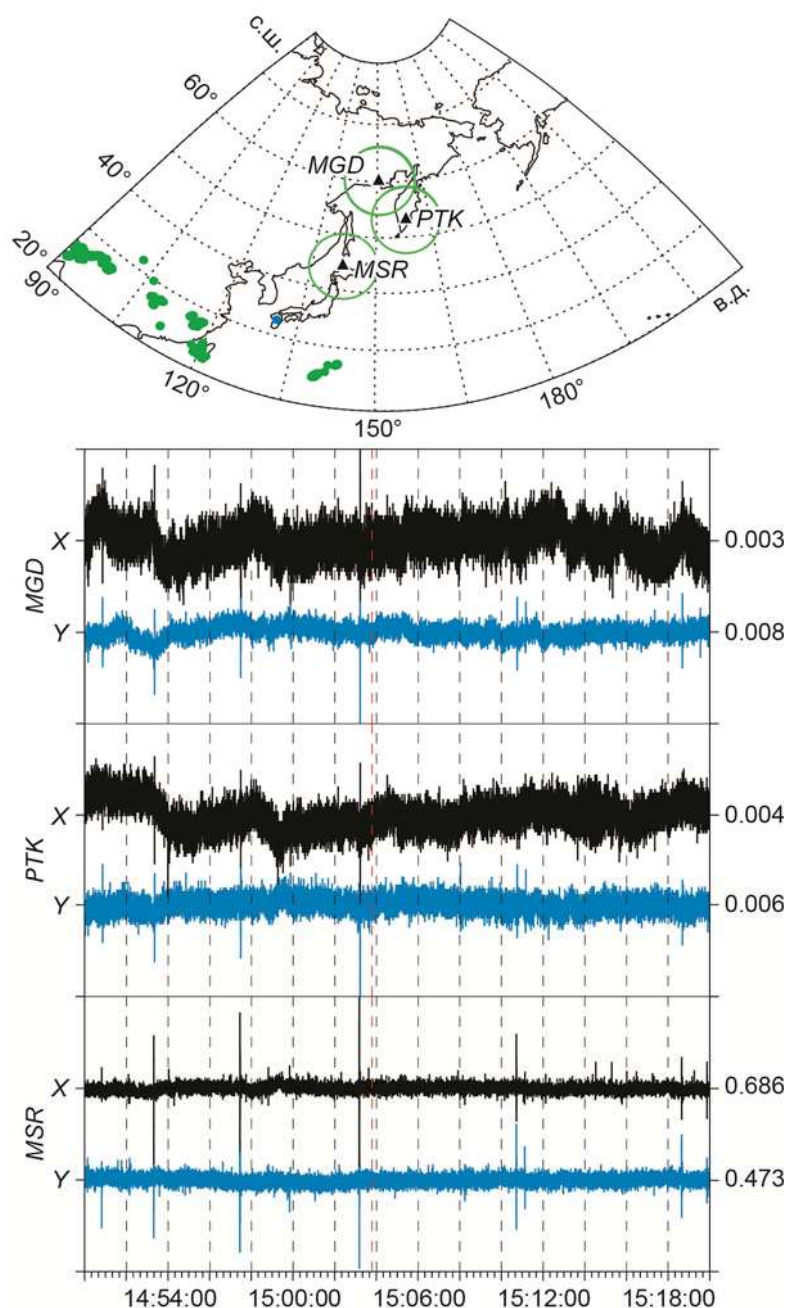


Рис. 3. Землетрясение 14.04.2016 г. ($M=6.0$, $H=10.2$ км), произошедшее в 15:03:47 UT. *Вверху:* расположение станций и эпицентра землетрясения. *Внизу:* импульсная структура геомагнитного поля по данным индукционных магнитометров *MGD*, *PTK*, *MSR* во временной окрестности землетрясения 14:50:00–15:20:00 UT. Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 3. The earthquake on April 14, 2016 ($M=6.0$, $H=10.2$ km) occurred at 15:03:47 UT. *Above:* location of stations and earthquake epicenter. *Below:* the impulse structure of the geomagnetic field according to the data of the induction magnetometers *MGD*, *PTK*, *MSR* in the time vicinity of the earthquake at 14:50:00–15:20:00 UT. Symbols see in Fig. 2

Аналогичный пример практически идентичного импульсного возмущения, зарегистрированного синхронно (с временной погрешностью не более 0.02 с) на станциях *MGD* и *PTK* 15.04.2016 г. в 16:15:31 UT, показан на рис. 5. Характерная длительность импульсов соответствует частотному составу около 8 Гц.

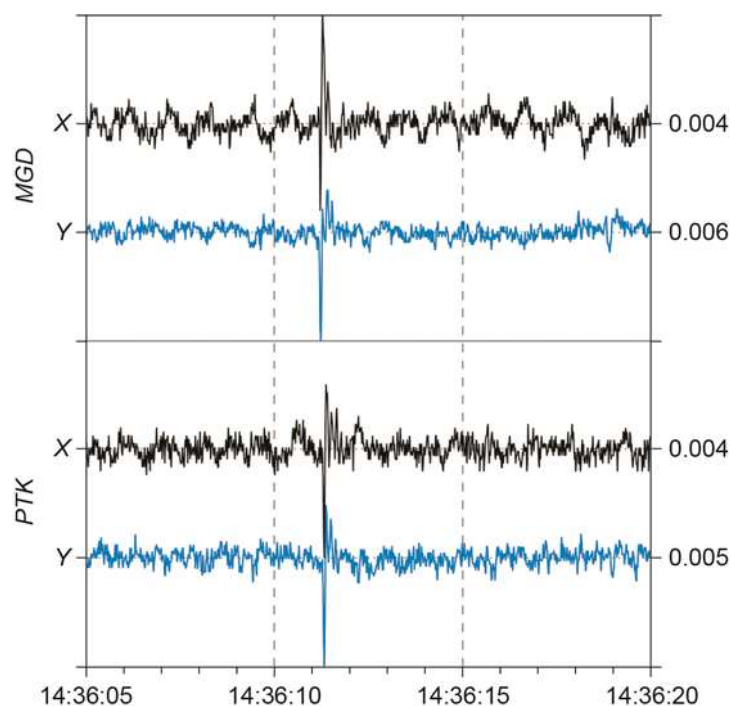


Рис. 4. Волновые формы синхронных импульсов (X - и Y -компоненты), зарегистрированных на станциях PTK и MGD 14.04.2016 г. в интервале 14:36:05–14:36:20 UT

Fig. 4. Wave forms of synchronous pulses (X and Y components) recorded at PTK and MGD stations on April 14, 2016 in the time interval 14:36:05–14:36:20 UT

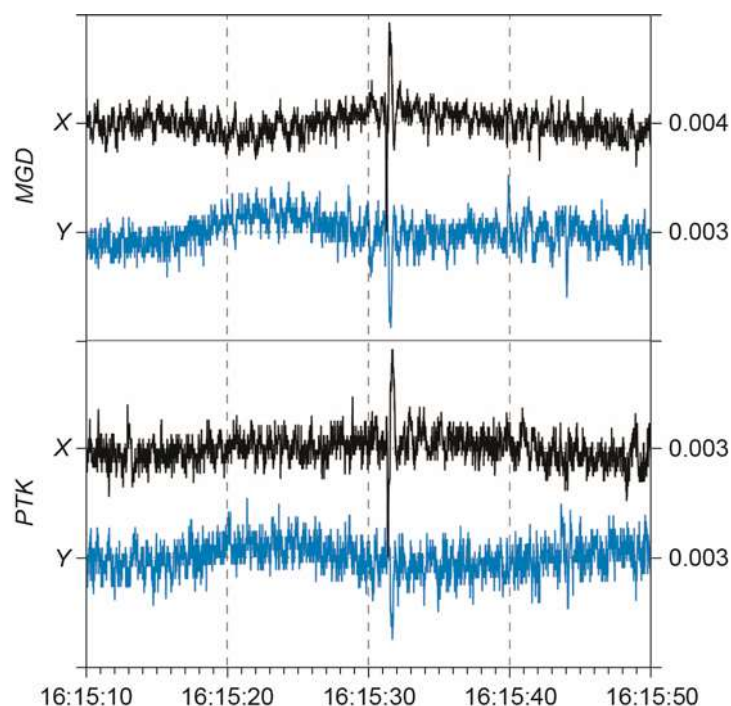


Рис. 5. Пример импульсного возмущения (X - и Y -компоненты), зарегистрированного на станциях PTK и MGD 15.04.2016 г. в интервале 16:15:10–16:15:50 UT

Fig. 5. Example of the impulsive disturbance (X and Y components) recorded at PTK and MGD stations on April 15, 2016 in the time interval 16:15:10–16:15:50 UT

Вероятно, импульсы, подобные приведённым на рис. 4–5, являются откликом Шумановского резонанса на дальние грозовые разряды. Это предположение было проверено для того ограниченного периода, за который имелись данные системы регистрации молний *WWLLN*.

Магнитные импульсы и молнии. За имеющийся период данных системы *WWLLN* было найдено немало примеров, когда импульсы совпадали с грозовыми разрядами.

Пример сопоставления магнитных импульсов на станциях *PTK* и *STA* с грозовыми разрядами в радиусе 650 км от этих станций 14.08.2016 г. приведён на рис. 6 (моменты разрядов отмечены вертикальными зелеными линиями). Хотя эти импульсы зарегистрированы за несколько минут до землетрясения 14.08.2016 г. ($M=5.8$, $H=13.3$ км), произошедшего в 11:15:14 UT, большая их часть, очевидно, вызвана грозовыми разрядами, а не литосферным процессом.

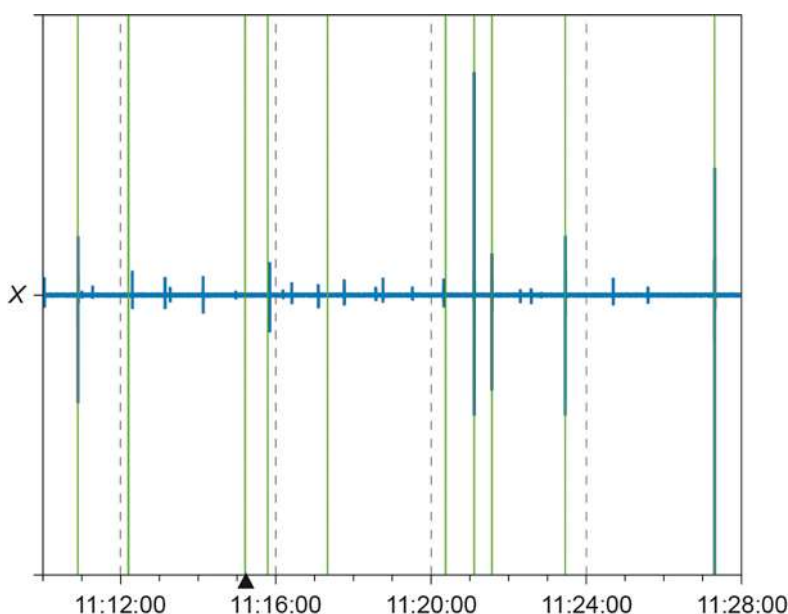


Рис. 6. Импульсная структура геомагнитного поля по данным индукционного магнитометра *STA* (синяя линия) и моменты грозовых разрядов в 650-километровой окрестности станции (зелёные линии), зарегистрированные 14.08.2016 г. в интервале 11:11:00–11:28:00 UT. Момент землетрясения помечен чёрным треугольником

Fig. 6. The impulse structure of the geomagnetic field according to the data of the induction magnetometer *STA* (blue line) and the moments of lightning discharges in the 650 km vicinity of the station (green lines) recorded on August 14, 2016 in the time interval 11:10:00–11:28:00 UT. The moment of the earthquake is marked with a black triangle

Другой пример одноминутного интервала магнитограмм, полученных 20.08.2016 на станциях *STA* и *PTK*, с наложенными моментами грозовых разрядов, показан на рис. 7. На этом рисунке также видно, что появление импульсов группируется к моментам молний.

Таким образом, вообще говоря, магнитные импульсы в 10-минутной временной окрестности момента сейсмического толчка наблюдаются как до, так и после него. Однако по крайней мере часть их, безусловно, связана с региональными молниевыми разрядами. Но можно ли их считать оперативными предвестниками катастрофического разрушения земной коры? На этот вопрос можно ответить на основании статистики импульсов до и после землетрясения.

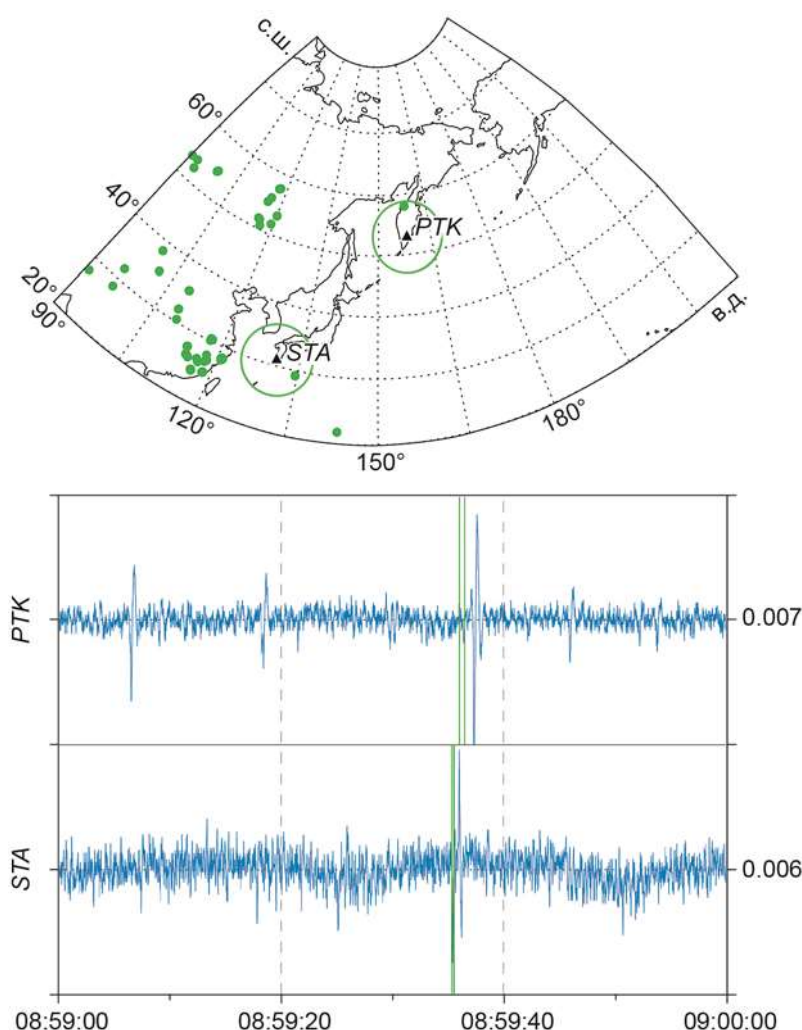


Рис. 7. Вверху: положение выбранных станций сети *PWING* и центров грозовых разрядов по данным *WWLLN*. Внизу: сопоставление магнитных импульсов (*Y*-компонент), зарегистрированных 20.08.2016 г. в интервале 08:59:00–09:00:00 UT в 650-километровой окрестности станций *PTK*, *STA*, с грозовыми разрядами (вертикальные зелёные линии). Остальные условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 7. Above: position of selected *PWING* network stations and lightning discharge centers according to *WWLLN* data. Below: comparison of magnetic pulses (*Y*-component) recorded on August 20, 2016 in the interval of 08:59:00–09:00:00 UT in a 650-km vicinity of *PTK*, *STA* stations with lightning discharges (vertical green lines). See other symbols in Fig. 2

Статистика магнитных импульсов вблизи момента землетрясения

Для автоматической регистрации импульсов был применён алгоритм *STA–LTA* (*Short Term Average–Long Term Average*) [Kappler, 2012]. Этот алгоритм рассчитывает отношение среднеквадратичного значения временного ряда в коротком окне (длиной n) к среднеквадратичному значению в длинном окне (с длиной $N \gg n$) и тем самым находит кратковременные вариации во временном ряде, которые резко отклоняются от его поведения в среднем.

$$S_i = \frac{STA_i}{LTA_i}, \quad STA_i = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^{k=i+n} x_k^2, \quad LTA_i = \frac{1}{N} \sum_{k=i-N}^i x_k^2.$$

Импульсы считаются обнаруженными, когда решающая функция $S(t)$ превышает заданный порог S_0 . Пример работы алгоритма демонстрируют фрагмент магнитной записи с импульсной составляющей на станции *MSR* (рис. 8, *вверху*) и значения безразмерной функции $S(t)$, превышающие порог $S_0=3.0$ (рис. 8, *внизу*). Видно хорошее соответствие между импульсами и результатом их автоматического детектирования.

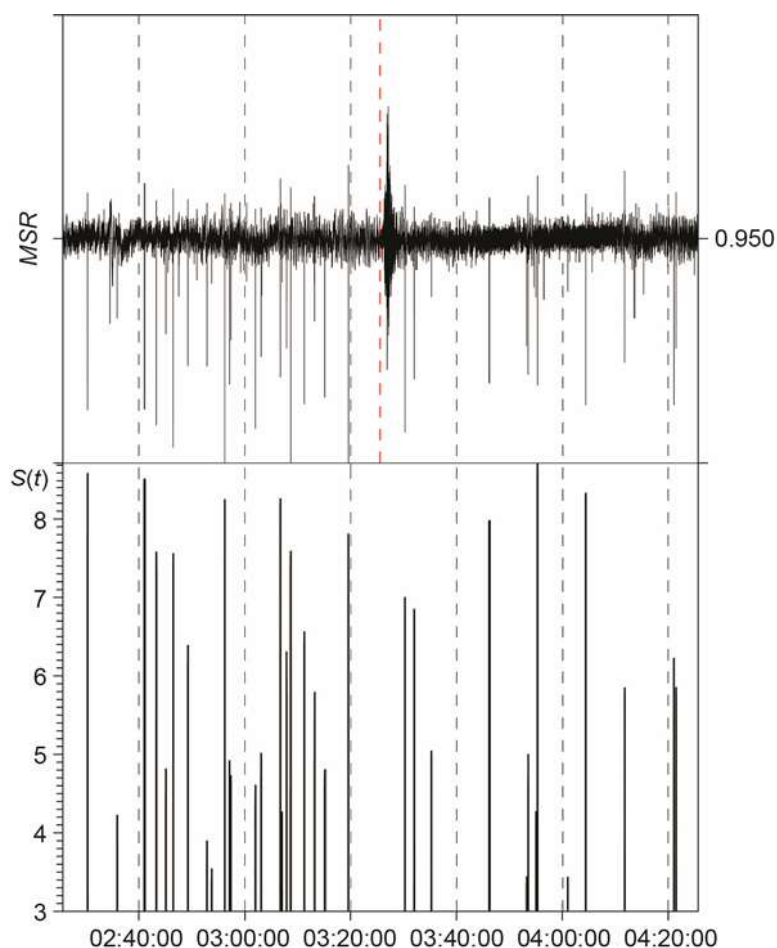


Рис. 8. Пример работы алгоритма *STA–LTA* для автоматической регистрации импульсов во временной окрестности землетрясения 14.01.2016 г. в 03:25:33 UT с $M=6.7$ и $H=54.9$ км (момент толчка показан красной штриховой линией). *Вверху*: исходный временной ряд (магнитограмма Y -компоненты на станции *MSR*) для интервала 02:30:00–04:20:00 UT; *внизу*: значения решающей функции $S(t)$, превышающие пороговое значение $S_0=3.0$

Fig. 8. An example of the operation of the *STA–LTA* algorithm for automatic registration of impulses in the time neighborhood of the earthquake on January 14, 2016 at 03:25:33 UT with $M=6.7$ and $H=54.9$ km (the moment of the shock is shown by the red dashed line). *Above*: initial time series (Y -component magnetogram at the *MSR* station) for the interval 02:30:00–04:20:00 UT; *below*: values of the decision function $S(t)$, exceeding the threshold value $S_0=3.0$

Этот алгоритм был применён к реальным данным для всех событий с $M>6.0$ за 2016–2019 гг. Программа автоматически определяла количество импульсов для каждой станции в заданном временном интервале – 5 мин до и после момента землетрясения. Результаты, собранные в табл. 2, показывают, что в сейсмически активном регионе (Камчатка–Япония) число импульсов до землетрясения в среднем за год может быть как больше, так и меньше, чем после землетрясения.

Таблица 2. Число магнитных импульсов в пятиминутном интервале до и после близких землетрясений ($R < 650$ км) на станциях Дальнего Востока

Год	Число землетрясений с $M > 5.0$	Число импульсов до/после землетрясения		
		<i>MSR</i>	<i>PTK</i>	<i>STA</i>
2016	12	0/2	5/4	42/51
2017	2	0/0	0/2	2/2
2018	5	3/5	0/12	2/20
2019	3	6/33	0/0	0/6

Судя по всему, импульсы распределены относительно момента землетрясения случайным образом. Всего по данным, суммированным в табл. 2, было отобрано 22 землетрясения с $M > 5.0$, при этом зарегистрировано до землетрясения 60 импульсов и 137 – после. Таким образом, говорить об этих импульсах как о “предвестниковом” явлении не приходится.

Обсуждение

Согласно существующим представлениям, в течение нескольких минут во временной окрестности сейсмического толчка может происходить удивительно большое число электромагнитных явлений. Распространяющаяся от гипоцентра землетрясения сейсмическая волна возбуждает транзиентный всплеск электромагнитного поля, благодаря индукционному или электрокинетическому эффектам [Surkov, Pilipenko, Sinha, 2018]. Этот всплеск отчётливо виден на рис. 2. За несколько секунд до прихода сейсмической волны в точку регистрации может начать нарастать её электромагнитный “предвестник”, возбуждаемый токами на фронте волны [Surkov, Pilipenko, 1997]. Такой предварительный рост магнитного возмущения непосредственно перед фронтом сейсмической волны наблюдался в работе [Iyemori et al., 1996]. Кроме того, резкая подвижка блоков земной коры в момент землетрясения может привести к появлению изолированных электромагнитных импульсов, опережающих на несколько секунд фронт сейсмических волн [Белов, Мигунов, Соболев, 1974; Гохберг, Крылов, Левшенко, 1989; Гульельми, Левшенко, 1994, 1996, 1997]. Если же этот импульс достаточно сильный, то он, вероятно, вызовет световую вспышку в приземной атмосфере (*earthquake light*) [Lockner, Johnston, Byerlee, 1983] и даже возмущение в ионосфере [Гошджанов, Муханов, Пилипенко, 1991]. Однако среди анализируемых событий ни “предвестник” сейсмической волны, ни импульс из очага землетрясения с уверенностью не выделялись.

Генерация электромагнитных импульсов на стадии разрушения горной породы интерпретировалась как результат взрывного расширения микрообъёмов горной среды, сжатых по сравнению с литостатическим давлением, который сопровождается всплеском носителей электронного заряда [Bleier et al., 2010; Freund et al., 2021]. Специально для лоцирования источников таких импульсных сигналов разработана система, основанная на регистрации горизонтальных магнитных компонент и вертикального электрического поля в скважине [Tsutsui, 2005]. Для выделения униполярных магнитных импульсов, предположительно связанных с нарастанием тектонической нагрузки на горную породу, разрабатываются специализированные алгоритмы анализа временных рядов [Kappler et al., 2019]. Поэтому изучение связи импульсной составляющей геомагнитного поля с сейсмической активностью представляется крайне перспективным.

В этом же ряду удивительных, но недостаточно изученных явлений стоит и обнаруженный в работах [Довбня и др., 2006; Довбня, Зотов, Щепетнов, 2008; Довбня, Пашинин, Рахматулин, 2019; Довбня, 2011, 2014, 2021] эффект появления глобальных

магнитных импульсов за первые минуты до сейсмического толчка. В упомянутых работах анализ УНЧ излучений выполнялся по данным двух индукционных магнитометров (Борок и Колледж) с регистрацией на аналоговый магнитофон, разнесённых на 12 ч по долготе и на 10° по широте. Аналоговые записи оцифровывались, а затем подвергались спектрально-временному анализу с построением динамических спектров (спектрограмм). Предвестниковые импульсы на обеих станциях появлялись практически одновременно и имели подобную спектральную форму. Сигналы регистрировались в виде либо единичных, либо парных импульсов с амплитудой, не превышающей 20 пТл в диапазоне частот от 0 до 5 Гц на значительных удалениях от эпицентра (до 10 тыс. км). Динамические спектры “предвестниковых” сигналов сейсмического происхождения подобны спектрам магнитосферных пульсаций *Pi1B*, возникающих при авроральных активизациях, но имеют иные временные характеристики: длительность *Pi1B* обычно составляет 2–3 мин, что в 5–10 раз превышает характерную длительность импульсных “предвестников” (20–50 с). Выявленные сигналы предложено рассматривать как проявление механо-электромагнитных преобразований в зоне землетрясений, связанных с разрушением зацеплений на границе смежных плит. Предположено, что резкое сжатие пород, предшествующее их разрушению, может привести к генерации электромагнитного импульса (например, в результате пьезомагнитного эффекта).

Несмотря на то, что физическая природа “предвестниковых” импульсов не была надёжно установлена, эта интригующая гипотеза может быть поистине крупным открытием в геофизике, поэтому к её критическому рассмотрению нужно отнестись особенно тщательно.

Поскольку в упомянутых выше работах рассматривались землетрясения по всему миру, включая совсем слабые ($M > 3$), то с большой вероятностью на любой магнитный всплеск даже в 10-минутной временной окрестности найдётся какое-то землетрясение. Но тогда импульсы должны наблюдаться случайным образом относительно момента землетрясения, что противоречит представленным авторами результатам регистрации. Поэтому отвергнуть эту гипотезу на основании только такого возражения нельзя.

По данным сети высокочувствительных индукционных магнитометров *PWING* на Дальнем Востоке подтвердить результаты [Довбня и др., 2006; Довбня, Зотов, Щепетнов, 2008; Довбня, Пащинин, Рахматулин, 2019; Довбня, 2011, 2014, 2021] нам не удалось. Правда обнаружено появление импульсных возмущений синхронно на нескольких станциях, что исключает их объяснение лишь наличием локальных помех, однако нам не удалось найти случаи одновременной регистрации импульсов на всех станциях сети, покрывающей Восточную Сибирь, Японию и Аляску. Синхронные импульсы наблюдались только на паре станций, т.е. масштаб возмущения составлял порядка 103 км, хотя не исключено, что импульсы на периферийных станциях были слишком малы по сравнению с центральной станцией *MSR* с более высокой чувствительностью. Статистика, основанная на автоматическом подсчёте числа импульсов до и после сейсмического толчка в пятиминутном интервале, не демонстрирует преобладания импульсных возмущений непосредственно перед землетрясениями.

Сопоставление зарегистрированных магнитных импульсов с базой данных *WWLLN* показало, что по крайней мере часть импульсов во временной окрестности землетрясения является откликом на грозовой разряд. Любое импульсное возмущение генерирует отклик в очень широком частотном диапазоне и его проявление в разных частотных интервалах зависит от типа разряда, его длительности и высоты, состояния околоземной среды. Электромагнитный отклик на молниевый разряд в атмосфере простирается от десятков МГц (биполярные импульсы), 1–10 кГц (свисты), десятков Гц (Шумановский резонанс), до первых герц (ионосферный альвеновский резонатор). Все

эти явления можно либо приписать так называемым атмосферикам (*sferics*), покрывающим диапазон от ультранизких частот (доли Гц) до очень-низких частот ОНЧ (единицы–десятки кГц), либо их лучше разделять, а атмосферика приписывать к ОНЧ диапазону. Кроме того, молнии могут сопровождаться сопутствующими импульсными возмущениями от высотных оптических явлений (спрайты, эльфы, джеты, и т.п.). Волновые формы анализируемых нами импульсов указывают, что они могут быть связаны с возбуждением Шумановского резонанса. Эта резонансная электромагнитная структура с фундаментальной частотой 7.8 Гц образована поверхностью Земли и проводящими слоями верхней атмосферы (~80 км), и эффективно возбуждается грозовыми разрядами [Nickolaenko, Hayakawa, 2002].

Невзирая на то, что наш анализ и не подтвердил гипотезу об УНЧ импульсах как предвестниках землетрясений, их физическую природу можно считать установленной – с большой вероятностью они вызваны электрическими разрядами в атмосфере, возбуждающими Шумановский резонанс. Появление импульсов также может быть обусловлено сценарием, при котором молниевый разряд дополнительно возбуждает моды ионосферного волновода в герцовом диапазоне, распространяющиеся на значительные расстояния [Fedorov et al., 2016; Mazur et al., 2018].

В недавней работе [Марчук, Потанов, Мишин, 2022] также анализируются УНЧ импульсы (названные ультра-короткопериодными импульсами – УКИ), но по данным индукционных магнитометров в Сибири. Авторы показали, что по крайней мере часть этих импульсов вызвана спрайтами в Китае. Временная задержка между УКИ и возникновением спрайтов составляла несколько десятков миллисекунд, что соответствует типичным скоростям распространения сигнала в волноводе Земля–ионосфера порядка $0.8c$, где c – скорость света.

В принципе, можно допустить, что появление грозового разряда перед землетрясением оказывается не просто случайным совпадением, так как сейсмический процесс может вызывать изменения электрохимических свойств нижней атмосферы (например, за счёт выхода радиоактивных эманаций) [Harrison, Aplin, Rycroft, 2010; Pulinet, Davidenko, 2014], а это может служить триггером грозовых разрядов при благоприятных условиях [Yagova et al., 2019]. В целом вопрос о связи процесса подготовки землетрясения с атмосферным электричеством изучен очень слабо и какие-либо обоснованные предположения в этой области делать нельзя. Таким образом, полностью отбросить гипотезу о наличии специфических электрических разрядов в атмосфере, предвещающих землетрясения, и связанных с ними магнитных импульсах, преждевременно.

Заключение

По данным сети высокочувствительных индукционных магнитометров на Дальнем Востоке обнаружено появление региональных импульсных УНЧ возмущений. Зачастую они регистрируются синхронно на нескольких станциях, что исключает их объяснение только влиянием локальных помех.

Наблюдения, представленные в данной работе, не подтверждают эффект появления глобальных импульсных возмущений за несколько минут до землетрясений. Сопоставление магнитных наблюдений с данными сети регистрации молний *WWLLN* показало, что по крайней мере часть импульсов обусловлена откликом Шумановского резонатора и ионосферного волновода на грозовые разряды в 650-километровой окрестности магнитной станции. Тем не менее, при поисках электромагнитных предвестников, помимо спектральных методов, целесообразно использовать и выделение импульсной составляющей геомагнитного поля.

Благодарности

Исследование выполнено на основе данных магнитометров, доступных на сайте центра *ERG* Института околоземного космического окружения (*ISEE*) Нагойского Университета (<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>), сейсмического каталога *ISC* (www.isc.ac.uk) и архивных данных сети *WWLLN* за 2016 г., любезно предоставленных Р. Хольцвортом. Также в работе частично использованы данные, полученные на уникальной научной установке “Комплекс непрерывного сейсмического мониторинга РФ, сопредельных территорий и мира” (<http://www.gsras.ru/unu>), развёрнутой при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00576-21. Авторы выражают признательность рецензентам за внимательное изучение работы и конструктивные замечания.

Финансирование

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 22-17-00125.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Белов С.В., Мигунов Н.И., Соболев Г.А. Магнитный эффект сильных землетрясений на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14, № 3. С.380–382.
- Гохберг М.Б., Крылов С.М., Левшенко В.Т. Электромагнитное поле очага землетрясения // Докл. АН СССР. 1989. Т. 308, № 1. С.62–65.
- Гошджанов М.Б., Муханов М.Б., Пилипенко В.А. Импульсные возмущения ионосферы, вызванные грозовой и сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 6. С.1064–1069.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т. Электромагнитные сигналы от землетрясений // Физика Земли. 1994. № 5. С.65–70.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т. Электромагнитный импульс из очага землетрясения // Доклады РАН. 1996. Т. 349, № 5. С.676–678.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т. Электромагнитный сигнал из очага землетрясения // Физика Земли. 1997. № 9. С.22–30.
- Довбня Б.В. Об эффектах землетрясений в геомагнитных пульсациях и их возможной природе // Геофизический журнал. 2011. Т. 33, № 1. С.72–79.
- Довбня Б.В. Электромагнитные предвестники землетрясений и их повторяемость // Геофизический журнал. 2014. Т. 36, № 3. С.160–165. doi: 10.24028/gzh.02033100.v36i3.2014.116069
- Довбня Б.В. О результатах дистанционного наблюдения импульсных ультранизкочастотных электромагнитных сигналов, обнаруживаемых за минуты до землетрясения // Жизнь Земли. 2021. Т. 43, № 3. С.304–313. DOI: 10.29003/m2435.0514-7468.2020_43_3/304-313
- Довбня Б.В., Зотов О.Д., Мострюков А.О., Щепетнов Р.В. Электромагнитные сигналы во временной окрестности землетрясений // Физика Земли. 2006. № 8. С.60–65.
- Довбня Б.В., Зотов О.Д., Щепетнов Р.В. Связь УНЧ электромагнитных волн с землетрясениями и антропогенными воздействиями // Геофизические исследования. 2008. Т. 9, № 4. С.69–80.
- Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А. Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. С.731–740.
- Костерин Н.А., Пилипенко В.А., Дмитриев Э.М. О глобальных ультранизкочастотных электромагнитных сигналах перед землетрясениями // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 1. С.24–34.

- Мальшиков Ю.П., Джумабаев К.Б. Прогнозирование землетрясений по параметрам естественного импульсного электромагнитного поля Земли // Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С.97–103.
- Марчук Р.А., Потапов А.С., Мишин В.В. Синхронные глобально наблюдаемые ультракоротко-периодные импульсы // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 2. С.52–60.
- Bleier T., Dunson C., Maniscalco M., Bryant N., Bamberg R., Freund F. Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infrared signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2009. V. 9. P.585–603.
- Bleier T., Dunson C., Alvarez C., Freund F., Dahlgren R. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. V. 10. P.1965–1975. DOI: 10.5194/nhess-10-1965-2010
- Bortnik J., Bleier T.E., Dunson C., Freund F. Estimating the seismotelluric current required for observable electromagnetic ground signals // Annales Geophysicae. 2010. V. 28. P.1615–1624. doi: 10.5194/angeo-28-1615-2010
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Baddeley L. Modeling the high-latitude ground response to the excitation of the ionospheric MHD modes by atmospheric electric discharge // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2016. V. 121. P.11282–11301. doi: 10.1002/2016JA023354
- Freund F.T., Heraud J.A., Centa V.A., Scoville J. Mechanism of unipolar electromagnetic pulse emitted from the hypocenters of impending earthquakes // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2021. V. 230. P.47–65. doi: 10.1140/epjst/e2020-000244-4
- Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2010. V. 72. P.376–381. doi: 10.1016/j.jastp.2009.12.004
- Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes // Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences. 2004. V. 15, N 3. P.329–360.
- Hayakawa M., Molchanov O.A. Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling. Tokyo: Terra Scientific Publishing, 2002. 477 p.
- Hayakawa M., Schekotov A., Potirakis S.M., Eftaxias K., Li Q., Asano T. Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics / Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terra Scientific Publishing, 2013. 168 p.
- Hayakawa M., Yamauchi H., Ohtani N., Ohta M., Tosa S., Asano T., Schekotov A., Izutsu J., Potirakis S.M., Eftaxias K. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. M. Hayakawa. Trivandrum, India: Transworld Research Network, 2009. 279 p.
- Iyemori T., Kamei T., Tanaka Y., Takeda M., Hashimoto T., Araki T., Okamoto T., Watanabe K., Sumitomo N., Oshiman N. Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake // J. Geomag. Geoelectr. 1996. V. 48. P.1059–1070.
- Kappler K.N. A data variance technique for automated despiking of magnetotelluric data with a remote reference // Geophys. Prospect. 2012. V. 60. P.179–191. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2011.00965.x>
- Kappler K.N., Schneider D.D., MacLean L.S., Bleier T.E., Lemon J.J. An algorithmic framework for investigating the temporal relationship of magnetic field pulse and earthquakes applied to California // Computers and Geosciences. 2019. V. 133, 104317. 10 p. doi: 10.1016/j.cageo.2019.104317
- Lockner D.A., Johnston M.J.S., Byerlee J. A mechanism to explain the generation of earthquake lights // Nature. 1983. V. 302. P.28–33.
- Masci F., Thomas J.N. Are there new findings in the search for ULF magnetic precursors to earthquakes? // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2015. V. 120. P.10289–10304.
- Mazur N.G., Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V. ULF electromagnetic field in the upper ionosphere excited by lightning // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2018. V. 123. P.6692–6702. doi: 10.1029/2018JA025622
- Molchanov O.A., Kopytenko Yu.A., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Matiashvili T.G., Fraser-Smith A.C., Bernardy A. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak ($M_S=6.9$) and the Loma-Prieta ($M_S=7.1$) earthquakes: Comparative analysis // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19. P.1495–1498.

- Nickolaenko A.P., Hayakawa M.* Resonances in the Earth-ionosphere cavity. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2002. 391 p.
- Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F.* Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band – A Review of observations and mechanisms // *Reviews of Geophysics*. 1993. V. 31. P.117–132.
- Pulinets S., Davidenko D.* Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit // *Adv. Space Res.* 2014. V. 53. P.709–723. doi: 10.1016/j.asr.2013.12.035
- Schekotov A., Molchanov O., Hattori K., Fedorov E., Gladyshev V.A., Belyaev G.G., Chebrov V., Sinitsin V., Gordeev E., Hayakawa M.* Seismo-ionospheric depression of the ULF geomagnetic fluctuations at Kamchatka and Japan // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. V. 31. P.313–318. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.043>
- Schekotov A., Chebrov D., Hayakawa M., Belyaev G., Berseneva N.* Short-term earthquake prediction in Kamchatka using low-frequency magnetic fields // *Natural Hazards*. 2020. V. 100. P.735–755. doi:10.1007/s11069-019-03839-2
- Shiokawa K., Katoh Y., Hamaguchi Y., Yamamoto Y., Adachi T., Ozaki M., Oyama S.-I., Nosé M., Nagatsuma T., Tanaka Y., Otsuka Y., Miyoshi Y., Kataoka R., Takagi Y., Takeshita Y., Shinbori A., Kurita S., Hori T., Nishitani N., Shinohara I., Tsuchiya F., Obana Y., Suzuki S., Takahashi N., Seki K., Kadokura A., Hosokawa K., Ogawa Y., Connors M., Ruohoniemi J.M., Engebretson M., Turunen E., Ulich T., Manninen J., Raita T., Kero A., Oksanen A., Back M., Kauristie K., Mattanen J., Baishev D., Kurkin V., Oinats A., Pashinin A., Vasilyev R., Rakhmatulin R., Bristow W., Karjala M.* Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network // *Earth, Planets and Space*. 2017. V. 69. P.1–21. doi: 10.1186/s40623-017-0745-9
- Surkov V.V., Pilipenko V.A.* Magnetic effects due to earthquakes and underground explosions: a review // *Annals of Geophysics*. 1997. V. 40, N 2. P.227–239.
- Surkov V.V., Pilipenko V.A., Sinha A.K.* Possible mechanisms of co-seismicelectromagnetic effect // *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2018. V. 53. P.157–170. doi: 10.1007/s40328-018-0211-6
- Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.* On the reported magnetic precursor of the 1989 Loma Prieta earthquake // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2009. V. 173. P.207–215.
- Tsutsui M.* Identification of earthquake epicenter from measurements of electromagnetic pulses in the Earth // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 32, L20303. 5 p. doi: 10.1029/2005GL023691
- Wright J.R.* Possiblequake-related, pre-seismic impulses near 10 and 15 Hz that were not recorded by a 1 Hz seismometer // *New Concepts in Global Tectonics*. 2021. V. 9, N 2. 10 p.
- Yagova N.V., Sinha A.K., Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Holzworth R., Vichare G.* ULF electromagnetic noise from regional lightning activity: Model and observations // *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 182. P.223–228. doi: 10.1016/j.jastp.2018.12.005

Сведения об авторах

МАРТИНЕС-БЕДЕНКО Валерий Армандович – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(917) 517-66-84. E-mail: lera_m0@mail.ru

ПИЛИПЕНКО Вячеслав Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН. 119296, г. Москва, ул. Молодёжная, д. 3. Тел.: +7(903) 618-46-66. E-mail: pilipenko_va@mail.ru

ШИОКАВА Казуо – директор, Институт исследований околоземного пространства, Нагойский Университет, Фуру-тё, Чикуса-ку, Нагоя, 464-8601, Япония. Тел.: +81-52-747-6306. E-mail: shiokawa@isee.nagoya-u.ac.jp

КАСИМОВА Виктория Александровна – научный сотрудник, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, д. 9. Тел.: +7(961) 963-04-93. E-mail: vika@emsd.ru

SEARCH FOR PULSED ULTRALOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC EARTHQUAKE PRECURSORS

V.A. Martines-Bedenko¹, V.A. Pilipenko^{1,2}, K. Shiokawa³, V.A. Kasimova⁴

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan*

⁴ *Kamchatka Branch of Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Corresponding author: V.A. Pilipenko (e-mail: pilipenko_va@mail.ru)

Abstract. Numerous publications have appeared in the literature describing a new seismo-electromagnetic effect – the appearance of magnetic pulses with a duration of 1–40 s, which are detected at distances up to ten thousand km several minutes before earthquakes of even low magnitude. An assumption was made about the universality of the processes of impulse precursor generation and the fundamental possibility of a short-term (several minutes) warning of an approaching earthquake. In the presented article, the possibility of the appearance of ultra-low-frequency pulses that precede seismic events with magnitudes $M > 5.0$, according to the data of a network of induction magnetometers in the Far East, is investigated. In the records of these highly sensitive magnetometers, impulse disturbances are constantly encountered, some of which are observed synchronously at several stations, which eliminates the influence of local noise. The spectral maximum of about 7–8 Hz of the oscillatory structure, which manifests itself in many pulses, corresponds to the fundamental frequency of the Schumann resonator. A comparison of magnetic observations with data from the *WWLLN* (*World Wide Lightning Location Network*) showed that some of the pulses were caused by lightning discharges in the 650 km vicinity of magnetic station. Despite the fact that some of the impulses are observed immediately before earthquakes, it is impossible to speak with confidence about their connection with seismic activity. The calculation of the number of impulses in the 5-min interval before and after the seismic shock shows that they are randomly distributed relative to the moment of the earthquake. Apparently, the pulses are predominantly due to the ionospheric response to a far lightning discharge.

Keywords: earthquakes, electromagnetic signals, earthquake precursors, thunderstorms, magnetic impulses, Schumann resonator

Acknowledgements

The study was performed on the basis of magnetometer data available on the website of the *ERG* Center of the Institute for Space-Earth Environmental Research (*ISEE*) of Nagoya University (<https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp>), the *ISC* seismic catalog (www.isc.ac.uk) and archival data of the *WWLLN* network for 2016, kindly provided by R. Holzworth. The work also partially uses data obtained at the unique scientific installation “Complex for continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world” (<http://www.gsras.ru/unu>), deployed with the support of the Russian Ministry of Education and Science within the framework of state assignment no. 075-00576-21. The authors are grateful to the referees for their careful study of the work and constructive comments.

Funding

This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-17-00125).

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Belov S.V., Migunov N.I., Sobolev G.A., Magnetic effect of strong earthquakes in Kamchatka, *Geomagnetizm i aeronomiya* (Geomagnetism and aeronomy), 1974, vol. 14, no. 3, pp. 380-382. [In Russian].
- Bleier T., Dunson C., Maniscalco M., Bryant N., Bamberg R., Freund F., Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infrared signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2009, vol. 9, pp. 585-603. doi: 10.5194/nhess-9-585-2009
- Bleier T., Dunson C., Alvarez C., Freund F., Dahlgren R., Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010, vol. 10, pp. 1965-1975. doi: 10.5194/nhess-10-1965-2010
- Bortnik J., Bleier T.E., Dunson C., Freund F., Estimating the seismotelluric current required for observable electromagnetic ground signals, *Annales Geophysicae*, 2010, vol. 28, pp. 1615-1624.
- Dovbnaya B.V., On the effects of earthquakes in geomagnetic pulsations and their possible nature, *Geofizicheskiy zhurnal* (Geophysical Journal), 2011, vol. 33, no. 1, pp. 72-79. [In Russian].
- Dovbnaya B.V., Electromagnetic precursors of earthquakes and their repeatability, *Geofizicheskiy zhurnal* (Geophysical Journal), 2014, vol. 36, no. 3, pp. 160-165. [In Russian]. doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116069
- Dovbnaya B.V., On the results of remote observation of pulsed ultra-low-frequency electromagnetic signals detectable minutes before an earthquake, *Zhizn' Zemli* (Life of the Earth), 2021, vol. 43, no. 3, pp. 304-313. [In Russian]. DOI: 10.29003/m2435.0514-7468.2020_43_3/304-313
- Dovbnaya B.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A., Short-term electromagnetic precursors of earthquakes, *Geodinamika i tektonofizika* (Geodynamics and tectonophysics), 2019, vol. 10, pp. 731-740. [In Russian]. doi: 10.5800/GT-2019-10-3-0438
- Dovbnaya B.V., Zotov O.D., Mostryukov A.O., Schepetnov R.V., Electromagnetic signals close in time to earthquakes, *Physics of the Solid Earth*, 2006, vol. 42, no. 8, pp. 684-689.
- Dovbnaya B.V., Zotov O.D., Schepetnov R.V., The connection of ULF electromagnetic waves with earthquakes and antropogenic impacts, *Geofizicheskie issledovaniya* (Geophysical Research), 2008, vol. 9, no. 4, pp. 69-80. [In Russian].
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Baddeley L., Modeling the high-latitude ground response to the excitation of the ionospheric MHD modes by atmospheric electric discharge, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, vol. 121, pp. 11282-11301. doi: 10.1002/2016JA023354
- Freund F.T., Heraud J.A., Centa V.A., Scoville J., Mechanism of unipolar electromagnetic pulses emitted from the hypocenters of impending earthquakes, *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, 2021, vol. 230, pp. 47-65. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000244-4>
- Gokhberg M.B., Krylov S.M., Levshenko V.T., Electromagnetic field of the earthquake source, *Doklad AN SSSR* (Reports Academy of Sciences of the USSR), 1989, vol. 308, no. 1, pp. 62-65. [In Russian].
- Goshdzhyanov M.B., Mukhanov M.B., Pilipenko V.A., Impulse disturbances of the ionosphere caused by thunderstorm and seismic activity, *Geomagnetizm i aeronomiya* (Geomagnetism and aeronomy), 1991, vol. 31, pp. 1064-1069. [In Russian].
- Guglielmi A.V., Levshenko V.T., Electromagnetic signals of earthquakes, *Fizika Zemli* (Izvestiya, Physics of the Solid Earth), 1994, no. 5, pp. 65-70. [In Russian].
- Guglielmi A.V., Levshenko V.T., Electromagnetic pulse from the source of an earthquake, *Doklady RAN* (Reports of the Russian Academy of Sciences), 1996, vol. 349, no. 5, pp. 676-678. [In Russian].
- Guglielmi A.V., Levshenko V.T., Electromagnetic signals from the source of an earthquake, *Fizika Zemli* (Izvestiya, Physics of the Solid Earth), 1997, no. 9, pp. 22-30. [In Russian].
- Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J., Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, vol. 72, pp. 376-381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2009.12.004>
- Hattori K., ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2004, vol. 15, no. 3, pp. 329-360.
- Hayakawa M., Molchanov O.A., *Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling*, Tokyo, Terra Scientific Publishing, 2002, 477 p.
- Hayakawa M., Schekotov A., Potirakis S.M., Eftaxias K., Li Q., Asano T., *Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics*, Tokyo, Terra Scientific Publishing, 2013, 168 p.

- Hayakawa M., Yamauchi H., Ohtani N., Ohta M., Tosa S., Asano T., Schekotov A., Izutsu J., Potirakis S.M., Eftaxias K., *Electromagnetic phenomena associated with earthquakes*, Trivandrum, India, Transworld Research Network, 2009, 279 p.
- Iyemori T., Kamei T., Tanaka Y., Takeda M., Hashimoto T., Araki T., Okamoto T., Watanabe K., Sumitomo N., Oshiman N., Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake, *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996, vol. 48, pp. 1059-1070.
- Kappler K., A data variance technique for automated despiking of magnetotelluric data with a remote reference, *Geophys. Prospect*, 2012, vol. 60, pp. 179-191.
- Kappler K.N., Schneider D.D., MacLean L.S., Bleier T.E., Lemon J.J., An algorithmic framework for investigating the temporal relationship of magnetic field pulses and earthquakes applied to California, *Computers and Geosciences*, 2019, vol. 133, 104317. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104317>
- Kosterin N.A., Pilipenko V.A., Dmitriev E.M., On global ultra-low-frequency electromagnetic signals before earthquakes, *Geofizicheskie issledovaniya* (Geophysical Research), 2015, vol. 16, no. 1, pp. 24-34. [In Russian].
- Lockner D.A., Johnston M.J.S., Byerlee J., A Mechanism to explain the generation of earthquake lights, *Nature*, 1983, vol. 302, pp. 28-33.
- Malyshev Yu.P., Dzhumabaev K.B., Forecasting earthquakes based on the parameters of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth, *Vulkanologiya i seismologiya* (Vulcanology and Seismology), 1987, no. 1, pp. 97-103. [In Russian].
- Marchuk R.A., Potapov A.S., Mishin V.V., Synchronous Globally Observable Ultrashort-Period Pulses, *Solar-terrestrial physics*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 47-55. DOI: 10.12737/stp-82202207
- Masci F., Thomas J.N., Are there new findings in the search for ULF magnetic precursors to earthquakes?, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, vol. 120, pp. 10289-10304.
- Mazur N.G., Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V., ULF electromagnetic field in the upper ionosphere excited by lightning, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, vol. 123, pp. 6692-6702. doi: 10.1029/2018JA025622
- Molchanov O.A., Kopytenko Yu.A., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Matiashevili T.G., Fraser-Smith A.C., Bernardy A., Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak ($M_S=6.9$) and the Loma-Prieta ($M_S=7.1$) earthquakes: Comparative analysis, *Geophysical Research Letters*, 1992, vol. 19, pp. 1495-1498.
- Nikolaenko A.P., Hayakawa M., *Resonances in the Earth-ionosphere cavity*, Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, 2002, 391 p.
- Park S.K., Johnston M.J.S., Madden T.R., Morgan F.D., Morrison H.F., Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band – A Review of observations and mechanisms, *Reviews of Geophysics*, 1993, vol. 31, pp. 117-132.
- Pulinets S., Davidenko D., Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit, *Adv. Space Res.*, 2014, vol. 53, pp. 709-723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>
- Schekotov A., Molchanov O., Hattori K., Fedorov E., Gladyshev V.A., Belyaev G.G., Chebrov V., Sinitsin V., Gordeev E., Hayakawa M., Seismo-ionospheric depression of the ULF geomagnetic fluctuations at Kamchatka and Japan, *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, vol. 31, pp. 313-318.
- Schekotov A., Chebrov D., Hayakawa M., Belyaev G., Berseneva N., Short-term earthquake prediction in Kamchatka using low-frequency magnetic fields, *Natural Hazards*, 2020, vol. 100, pp. 735-755. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03839-2>
- Shiokawa K., Katoh Y., Hamaguchi Y., Yamamoto Y., Adachi T., Ozaki M., Oyama Sh., Nose M., Nagatsuma T., Tanaka Y., Otsuka Y., Miyoshi Y., Kataoka R., Takagi Y., Takeshita Y., Shinbori A., Kurita S., Hori T., Nishitani N., Shinohara I., Tsuchiya F., Obana Y., Suzuki S., Takahashi N., Seki K., Kadokura A., Hosokawa K., Ogawa Y., Connors M., Ruohoniemi J.M., Engebretson M., Turunen E., Ulich T., Manninen J., Raita T., Kero A., Oksanen A., Back M., Kauristie K., Mattanen J., Baishev D., Kurkin V., Oinats A., Pashinin A., Vasilyev R., Rakhmatulin R., Bristow W., Karjala M., Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network, *Earth, Planets and Space*, 2017, vol. 69, pp. 1-21. doi: 10.1186/s40623-017-0745-9
- Surkov V.V., Pilipenko V.A., Magnetic effects due to earthquakes and underground explosions: a review, *Annals of Geophysics*, 1997, vol. 40, no 2, pp. 227-239. doi: <http://dx.doi.org/10.4401/ag-3904>
- Surkov V.V., Pilipenko V.A., Sinha A.K., Possible mechanisms of co-seismic electromagnetic effect, *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2018, vol. 53, pp. 157-170. doi: 10.1007/s40328-018-0211-6
- Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J., On the reported magnetic precursor of the 1989 Loma Prieta earthquake, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, vol. 173, pp. 207-215. doi: 10.1016/j.pepi.2008.11.014

- Tsutsui M., Identification of earthquake epicenter from measurements of electromagnetic pulses in the Earth, *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, L20303. doi: 10.1029/2005GL023691
- Wright J.R., Possible quake-related, pre-seismic impulse snear 10 and 15 Hz that were not recorded by a 1 Hz seismometer, *New Concepts in Global Tectonics*, 2021, vol. 9, no. 2, 10 p.
- Yagova N.V., Sinha A.K., Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Holzworth R., Vichare G., ULF electromagnetic noise from regional lightning activity: Model and observations, *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*, 2019, vol. 182, pp. 223-228. doi: 10.1016/j.jastp.2018.12.005

About the authors

MARTINES-BEDENKO Valery Armandovich – researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(917) 517-66-84. E-mail: lera_m0@mail.ru

PILIPENKO Vyacheslav Anatolievich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia; Chief researcher, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. Molodyozhnaya st., 3, Moscow, 119296, Russia. Ph.: +7(903) 618-46-66. E-mail: pilipenko_va@mail.ru

SHIOKAWA Kazuo – director, Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University. Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan. Ph.: +81-52-747-6306. E-mail: shiokawa@isee.nagoya-u.ac.jp

KASIMOVA Viktoria Alexandrovna – researcher, Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. Piypa blvd., 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia. Ph.: +7(961) 963-04-93. E-mail: vika@emsd.ru