
ОБЗОР ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОЛЕБАНИЯ МАГНИТОСФЕРЫ

REVIEW OF PULSE IMPACTS ON THE MAGNETOSPHERIC OSCILLATIONS

А.В. Гульельми

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

А.С. Потапов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru*

Б.В. Довбня

*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН,
Борок, Ярославская область, Россия, dovbnya@inbox.ru*

О.Д. Зотов

*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН,
Борок, Ярославская область, Россия, ozotov@inbox.ru*

A.V. Guglielmi

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

A.S. Potapov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

B.V. Dobnya

*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS,
Borok, Yaroslavl Region, Russia, dovbnya@inbox.ru*

O.D. Zotov

*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS,
Borok, Yaroslavl Region, Russia, ozotov@inbox.ru*

Аннотация. Представлены обзор и выборочный анализ реакции колебательных систем магнитосферы в диапазоне ультранизких частот (УНЧ) на электромагнитные, механические, тепловые и химические импульсные воздействия. Импульсы возникают как внутри магнитосферы (взрыв в геомагнитном хвосте, импульсная инжекция энергичных частиц), так и за ее пределами (солнечная вспышка, межпланетная ударная волна, грозовой разряд, землетрясение, извержение вулкана и т. д.). Предложена систематика импульсов, опирающаяся на данные геофизики и космофизики и тесно связанная с теорией УНЧ-колебаний. Систематика имеет познавательное и практическое значение, давая возможность ориентироваться в богатейшем разнообразии реакций магнитосферы на импульсы земного и космического происхождения. Выбран принцип классификации, согласно которому вид импульса определяется по двум признакам — по местоположению источника импульса и по характеру воздействия импульса на ту или иную колебательную систему магнитосферы. Выполнены важнейшие условия полноты и чистоты деления, поскольку перечислены все возможные члены деления импульсов на классы, виды и разновидности, причем члены деления не перекрываются. Классификация и введенная номенклатура полезны в том отношении, что позволяют систематизировать общие свойства и специфические особенности видов и разновидностей импульсов. Это особенно важно в отношении реакции плазменных оболочек Земли на импульсы, возникающие в период подготовки землетрясения, а также при экспериментальном исследовании динамических процессов в околоземном космическом пространстве. Приведены примеры реакции УНЧ-колебаний на импульсные воздействия. Особое внимание уделено обзору работ, которые еще не нашли отражения в обзорной и монографической литературе.

Ключевые слова: магнитосфера, ультранизкочастотные колебания, импульсы, классификация, солнечный ветер, землетрясения.

Abstract. Response of magnetospheric oscillatory systems in the ultra-low-frequency (ULF) range on electromagnetic, mechanical, thermal, and chemical impulse action are overviewed and selectively analyzed. Impulses can occur both inside the magnetosphere (e.g. explosion in the geomagnetic tail, impulsive injection of energetic particles) and outside (e.g. solar flare, interplanetary shock wave, thunderstorm discharge, earthquake, volcanic eruption etc.). We suggest systematics of impulses which is based on geophysics and space physics data and is closely related to the theory of ULF oscillations. The systematics is of cognitive and practical importance, and it allows us to interpret a rich variety of responses of the magnetosphere to impulses of the terrestrial and space origins. The classification principle is selected according to which an impulse type is determined from two criteria such as impulse origin location and character of impulse action on one or another oscillatory system of the magnetosphere. The primary conditions for completeness and validity of division are fulfilled because all possible terms of putting impulses to classes, types and forms are specified, and the terms do not overlap. The classification and introduced nomenclature are helpful because they make possible to systematize common properties and specific features of types and forms of impulses. This is especially important with regard to reaction of the Earth's plasma sheaths to impulses generated during an earthquake preparation as well as under experimental study of dynamic processes in the near-Earth space. The examples of response of ULF oscillations to impulsive actions are shown. The particular focus is given to review of studies which still are not mentioned in reviews and monographies.

Key words: magnetosphere, ultra-low-frequency oscillations, impulses, classification, solar wind, earthquakes.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках данного обзора мы будем рассматривать магнитосферу Земли как совокупность колебательных систем, взаимодействующих между собой и с окружающей средой. Мы ограничимся анализом ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний, диапазон которых простирается от миллигерц до нескольких герц (см., например, [Гульельми, 1979]). Наблюдается большое разнообразие видов и разновидностей УНЧ-колебаний. Они либо возбуждаются внешними по отношению к магнитосфере источниками, либо самовозбуждаются в результате неустойчивостей магнитосферной плазмы. Наблюдение реакции УНЧ-колебаний на импульсные возмущения магнитосферы является эффективным методом экспериментального исследования динамических процессов в околоземном космическом пространстве. Этой теме и посвящен настоящий обзор.

Импульсные возмущения возникают как внутри магнитосферы (взрыв в геомагнитном хвосте, импульсная инжекция энергичных частиц), так и за ее пределами (солнечная вспышка, межпланетная ударная волна, грозовой разряд, землетрясение, извержение вулкана и т. д.). В следующем разделе представлена классификация импульсов, воздействующих на колебательные системы магнитосферы. Конкретные примеры реакции УНЧ-колебаний на импульсные воздействия земного и космического происхождения рассмотрены в разделах 2 и 3 соответственно. Раздел 4 и заключение посвящены обсуждению и выводам.

Нужно сказать, что выбранная нами тема обширна. Ее невозможно исчерпать в данном обзоре. Мы ограничимся анализом отдельных примеров, выделив УНЧ-колебания Pc1 (диапазон 0.2–5 Гц) как объект, удобный для изучения разнообразных проявлений импульсного воздействия на магнитосферу. Из восемнадцати видов импульсных воздействий, введенных нами в разделе 1, значительная часть может быть представлена на примере колебаний Pc1 (см. разделы 2 и 3). Особое внимание мы уделим обзору работ, которые еще не нашли отражения в обзорной и монографической литературе.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Вначале напомним систематику УНЧ-колебаний, принятую на XIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в августе 1963 г. в Беркли [Троицкая, 1964; Troitskaya, Guglielmi, 1967; Троицкая, Гульельми, 1969; Jacobs, 1970]. Она до сих пор широко используется в литературе [Guglielmi, Pokhotelov, 1996; Kangas et al., 1998; Lundin, Guglielmi, 2006; Гульельми, 2007; Сивоконь, 2011]. В основу классификации был положен морфологический принцип и утверждена биномиальная номенклатура. Все виды колебаний разделены на два класса, названные сокращенно Pc (регулярные колебания, pulsations continues) и Pi (иррегулярные колебания, pulsations irregular). Вид обозначается символом PcN (N=1...5) или PiN (N=1...3). Цифра N от-

вечает номеру поддиапазона общего диапазона ультранизких частот (подробнее об этом см. в указанной выше литературе).

Теперь дадим набросок систематики импульсных возмущений, влияющих на режим УНЧ-колебаний. Выберем принцип классификации, согласно которому вид импульса определяется по двум признакам: по местоположению источника импульса и по характеру воздействия импульса на ту или иную колебательную систему магнитосферы. Прежде всего разделим все импульсы на внутренние и внешние по отношению к магнитосфере. Класс внутренних импульсов обозначим буквой М (magnetosphere). Внешние импульсы по происхождению импульсных источников удобно отнести к одному из следующих классов: L (lithosphere), Т (technosphere), А (atmosphere), W (solar wind) и S (Sun). В соответствии с темой нашего обзора видовую принадлежность импульса естественно определять не его собственными свойствами, а тем воздействием, которое он оказывает на режим колебаний. Воздействие может быть вынуждающим F (forcing), стимулирующим Р (provoking) и модулирующим М (modulating).

При вынуждающем воздействии энергия колебаний черпается из энергии импульса, как, например, при возбуждении волн Альвена в ионосфере мощным наземным взрывом или длиннопериодных колебаний Pc5 в магнитосфере при взаимодействии магнитопаузы с фронтом межпланетной ударной волны. Импульс, генерируемый фронтом взрывной волны, относится к виду AF, а порождаемый фронтом межпланетной ударной волны — к виду WF. При стимулированном возбуждении колебаний энергия черпается из свободной энергии, запасенной в колебательной системе с активным заполнением. Импульс служит своего рода триггером, переводящим неравновесную систему в колебательный режим. Так называемый Биг-Бен-эффект, который будет описан ниже, дает пример возбуждения ионноциклотронных колебаний радиационного пояса электромагнитным импульсом индустриального происхождения. Такой импульс мы относим к виду TP. Наконец, приведем два примера, поясняющие физический смысл представления о модулирующем импульсе. При резком сжатии магнитосферы, которое проявляется как импульс SSC (storm sudden commencement), частота колебаний Pc1 скачком повышается. Эффект объясняется модификацией (усилением) геомагнитного поля в области генерации Pc1. Поэтому SSC следует отнести к виду WM. В качестве второго примера рассмотрим колебания Ipdp (разновидность колебаний Pc1–Pi1). Они возбуждаются после импульсной инжекции энергичных протонов из геомагнитного хвоста в глубь магнитосферы. Модификация состоит в том, что энергичные протоны, дрейфующие на запад после инжекции, привносят в колебательную систему активное заполнение. Импульсная инжекция в этом случае относится к виду MM. Все эти примеры заимствованы из указанных выше обзоров и монографий.

Наша классификация является естественной в том смысле, что вид импульса определяется по его существенным признакам. При этом классификация

удовлетворяет двум основным принципам деления, а именно принципам полноты и чистоты, поскольку мы перечислили все возможные члены деления и позаботились о том, чтобы они не перекрывались. Заметим, что классовая принадлежность того или иного импульса обычно не вызывает сомнений, но определение вида требует детального исследования. В приведенных выше примерах мы уверенно указали вид импульса, но это стало возможным только благодаря длительным геомагнитным исследованиям.

2. ИМПУЛЬСЫ ЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

2.1. Землетрясения

Теория [Guglielmi, 1992; Гульельми, 1992, 2007] предсказывает возбуждение УНЧ-импульса магнитного поля при движении бортов разрыва горных пород в очаге землетрясения. Импульс выходит из очага на земную поверхность и достигает ионосферных высот. Гипотеза состоит в том, что импульс, распространяясь в неравновесной космической плазме, может стать триггером, который при благоприятных условиях переводит ту или иную колебательную систему в режим автоколебаний. Другими словами, теория указывает на существование импульсов вида LP.

Напомним основные положения теории возбуждения магнитного импульса в очаге землетрясения. Ускорение горных пород при образовании магистрального разрыва сплошности порождает силы инерции, приводящие в действие так называемый инерционный механизм генерации переменного магнитного поля $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$. Уравнение генерации переменного магнитного поля имеет вид

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\alpha \nabla \times \mathbf{A} + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla^2 \mathbf{B}, \quad (1)$$

где $\mathbf{A} = \partial \mathbf{V} / \partial t$ — ускорение, \mathbf{V} — скорость, α — коэффициент механомагнитной трансформации, σ — проводимость горных пород. Таким образом, источниками сейсмомагнитного поля служат вихревые линии поля ускорений $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$. Чтобы не загромождать изложение, мы приводим лишь фрагмент общего уравнения генерации [Гульельми, 2007], которое описывает преобразование энергии движения горных пород в энергию переменного магнитного поля в результате совместного действия инерционного, индукционного, деформационного и пьезомагнитного механизмов.

Задача состоит в том, чтобы выбрать модель векторного поля смещений в соответствии с тем или иным представлением о динамике очага землетрясения и найти решение $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ уравнения генерации (1) при нулевом начальном условии и подходящим образом заданных граничных условиях. Частично эта задача решается путем оценки эффективного магнитного момента очага m . В рамках плоской конформной модели [Касахара, 1985] с временной функцией очага, предложенной Брюном [Bruno, 1979], получена следующая оценка [Guglielmi et al., 2004]:

$$m = \alpha US / 2\pi T. \quad (2)$$

Здесь U — смещение бортов разрыва, равное половине подвижки по простиранию, S — площадь разрыва, T — характерное время механического движения. В сейсмологии установлен ряд эмпирических соотношений между параметрами очага S , T , U и магнитудой землетрясения M [Касахара, 1985; Добровольский, 1991; Соболев, 1993]. Это позволяет выразить магнитный момент m через магнитуду землетрясения. Отсюда при $M > 7$ с помощью формулы (2) получаем значение 0.5 нТл в качестве нижней оценки амплитуды магнитного импульса на входе в ионосферу. Амплитуда невелика, но не исключено, что импульс может быть триггером, стимулирующим возбуждение колебаний Pc1. Из радиофизики известно, что даже относительно слабые импульсные воздействия могут радикально изменить режим автоколебаний, а Pc1 как раз и представляют собой автоколебания внешнего радиационного пояса [Kangas et al., 1998].

Дальнейший теоретический анализ довольно затруднителен, поэтому обратимся к наблюдениям. На рис. 1 показан динамический спектр колебаний Pc1 [Довбня, 2011]. Серия Pc1 имеет вид горизонтальной полосы с заостренной левой частью. Момент землетрясения отмечен вертикальной стрелкой. На первый взгляд данный пример подтверждает изложенное выше теоретическое представление. В самом деле, казалось бы, Pc1 начинаются после землетрясения. Однако более внимательное рассмотрение динамического спектра убеждает в том, что Pc1 начинаются не после, а за 3–4 мин до землетрясения, сразу после той разновидности колебаний Pi1, которую иногда называют флэш (flash), или сокращенно Pi1F. Уже одно это не дает нам возможности использовать теорию, изложенную выше, для интерпретации явления, представленного на рис. 1. Независимо от этого, колебания Pi1F и сами по себе интересны в контексте данного обзора. Они обнаружены Б.В. Довбней сравнительно недавно и подробно исследованы в серии работ [Довбня и др., 2006; Dovbnya, 2007; Довбня, 2009, 2011, 2014]. Морфологически Pi1F лишь отдаленно напоминают Pi1B. Физические различия этих разновидностей Pi1-колебаний вполне очевидны. Pi1B зарождаются после взрывоподобного процесса в геомагнитном хвосте [Троицкая, Гульельми, 1969; Jacobs, 1970], т. е. относятся к классу М. В отличие от Pi1B, колебания Pi1F возникают обычно за несколько минут до или через несколько минут после землетрясения и, по мнению авторов работы [Довбня и др.,

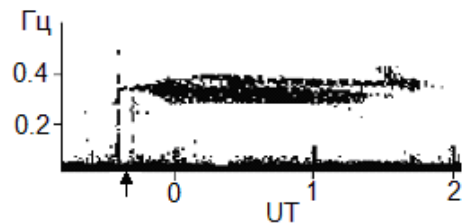


Рис. 1. Динамический спектр колебаний Pc1, начало которых зарегистрировано 10.06.1976 г. в obs. «Колледж». Стрелкой отмечен момент мирового времени 23 ч 37 мин 37 с, в который произошло землетрясение магнитудой $M=5.4$ с глубиной гипоцентра 100 км и координатами эпицентра 43.18° N, 147.72° E [Довбня, 2011]

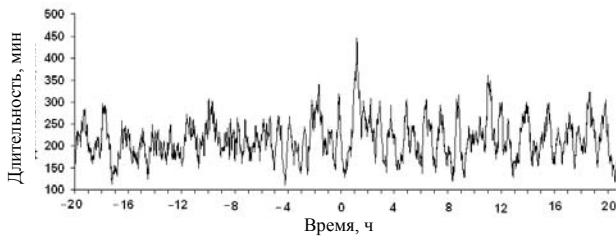


Рис. 2. Сопоставление активности колебаний Pc1 с землетрясениями. Ноль на оси абсцисс соответствует моменту землетрясения магнитудой $M \geq 5.8$. Активность колебаний (ось ординат) характеризуется суммарной длительностью серий Pc1, начавшихся в данный момент до или после землетрясения в указанном на рисунке интервале времени [Зотов, 2015]

2006], имеют литосферное происхождение, т. е. относятся к классу L. Если это так, то Pi1F следует отнести к виду LP, поскольку Pi1F стимулируют возбуждение магнитосферных колебаний Pc1.

Вопросы о механизме возбуждения колебаний Pi1F и о механизме стимуляции колебаний Pc1 остаются открытыми. Тем не менее идея о воздействии землетрясений на активность Pc1, по-видимому, не лишена смысла. Об этом свидетельствует результат статистического анализа каталога Pc1 [Матвеева, 1996] и каталога землетрясений Национального информационного центра геологической службы США [USGS/NEIC, http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html]. Исследование указанных каталогов методом наложенных эпох позволило выявить закономерность, которая состоит в том, что на средних широтах активность Pc1 тем выше, чем ниже суточный уровень глобальной сейсмичности [Гульельми, Зотов, 2010а]. Возможно, воздействие на верхние слои атмосферы акустических волн от землетрясений подавляет активность Pc1.

Итак, режим возбуждения Pc1 зависит некоторым образом от сейсмичности, но эта зависимость проявляется по-разному. Приведем еще один пример, свидетельствующий о многообразии реакций Pc1 на землетрясения [Зотов, 2015]. Результат получен путем статистического исследования методом наложенных эпох (3640 эпох). Были использованы каталог Pc1, составленный Матвеевой, и каталог землетрясений (ссылки см. выше). Моменты сильных землетрясений с 1973 по 1992 г., указанные в каталоге USGS/NEIC, взяты в качестве репера для синхронизации активности Pc1. Активность характеризовалась суммарной длительностью серии колебаний, начавшихся в каждый данный момент до и после репера в двух интервалах времени продолжительностью по 20 ч каждый. Результат показан на рис. 2. Мы видим, что сильные землетрясения значительно изменяют режим колебаний Pc1, а именно, после репера появляются мощные флуктуации активности Pc1, которых до репера не было. Спектральный анализ, проведенный в работе [Зотов, 2015], убедительно подтверждает этот вывод. Аналогичный результат получается, если в качестве репера использовать моменты 1200 ядерных взрывов, произведенных с 1964 по 2006 г., по данным каталога Международного сейсмологического центра

[ISC, <http://www.isc.ac.uk>]. Установлено, что спектры активности Pc1 после землетрясений и взрывов содержат узкие спектральные пики на периодах около 70 и 50 мин соответственно. Ничего подобного не наблюдается в спектрах активности Pc1 до землетрясений и взрывов.

2.2. Пульсации индустриальной активности

Продолжая обзор импульсов земного происхождения, перейдем теперь к импульсам класса T. Здесь мы ограничимся описанием так называемого Биг-Бен-эффекта (эффекта часовых меток) [Гульельми и др., 1978, 2011; Гульельми, 1979; Зотов, Калишер, 1979; Гульельми, Зотов, 2010б, 2012а]. Рисунок 3 как нельзя лучше поясняет, о чем пойдет речь. Мы видим серию колебаний Pc1 с несущей частотой около 2 Гц, начинающуюся ровно в 03:00 ч UT. Две узкие вертикальные полоски напоминают Pi1F, но, в отличие от Pi1F, они не имеют никакого отношения к естественным излучениям, а представляют собой всего лишь часовые метки. Несмотря на это, мы видим удивительное сходство динамических спектров на рис. 1 и 3. Создается впечатление, что перезвон Биг-Бена или кремлевских курантов стимулирует возбуждение Pc1. Разумеется, бой часов сам по себе не имеет никакого отношения к автоколебаниям магнитосферы. Но авторы указанных выше работ обратили внимание на частую повторяемость событий вроде того, что показано на рис. 3. Было произведено исследование методом синхронного детектирования [Гульельми, Зотов, 2010б] каталога [Матвеева, 1996], содержащего информацию о Pc1 за 40 лет непрерывных наблюдений в obs. «Борок». Оно выявило наличие скрытой периодичности Pc1, причем начала серий колебаний синхронизированы по часам мирового времени. Явление синхронизма обнаружено на высоком уровне достоверности.

Для интерпретации Биг-Бен-эффекта выдвинута гипотеза о существовании в техносфере скрытых пульсаций, синхронизированных по часам мирового времени. Точнее говоря, предполагается, что пульсирует глобальное энергопотребление, периодически воздействуя на магнитосферу достаточно мощными электромагнитными импульсами. Эти импульсы проникают в магнитосферу и служат триггерами, время от времени стимулирующими возбуждение Pc1. Другими словами, своеобразным метрономом, задающим темп колебательным процессам в магнитосфере, является индустриальная активность человечества.

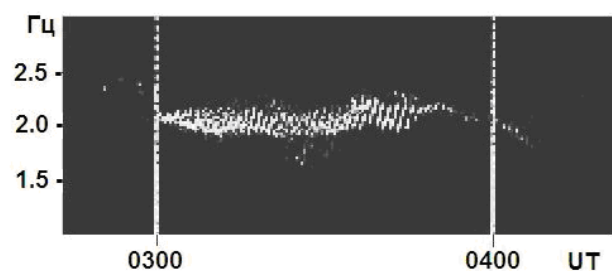


Рис. 3. Динамический спектр Pc1, зарегистрированных в obs. «Борок» 22.11.1984 г. [Гульельми и др., 2011]

Для экспериментальной проверки этой гипотезы нужно приложить еще немало усилий, но первые результаты, полученные в работах [Зотов, Гульельми, 2010; Гульельми, Зотов, 2012а], обнадеживают. На рис. 4 отчетливо видна часовая цикличность скачков потребления электрической мощности в одном из регионов США за период с 2006 по 2009 г. Рисунок получен путем анализа данных NYISO (New York Independent System operator, Нью-Йоркский независимый системный оператор), который управляет сетью высоковольтных линий общей протяженностью 10 775 миль. Исходные данные представлены на сайте [http://www.nyiso.com] в виде каталога с 5-минутным разрешением. Предварительная обработка каталога состояла в выделении скачков мощности. После этого был использован метод синхронного накопления. В результате удалось обнаружить резкие импульсы, привязанные к часовым меткам. Вполне понятно, что импульсы, показанные на рис. 4, создаются спонтанно многими миллионами потребителей энергии, живущих по часам и неосознанно формирующих эффект часовых меток в техносфере. Любопытно, что впервые косвенные признаки паразитных пульсаций глобального энергопотребления, синхронизированных по часам мирового времени, были обнаружены нами путем анализа УНЧ электромагнитных колебаний Pc1.

3. ИМПУЛЬСЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

3.1. Межпланетные ударные волны

Солнечный ветер формирует магнитосферу Земли и дает энергию для возбуждения в магнитосфере разнообразных УНЧ волновых полей. Ударные волны, тангенциальные, вращательные и контактные разрывы в солнечном ветре, взаимодействуя с магнитосферой, создают импульсные возмущения, резко изменяющие режим УНЧ-колебаний. Мы ограничимся здесь кратким описанием влияния ударных волн, возникающих после солнечных вспышек, на режим колебаний Pc1. Напомним, что взаимодействие ударной волны с магнитосферой проявляется как фронт SI (sudden impulse) или SSC. Напомним также, что, в отличие от SSC, SI не сопровождается следующей за ним геомагнитной бурей [Нишида, 1980].

Активизация Pc1 после SSC и SI давно и хорошо известна и подробно описана (см., например, обзор

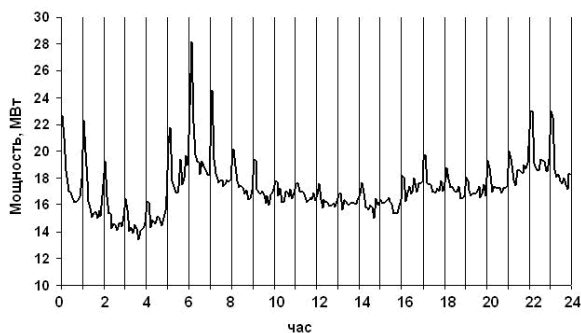


Рис. 4. Эффект часовых меток в усредненной суточной вариации абсолютной величины скачков потребляемой электрической мощности в одном из крупнейших промышленных регионов планеты [Гульельми, Зотов, 2012а]

[Kangas et al., 1998]). Тема оказалась настолько глубокой, что до сих пор еще не исчерпана (см., например, недавно опубликованную статью [Пархомов и др., 2014]). Мы остановимся здесь на менее известных аспектах воздействия межпланетной ударной волны на режим колебаний Pc1.

Если серия Pc1 спонтанно возникает до контакта ударной волны с магнитосферой и продолжается во время контакта, то после контакта амплитуда колебаний резко возрастает, а несущая частота скачком увеличивается [Guglielmi, Pokhotelov, 1996; Kangas et al., 1998]. Оба эффекта являются следствием сжатия магнитосферы ударным фронтом. Сжатие увеличивает тепловую анизотропию ионов радиационного пояса, циклотронная неустойчивость которых ответственна за возбуждение Pc1, и увеличивает циклотронную частоту ионов в области возбуждения. Теория циклотронной неустойчивости позволяет связать между собой наблюдаемые величины — амплитуду SSC ΔB , несущие частоты ω_{\pm} и амплитуды b_{\pm} колебаний до (+) и после (–) SSC:

$$\omega_{+} - \omega_{-} \propto \Delta B, \quad (3)$$

$$b_{+}^2 - b_{-}^2 \propto \Delta B. \quad (4)$$

Оба соотношения выведены нами на основе модельных соображений о механизме самовозбуждения радиационного пояса. Они важны для экспериментальной проверки теоретических представлений о Pc1.

Выше мы сказали, что автоколебания радиационного пояса, проявление которых мы наблюдаем в виде Pc1, могут начаться спонтанно еще до контакта ударной волны с магнитосферой. При этом мы имели в виду, что критический переход в автоколебательный режим произошел под влиянием внутренних шумов, присущих любой физической системе. Такие переходы называют спонтанными, а конкретную внутреннюю флуктуацию, вызвавшую переход (обычно не известную нам), называют эндогенным триггером [Гульельми, 2015]. Однако мы знаем, что существуют не только эндогенные, но и экзогенные триггеры. Дело здесь в следующем. Вблизи порога критического перехода резко повышается реактивность динамической системы. В этом состоянии колебательной системы даже слабое внешнее возмущение может индуцировать автоколебательный процесс. Такой критический переход естественно назвать индуцированным. Пример такого рода перехода представлен на рис. 3. Дадим еще один пример индуцированного перехода [Guglielmi et al., 2000]. Он напрямую относится к обсуждаемой здесь проблеме воздействия межпланетной ударной волны на режим колебаний Pc1.

На рис. 5 показана зависимость вероятности возбуждения Pc1 от времени на интервале 100 мин, предшествующем SI. Мы видим тенденцию к повышению вероятности появления Pc1 с приближением к моменту SI. Эффект обнаружен путем анализа данных длинного ряда наблюдений Pc1 в обл. «Борок». Мы интерпретируем этот эффект как результат воздействия на магнитосферу повышенного уровня флуктуаций в предударной области, опережающей фронт межпланетной ударной волны.

3.2. Инъекции энергичных частиц

Взрывоподобные процессы в геомагнитном хвосте, приводящие к магнитосферной суббуре, сопровождаются импульсными инъекциями электронов и протонов в верхние слои авроральной атмосферы [Нишида, 1980]. Индикатором таких вторжений являются импульсы Pi1B, наблюдаемые в полосе частот от 0.025 до 1 Гц. Радиационный пояс, в котором возбуждаются колебания Pc1, демонстрирует при таких инъекциях достаточно необычное поведение. Опишем типичное событие такого рода, представленное в работе [Довбня и др., 2012].

На рис. 6 мы видим зарождение и последующую эволюцию колебаний Pc1. Амплитуда колебаний постепенно нарастает, ширина полосы увеличивается, несущая частота плавно изменяется. Но в момент появления широкополосного импульса Pi1B квази-монокроматические колебания Pc1 внезапно прекращаются. Необычность явления срыва колебаний Pc1 при появлении Pi1B состоит в том, что сама по себе инъекция частиц в зону сияний, по-видимому, не воздействует на условия генерации Pc1 в радиационном поясе. Возможно, возмущение авроральной ионосферы энергичными частицами приводит к резкому ухудшению условий распространения Pc1 в ионосферном МГД-волноводе на трассе от места вторжения Pc1 из магнитосферы в ионосферу до высокоширотной обс. «Колледж». Если это так, то импульсную инъекцию частиц, очевидно, следует

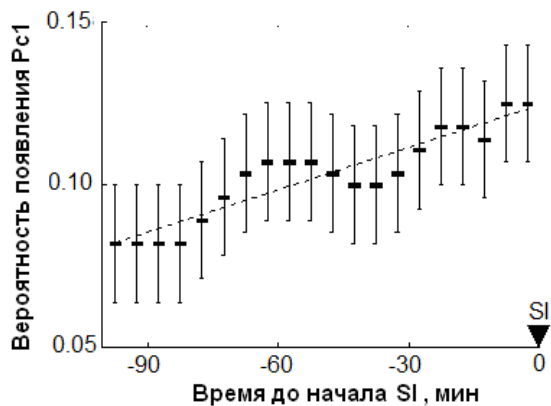


Рис. 5. Вероятность появления Pc1 перед SI как функция времени. Ноль на оси абсцисс соответствует началу SI. Вертикальные линии показывают среднеквадратичные ошибки оценки вероятностей в каждом из 5-минутных интервалов. Штриховая линия показывает линейную аппроксимацию экспериментальных данных [Guglielmi et al., 2000]

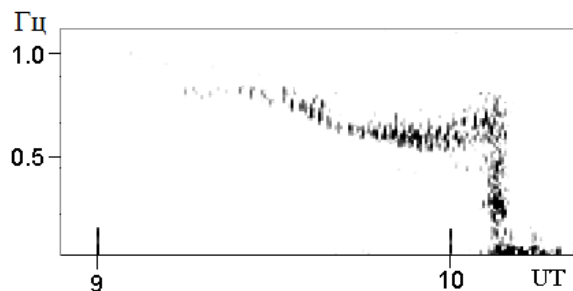


Рис. 6. Резкое окончание серии колебаний Pc1 после всплеска пульсаций Pi1B (обс. «Колледж», 03.07.1973 г.) [Довбня и др., 2012]

отнести к виду MM. Однако вопрос остается спорным, поскольку эффект прекращения колебаний Pc1 в момент возбуждения Pi1B наблюдался и в среднеширотной обс. «Борок» [Довбня, Зотов, 1985].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

По классификации, введенной нами в разделе 1, каждый импульс следует отнести к одному и только одному классу, но его видовая принадлежность может быть различной. Поясним это на примере солнечной вспышки. По местоположению источника вспышка относится к классу S. Через 8 мин после вспышки резко повышается концентрация электронов в ионосфере на освещенной Солнцем стороне земного шара. В результате происходит импульсная модификация параметров ионосферного МГД-волновода, по которому Pc1 распространяются вдоль земной поверхности на большие расстояния от места вторжения волновых пакетов из магнитосферы в ионосферу. Вспышку в этом случае следует отнести к виду SM. Мы предсказываем резкое изменение амплитуды, фазы и несущей частоты колебаний во время вспышки. Поиск эффектов такого рода в эксперименте представляет собой одну из интересных задач дальнейшего исследования колебаний Pc1. Однако мы отнесем ту же вспышку к виду SF, если будем иметь в виду возбуждение магнитосферных МГД-резонаторов импульсом тока, который возникает в результате увеличения ионизации нижних слоев ионосферы под действием рентгеновского излучения вспышки [Довбня и др., 1995; Пархомов, Климов, 2013].

В разделе 2 мы обошли стороной важный вопрос об импульсах класса A и теперь хотим частично восполнить этот пробел. Мощным источником электромагнитных импульсов, воздействующих на магнитосферу, является молниевый разряд. В особенности интересны спрайты и голубые струи над грозовыми облаками. Предположительно, они возбуждают волны Альвена в магнитосфере [Сурков, Гальперин, 2000]. В этой области исследований еще многое предстоит сделать. Не исключено, что грозовая активность, воздействуя на магнитосферу, сама испытывает некоторое влияние со стороны техносферы. Действительно, рассмотрим рис. 7. Он получен в работе [Зотов, Гульельми, 2010] по данным о времени появления молний, зарегистрированных системой LDAR Космического центра им. Кеннеди на мысе Канаверал в штате Флорида, США [http://ghrc.nsstc.nasa.gov/hydro]. Мы видим некоторые признаки вариации количества разрядов, синхронизированной по мировому времени. Не исключено, что рис. 7 и другие подобные рисунки, которые здесь не приводятся, свидетельствуют о признаках антропогенного воздействия на грозовую активность. Вопрос заслуживает дальнейшего изучения.

Теперь обратимся еще раз к вопросу об импульсах класса L. Выше мы рассмотрели импульс магнитного поля, возбуждаемый движением бортов разрыва в очаге землетрясения. После того как землетрясение произошло, поверхностные сейсмические волны расходятся от эпицентра и, по мере распростра-

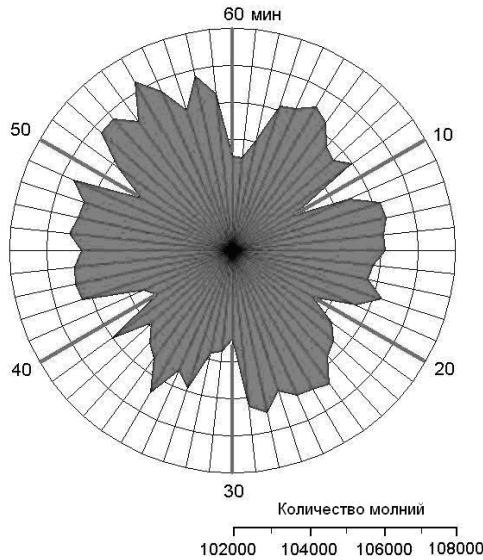


Рис. 7. Круговая диаграмма частоты молниевых разрядов [Зотов, Гульельми, 2010]

нения, возбуждают сопутствующие колебания магнитного поля в результате действия инерционного, индукционного и пьезомагнитного механизмов. (Деформационным механизмом генерации, по-видимому, можно пренебречь, если только сейсмическая волна не приводит в колебательное движение большие массы сильно намагниченных горных пород, например, в районе Курской магнитной аномалии.) По мере удаления от эпицентра амплитуда волны быстро убывает, и о воздействии сопутствующего магнитного сигнала на плазменные оболочки Земли говорить не приходится. Например, в обс. «Соданкюля» (Финляндия), расположенной на расстоянии 8798 км от эпицентра сильного землетрясения на Суматре, был зарегистрирован косейсмический магнитный сигнал с амплитудой всего 0.07 нТл [Гульельми и др., 2006]. Однако на предельно больших расстояниях от эпицентра положение меняется. К антиэпицентру приближается фронт сходящейся поверхностной волны. В малой окрестности антиэпицентра сходящаяся волна вызывает мощный кумулятивный эффект [Гульельми, 2015]. Полагая, что радиус указанной окрестности порядка ширины фронта, получим из геометрических соображений оценку коэффициента усиления магнитного импульса в антиэпицентре:

$$\sqrt{(2 / \Delta\theta)} \sin \theta. \tag{5}$$

Здесь θ — угловое расстояние от эпицентра до точки наблюдения, а $\Delta\theta$ — угловая ширина фронта. Оценка по формуле (5) с учетом наблюдений в обс. «Соданкюля» [Гульельми и др., 2006] указывает на то, что в антиэпицентре землетрясения на Суматре магнитный сигнал имел вполне заметную величину: его амплитуда была порядка ~1 нТл.

Вдали от эпицентра и антиэпицентра скачок магнитного поля на фронте сейсмической волны очень мал. Однако скачок воздушного давления на уровне ионосферы может быть вполне ощутимым. Более того, согласно наблюдениям [Guglielmi et al., 2006; Потапов и др., 2008], скачок давления на фронте

поверхностной волны Рэлея, распространяющейся от удаленного землетрясения, приводит иногда к срыву УНЧ-колебаний (IAR, ionospheric Alfvén resonances), которые представляют собой разновидность колебаний Pc1.

Заканчивая обсуждение, укажем на такое важное свойство, как гибкость предложенной классификации импульсных воздействий на магнитосферу. Речь идет о том, что наша классификация допускает как группирование, так и дополнительное членение объектов путем введения категорий, подклассов и разновидностей. Например, в данном обзоре мы сгруппировали классы в две категории: импульсы земного (L, T, A) и импульсы космического (S, W, M) происхождения. В классе M, например, можно ввести подклассы для разделения импульсов, которые возникают в геомагнитном хвосте, в зоне сияний, в радиационном поясе и т. д. Разновидности могут различаться по тому, являются ли импульсы электромагнитными, механическими, тепловыми или химическими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы сделали обзор и выборочный анализ импульсных возмущений, влияющих на режим УНЧ-колебаний магнитосферы Земли. Важным новым результатом данной работы является систематика импульсов. Предложенная систематика опирается на данные многих разделов геофизики и космофизики и тесно связана с теорией УНЧ-колебаний. Она имеет познавательное и практическое значение, давая возможность ориентироваться в богатейшем разнообразии реакций магнитосферы на импульсы земного и космического происхождения.

Классификация и предложенная нами номенклатура полезны в том отношении, что позволяют систематизировать изучение общих свойств и специфических особенностей видов и разновидностей импульсов. Это особенно важно в отношении реакции плазменных оболочек Земли на импульсы, возникающие в период подготовки землетрясения. Многие исследователи указывают на существование таких импульсов [Бирфельд, Таранцев, 1963; Fraser-Smith et al., 1990; Гуфельд и др., 1992; Соболев, 1993; Тарасов, 1997; Гохберг, Шалимов, 2000; Hayakawa, 2001; Nattori, 2004; Dovbnya, 2007; Bortnik et al., 2008; Собисевич и др., 2010; Адушкин и др., 2012; Гульельми, Зотов, 2012б; Зотов и др., 2013; Бучаченко, 2014; Гульельми, 2015; Гульельми и др., 2015]. Однако проблема, несмотря на длительную историю исследования, еще далека от решения. Механизмы возбуждения предвестников землетрясений, а иногда и причинно-следственная связь импульсов с землетрясениями в ряде случаев остаются неопределенными (дискуссию по этому вопросу см. в работе [Masci, 2011]). В свете этого рациональная классификация импульсов, предшествующих сильным землетрясениям, безусловно, окажется полезной.

Мы выражаем благодарность Б.И. Клайну и И.П. Лаврову, совместно с которыми был получен ряд результатов, изложенных в данном обзоре. Особую благодарность мы выражаем Э.Т. Матвеевой

за составленный ею каталог, содержащий ценную информацию о Pc1 по данным непрерывных наблюдений в обс. «Борок» в течение 40 лет. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-05-00066 и 13-05-00529).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Бирфельд Я.Г., Таранцев А.В. Явление воздействия сейсмичности Земли через акустические волны на ионосферу // Государственный реестр открытий СССР. Открытие № 128 с приоритетом от 25.09.1963.

Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // УФН. 2014. Т. 184, № 1. С. 101–108.

Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2, № 2. С. 95–108.

Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 139 с.

Гульельми А.В. Эффект Толмэна–Стюарта в земной коре // Физика Земли. 1992. № 10. С. 109–113.

Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // УФН. 2007. Т. 177, № 12. С. 1257–1276.

Гульельми А.В. Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф // УФН. 2015. Т. 185, № 4. С. 415–429.

Гульельми А.В., Зотов О.Д. Связь электромагнитных волн Pc1 с землетрясениями // Физика Земли. 2010а. № 6. С. 28–34.

Гульельми А.В., Зотов О.Д. Пятнадцатиминутная модуляция геоэлектромагнитных волн Pc1 // Геофизические исследования. 2010б. Т. 11, № 1. С. 64–71.

Гульельми А.В., Зотов О.Д. Явление синхронизма в динамической системе магнитосфера–техносфера–литосфера // Физика Земли. 2012а. № 6. С. 23–33.

Гульельми А.В., Зотов О.Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. 2012б. № 2. С. 84–87.

Гульельми А.В., Довбня Б.В., Клайн Б.И., Пархомов В.А. Стимулированное возбуждение альвеновских волн импульсным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18, № 1. С. 179–181.

Гульельми А.В., Цзгмед Б., Потапов А.С. и др. Сейсмомагнитные сигналы от сильного землетрясения на Суматре // Физика Земли. 2006. № 11. Р. 63–69.

Гульельми А.В., Довбня Б.В., Потапов А.С., Хаякава М. Эффект часовых меток в активности электромагнитных колебаний Pc1 как свидетельство антропогенного воздействия на ионосферу и магнитосферу // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 19. С. 88–92.

Гульельми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 1. С. 98–103.

Гуфельд И.Л., Рожной А.А., Тюменцев С.И. Возмущения радиоволновых полей перед Рудбарским и Рачинским землетрясениями // Физика Земли. 1992. № 1. С. 102–107.

Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М., 1991. 217 с.

Довбня Б.В. О связи геомагнитных пульсаций с землетрясениями // Солнечно-земная физика. 2009. Вып. 13. С. 82–85.

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.

Довбня Б.В., Зотов О.Д. О связи импульсных процессов в ионосфере с режимом генерации колебаний Pc1 // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 24, № 3. С. 515–518.

Довбня Б.В., Пархомов В.А., Рахматулин Р.А. Длиннопериодные геомагнитные пульсации, сопровождающие интенсивные рентгеновские вспышки // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35, № 3. С. 146–150.

Довбня Б.В., Зотов О.Д., Мострюков А.Ю., Щепетнов Р.В. Электромагнитные сигналы во временной окрестности землетрясений // Физика Земли. 2006. № 8. С. 60–65.

Довбня Б.В., Потапов А.С., Рахматулин Р.А. Воздействие землетрясений на режим ультранизкочастотных электромагнитных эмиссий // Геофизический журнал. 2012. Т. 34, № 5. С. 189–193.

Зотов О.Д. Влияние сильных землетрясений на режим генерации колебаний Pc1 // Геофизические исследования. 2015 (в печати).

Зотов О.Д., Гульельми А.В. Проблемы синхронизма электромагнитных и сейсмических событий в динамической системе магнитосфера–техносфера–литосфера // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 19–25.

Зотов О.Д., Калишер А.Л. Статистический анализ эффектов искусственного воздействия на ионосферу // Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1979. С. 150–153.

Зотов О.Д., Гульельми А.В., Собисевич А.Л. О магнитных предвестниках землетрясений // Физика Земли. 2013. № 6. С. 139–147.

Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

Матвеева Э.Т. Каталог геомагнитных пульсаций типа Pc1 («жемчужин») по данным наблюдений на геофизической обсерватории «Борок» ОИФЗ РАН за 1957–1997 гг. М.: ОИФЗ РАН, 1996. Режим доступа: http://www.wdcb.ru/stp/data/catal_pc/ (дата обращения 15.10.2015 г.).

Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. 1980. М.: Мир, 299 с.

Пархомов В.А., Климов П.М. Программа «Вектор» для анализа ионосферных токовых систем во время солнечных вспышек // Известия ИГЭА. 2013. № 4 (90). С. 104–108.

Пархомов В.А., Довбня Б.В., Бородкова Н.А. и др. Импульсные всплески геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–7 Гц как первый сигнал о взаимодействии межпланетных ударных волн с магнитосферой // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 21–28.

Потапов А.С., Довбня Б.В., Цзгмед Б. О воздействии землетрясений на ионосферные резонансы Альвена // Физика Земли. 2008. № 4. С. 93–95.

Сивоконь В.П. Электромагнитные колебания в ионосферно-магнитосферном контуре // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51, № 4. С. 520–526.

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.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

Сурков В.В., Гальперин Ю.И. Электромагнитный импульс в магнитосфере, генерируемый импульсом электрического тока у нижней границы ионосферы // Космические исследования. 2000. Т. 38, № 6. С. 602–613.

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

Троицкая В.А. Классификация быстрых вариаций магнитного поля и земных токов // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 4, № 3. С. 615–616.

Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физ. наук. 1969. Т. 97, № 3. С. 453–495.

Bortnik J., Cutler J.W., Dunson C., et al. The possible statistical relation of Pc1 pulsations to Earthquake occurrence at low latitudes // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 2825–2836.

Brune J.N. Implications of earthquake triggering and rupture propagation for earthquake prediction based on premonitory phenomena // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 2195–2198.

Dovbnaya B.V. On the earthquake effects in the regime of Pc1 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69, iss. 14. P. 1765–1769.

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.

Guglielmi A. Elastomagnetic waves in a porous medium // *Physica Scripta.* 1992. V. 46. P. 433–434.

Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Geoelectromagnetic Waves. Bristol; Philadelphia: IOP Publ. Ltd., 1996. 402 p.

Guglielmi A., Kangas J., Kultima J., Potapov A. An increase in Pc1 wave activity prior to magnetic sudden impulses // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A11. P. 25185–25189.

Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B. One mechanism for generation of the co-seismic electromagnetic oscillations // *Physics and Chemistry of the Earth.* 2004. V. 29. P. 453–457.

Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B., et al. On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances // *Physics and Chemistry of the Earth.* 2006. V. 31. P. 469–472.

Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO).* 2004. V. 15, N 3. P. 329–360.

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

Jacobs J.A. Geomagnetic Micropulsations. New York; Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1970. 179 p.

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A Review) // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 435–512.

Lundin R., Guglielmi A. Ponderomotive forces in cosmos // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 127. P. 1–116.

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

Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* 1967. V. 7, N 5/6. P. 689–769.

URL: http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html (accessed October 15, 2015).

URL: <http://www.isc.ac.uk> (accessed October 15, 2015).

URL: <http://www.nyiso.com> (accessed October 15, 2015).

URL: <http://ghrc.nsstc.nasa.gov/hydro> (accessed October 15, 2015).

REFERENCES

Adushkin V.V., Ryabova S.A., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Response of the seismic background to geomagnetic variations. *Dokl. Earth Sci.* 2012, vol. 444, no. 1, pp. 642–645.

Birfel'd Ya.G., Tarantsev A.V. *Yavlenie vozdeistviya seismichnosti Zemli cherez akusticheskie volny na ionosferu* [Phenomenon of the Earth's seismicity impact at the ionosphere through acoustic wave]. *Gosudarstvennyi reestr otkrytii SSSR. Otkrytie № 128 s prioritom ot 25.09.1963*. [The USSR State Registry of Discoveries. Discovery No. 128 with priority of 25.09.1963] (in Russian).

Bortnik J., Cutler J.W., Dunson C., Bleier T.E. The possible statistical relation of Pc1 pulsations to Earthquake occurrence at low latitudes. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 2825–2836.

Brune J.N. Implications of earthquake triggering and rupture propagation for earthquake prediction based on premonitory phenomena. *J. Geophys. Res.* 1979, vol. 84, pp. 2195–2198.

Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *Physics — Uspekhi.* 2014, vol. 57, no. 1, pp. 92–98. DOI: 10.3367/UFN.ru.0184.201401e.0101.

Dobrovolskiy I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [The Theory of Tectonic Earthquake Preparation]. Moscow, 1991. 217 p. (in Russian).

Dovbnaya B.V. On the earthquake effects in the regime of Pc1. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, no. 14, pp. 1765–1769.

Dovbnaya B.V. On the relation between geomagnetic pulsations and earthquakes. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2009, iss. 13, pp. 82–85 (in Russian).

Dovbnaya B.V. On the effects of earthquakes in the geomagnetic pulsations and their possible nature. *Geofizicheskiy zhurnal* [Geophysical Journal]. 2011, vol. 33, no. 1, pp. 72–79 (in Russian).

Dovbnaya B.V. Electromagnetic earthquake precursors and their frequency of occurrence. *Geofizicheskiy zhurnal* [Geophysical Journal]. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 160–165 (in Russian).

Dovbnaya B.V., Zotov O.D. On the relationship between pulse processes in the ionosphere and the regime of Pc1 generation. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1985, vol. 24, no 3, pp. 515–518 (in Russian).

Dovbnaya B.V., Parkhomov V.A., Rakhmatulin R.A. Long period geomagnetic pulsations accompanying intense X-ray flares. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1995, vol. 35, no. 3, pp. 146–150 (in Russian).

Dovbnaya B.V., Zotov O.D., Mostryukov A.O., Shchepetnov R.V. Electromagnetic signals close in time to earthquakes. *Izv. Phys. Solid Earth.* 2006, vol. 42, no. 8, pp. 684–689.

Dovbnaya B.V., Potapov A.S., Rakhmatulin R.A. Earthquake impact on the regime of ultra-low-frequency electromagnetic emissions. *Geofizicheskiy zhurnal* [Geophysical Journal]. 2012, vol. 34, no. 5, pp. 189–193 (in Russian).

Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., Ladd M.E., Helliwell R.A., Villard O.G., Jr. 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.

Gokhberg M.B., Shalimov S.L. Lithosphere-ionosphere relation and its simulation. *Rossiiskii zhurnal nauk o Zemle* [Russian Journal of the Earth Sciences]. 2000, vol. 2, no. 2. pp. 95–108 (in Russian).

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

Guglielmi A.V. *MGD-volny v okolozemnoi plazme* [MHD Waves in the Near-Earth Plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 139 p.

Guglielmi A.V. Tolmen–Styuart effect in the Earth's crust. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth]. 1992, no. 10, pp. 109–113 (in Russian).

Guglielmi A. Elastomagnetic waves in a porous medium. *Physica Scripta.* 1992, vol. 46, pp. 433–434.

Guglielmi A.V. Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the crust and magnetosphere. *Physics — Uspekhi.* 2007, vol. 50, no.12, pp. 1197–1216.

Guglielmi A.V. Foreshocks and aftershocks of strong earthquakes in the light of catastrophe theory. *Physics — Uspekhi.* 2015, vol. 58, no. 4, pp. 384–397.

Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. *Geoelectromagnetic Waves*. Bristol, Philadelphia, IOP Publ. Ltd., 1996. 402 p.

Guglielmi A.V., Zotov O.D. 15-minute modulation of the Pc1 geoelectromagnetic waves. *Geofizicheskie issledovaniya* [Geophysical Research]. 2010a, vol. 11, no. 1, pp. 64–71 (in Russian).

Guglielmi A.V., Zotov O.D. Correlation between Pc1 electromagnetic activity and earthquakes. *Izv. Phys. Earth.* 2010b, vol. 46, no. 6, pp. 486–492.

Guglielmi A.V., Zotov O.D. The phenomenon of synchronism in the magnetosphere–technosphere–lithosphere dynamical system. *Izv. Phys. Solid Earth.* 2012a, vol. 48, no. 6, pp. 486–495.

Guglielmi A.V., Zotov O.D. Magnetic perturbation before the strong earthquakes. *Izv. Phys. Solid Earth*. 2012b, vol. 48, no. 2, pp. 171–173.

Guglielmi A.V., Dovbnya B.V., Klain B.I., Parkhomov V.A. Stimulated excitation of Alfvén waves in the near-Earth plasma by pulsed radio emission. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1978, vol. 18, pp. 122–123.

Guglielmi A., Kangas J., Kultima J., Potapov A. An increase in Pc1 wave activity prior to magnetic sudden impulses. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, pp. 25185–25189.

Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B. One mechanism for generation of the coseismic electromagnetic oscillations. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004, vol. 29, pp. 453–457.

Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B., Hayakawa M., Dovbnya B. On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006, vol. 31, pp. 469–472.

Guglielmi A.V., Tsegmed B., Potapov A.S., Kultima J., Rayta T. Seismomagnetic signals from the strong Sumatra earthquake. *Izv. Phys. Solid Earth*. 2006, vol. 42, no. 11, pp. 921–927.

Guglielmi A.V., Dovbnya B.V., Potapov A.S., Hayakawa M. Effect of hour marks in activity of Pc1 electromagnetic oscillations as evidence for human impact on the ionosphere and magnetosphere. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2011, iss. 19, pp. 88–92 (in Russian).

Guglielmi A.V., Lavrov I.P., Sobisevich A.L. Storm sudden commencements and earthquakes. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2015, vol. 1, no. 1, pp. 98–103 (in Russian).

Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*. 2004, vol. 15, no. 3, pp. 329–360.

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

Jacobs J.A. *Geomagnetic Micropulsations*. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag, 1970. 179 p.

Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (A Review). *Space Sci. Rev.* 1998, vol. 83, pp. 435–512.

Kasahara K. *Earthquake Mechanics*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1981. 272 p. (Russ. ed.: Kasahara K. *Mekhanika zemletryaseniy*. Moscow, Mir Publ., 1985, 264 p.)

Lundin R., Guglielmi A. Ponderomotive forces in cosmos. *Space Sci. Rev.* 2006, vol. 127, pp. 1–116.

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

Matveeva E.T. *Katalog geomagnitnykh pul'satsii tipa Pc1 («zhemchuzhin») po dannym nablyudenii na geofizicheskoi observatorii «Borok» OIFZ RAN za 1957–1997 gg.* [Catalog of Geomagnetic Pulsations from Observations at the Borok Observatory in 1957–1997]. Available at: http://www.wdcb.ru/stp/data/catal_pc/ (accessed 1 September 2015).

Nishida A. *Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere*. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag, 1978, 256 p. (Russ. ed.: Nishida A. *Geomagnitnyi diagnost magnitosfery*. Moscow, Mir Publ., 1980, 299 p.)

Parkhomov V.A., Klimov P.M. The “Vector” computer code for the analysis of ionospheric current systems during solar flares. *Izvestiya IGEA* [Proceedings of ISEA]. 2013, vol. 90, no. 4, pp. 104–108 (in Russian).

Parkhomov V.A., Dovbnya B.V., Borodkova N.A., Safargaleev V.V., Pashinin A.Yu. Pulse bursts of geomagnetic pulsations in the frequency range of 0.2–7 Hz as a first signal of interaction between interplanetary shock waves and the magnetosphere. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2014, iss. 25, pp. 21–28 (in Russian).

Potapov A.S., Dovbnya B.V., Tsegmed B. Earthquake impact on ionospheric Alfvén resonances. *Izv. Phys. Solid Earth*. 2008, vol. 44, no. 4, pp. 346–349.

Sivokon' V.P. Electromagnetic fluctuations in the ionospheric-magnetospheric circuit. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 4, pp. 513–519.

Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh., Sobisevich A.L. Observations of ultra-low-frequency geomagnetic disturbances reflecting the processes of the preparation and development of tsunamigenic earthquakes. *Dokl. Earth Sci.* 2010, vol. 435, no. 2, pp. 1627–1632.

Sobolev G.A. *Osnovy prognoza zemletryasenii* [Basics of the Earthquake Forecasting] Moscow, Nauka Publ., 1993, 313 p. (in Russian).

Surkov V.V., Galperin Yu.I. Electromagnetic pulse in the magnetosphere generated by impulsive current near the lower boundary of the ionosphere. *Cosmic Research*. 2000, vol. 38, no. 6, pp. 562–573.

Tarasov N.T. Electric impact on seismicity. *Dokl. Akad. Nauk* [Transactions of the Russian Academy of Sciences] 1997, vol. 353, no. 4, pp. 542–545 (in Russian).

Troitskaya V.A. Classification of rapid pulsations of the magnetic field and Earth currents. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1964, vol. 4, no. 3, pp. 490–491.

Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 1967, vol. 7, no. 5/6, pp. 689–769.

Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. Geomagnetic pulsations and diagnostics of the magnetosphere. *Sov. Phys. Usp.* 1969, vol. 12, no. 2, pp. 195–218.

Zotov O.D. The influence of strong earthquakes on the generation regime of pulsations Pc1. *Geofizicheskie issledovaniya* [Geophysical Research]. 2015 (in print) (in Russian).

Zotov O.D., Guglielmi A.V. Problems of synchronism of electromagnetic and seismic events in the magnetosphere–technosphere–lithosphere dynamic system. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2010, iss. 16, pp. 19–25 (in Russian).

Zotov O.D., Kalisher A.L. Statistical analysis of the effects of an artificial impact on the ionosphere. *Vliyanie moshchnogo radioizlucheniya na ionosferu* [Impact of the Power Radiowaves on the Ionosphere]. Apatity, 1979, 125 p. (in Russian).

Zotov O.D., Guglielmi A.V., Sobisevich A.L. On magnetic precursors of earthquakes. *Izv. Phys. Solid Earth*. 2013, vol. 49, no. 6, pp. 882–889.

URL: http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html (accessed October 15, 2015).

URL: <http://www.isc.ac.uk> (accessed October 15, 2015).

URL: <http://www.nyiso.com> (accessed October 15, 2015).

URL: <http://ghrc.nsstc.nasa.gov/hydro> (accessed October 15, 2015).