

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ СОБЫТИЙ НА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В СРЕДЕ ОБИТАНИЯ

© 2021 г. В. В. Адушкин<sup>1</sup>, А. А. Спивак<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: aaspivak100@gmail.com

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 19.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Обсуждаются эффекты сильных воздействий природного происхождения на акустические поля в атмосфере, геомагнитное поле и электрические характеристики приземного слоя атмосферы—атмосферного тока и электрического поля. В качестве экстремальных природных событий рассматриваются вулканические извержения, землетрясения, падение космических тел на Землю. Указанные природные явления рассматриваются в качестве локальных индикаторов интенсификации межгеосферных взаимодействий в приповерхностной системе литосфера—атмосфера с активным участием ионосферы. Показано, что в этих случаях вызванные эффекты в геофизических полях наблюдаются на значительных расстояниях от очага событий и характеризуются сходными по величине амплитудами, что может свидетельствовать об особой роли ионосферы в быстрой передаче возмущений на большие расстояния. При этом в качестве основного механизма возбуждения ионосферы рассматривается воздействие акустико-гравитационных волн, генерируемых сильными природными событиями в их эпицентральной области. Сформулированы цели и задачи исследований, направленных на установление основных закономерностей и механизмов межгеосферных взаимодействий в среде обитания.

*Ключевые слова:* геосферы, геофизические поля, взаимодействие, среда обитания.

**DOI:** 10.31857/S0002333721050033

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эволюционное развитие Земли в целом со всеми ее внутренними и внешними оболочками—геосферами происходит в условиях тесного взаимодействия между ними. При наличии прямых и обратных связей — положительных и отрицательных, а также их комбинаций, интенсивность межгеосферных взаимодействий определяется в целом энергетикой и динамикой эндогенных и экзогенных процессов. При этом эволюционное развитие Земли время от времени сопровождается возникновением в одной из геосфер высокоэнергетического экстремального события вплоть до катастрофического, которое возмущает весь спектр геофизических полей. Более того, такое событие одновременно активизирует процессы межгеосферных взаимодействий, в особенности в области контактных зон между геосферами.

Наибольший интерес для исследований представляет граница между “твердой” Землей и внешними геосферами, поскольку именно на этой границе наблюдаются максимальные массовые и энергопотоки, а в ее окрестности наиболее активно проявляются процессы обмена энергией

между геофизическими полями разной природы [Адушкин, Спивак, 2014].

Важность изучения геофизических процессов, протекающих вблизи земной поверхности, определяется тем, что именно эта область является средой обитания человека, здесь осуществляется его основная деятельность, сконцентрированы источники наиболее опасных для человека природных явлений, эта область играет основную роль в формировании погоды и климата. Здесь под влиянием межгеосферных взаимодействий в системе литосфера—атмосфера—ионосфера происходят процессы, связанные с формированием условий существования человека. Дополнительный интерес к изучению физического состояния приповерхностной зоны Земли связан с установлением роли экстремальных вариаций геофизических полей в указанных процессах. Не случайно исследование всех явлений, протекающих на границе литосфера—гидросфера—атмосфера, объединены в новом, интенсивно развивающемся в последние годы разделе науки “Приповерхностная геофизика” (Near-Surface Geophysics [Slater, 2006]).

Дополнительно следует отметить, что геофизические исследования в приповерхностной об-

ласти Земли существенно облегчены непосредственной доступностью объектов исследований, а также возможностью экспериментальной проверки результатов теоретических исследований. Также немаловажно, что для изучения объектов непосредственной доступности геофизиками разработан к настоящему времени широкий перечень современных методов исследований и регистрирующих комплексов.

С точки зрения локальных проявлений наиболее интенсивно взаимодействие в системе литосфера—атмосфера происходит в период экстремальных событий природного и, вообще говоря, техногенного происхождения. В данной работе в качестве экстремальных событий рассмотрены извержение вулканов, сильные землетрясения, падение космических тел и т.д., сопровождающиеся заметными вариациями естественных геофизических полей, роль которых в межгеосферных взаимодействиях является в ряде случаев определяющей. Действительно, пример вулканических извержений, которые хотя и относительно редки, свидетельствует о значительном увеличении массопереноса между литосферой и атмосферой. Потоки газообразного вещества и твердых частиц в атмосферу порой принимают глобальный характер.

Цель настоящих исследований заключается в установлении проявлений экстремальных природных явлений и процессов в геофизических полях разной природы с установлением общих закономерностей, которые их объединяют.

## 2. ПРОЯВЛЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

В качестве сильных природных явлений, оказывающих преимущественный вклад в процессы взаимодействия геосфер на границе литосфера—атмосфера, следует выделить три группы событий: 1) эндогенного происхождения — вулканы, землетрясения и потоки подземных флюидов; 2) экзогенного происхождения — солнечная активность, проявляющаяся на Земле в виде сильных магнитных бурь, гравитационное взаимодействие в системе Земля—Луна—Солнце и вхождение в атмосферу Земли крупных космических тел и 3) сильные атмосферные явления, проявляющиеся, например, в виде мощных грозových и атмосферных фронтов с экстремальными последствиями в виде ураганов и шквалов и т.д.

Ниже будут рассмотрены некоторые из перечисленных явлений, оказывающих заметное влияние на вариации атмосферного давления, вариации магнитного поля Земли и электрических характеристик приземной атмосферы—напряженности электрического поля и величины атмосферного тока.

### 2.1. Мощные вулканические извержения

Воздействие мощных вулканических извержений на окружающую природную среду сопровождается возникновением в ней целого ряда геофизических эффектов. Так, в атмосфере возникают различного типа акустические волны, в гидросфере — волны цунами в случае прибрежных или подводных извержений, сейсмические колебания в твердой Земле, возмущения электрического и магнитного поля.

Наиболее интенсивные геофизические эффекты и вариации геофизических полей наблюдаются в период вулканических извержений эксплозивного типа. Одним из эффектов воздействия вулканической эксплозии на атмосферу Земли является генерация в ней волновых возмущений в виде аэродинамического шума с частотой  $f$  в диапазоне 20—1000 Гц, акустических импульсов с  $f = 1$ —10 Гц, инфразвука (частотный диапазон 0.003—1 Гц) и длиннопериодных возмущений с  $f < 0.003$  Гц [Адушкин и др., 2020]. При этом особый интерес вызывает образование акустических волн, относящихся к инфразвуковому диапазону, которые распространяются на значительные расстояния, огибая в ряде случаев земной шар, иногда даже неоднократно [Адушкин, Фирсов, 2010].

В качестве примера на рис. 1 приведен инфразвуковой сигнал, вызванный эксплозией вулкана Стромболи 03.07.2019 г. (~14:45 UTC) и зарегистрированный на расстоянии ~2450 км в Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (МНВ). Как это видно из рис. 1, сигнал, прошедший в точку наблюдения в ~17:08:29 UTC, хорошо выделяется в частотном диапазоне 0.001—1 Гц с амплитудой ~1 Па, несмотря на значительное расстояние от источника. Скорость распространения сигнала составила ~290 м/с, что соответствует скорости распространения акустического возмущения в стратосферном волноводе [Куличков и др., 2004].

При общей длительности ~2.5 мин выделяется начальный участок сигнала длительностью ~50 с, который характеризуется периодом колебаний около 20 с. Второй участок сигнала, начиная с ~17:09 UTC характеризуется меньшим периодом ~8 с. Это связано с разделением высокочастотной и низкочастотной моды акустического сигнала при распространении в волноводе. Причем скорость распространения низкочастотной моды несколько превышает скорость распространения более высокочастотной моды [Gossard, Hook, 1975].

Наряду с акустическими эффектами эксплозия вулканов вызывает возмущения геомагнитного поля и электрических характеристик приземного слоя атмосферы: вертикальных компонент напряженности электрического поля  $E$  и атмосфер-

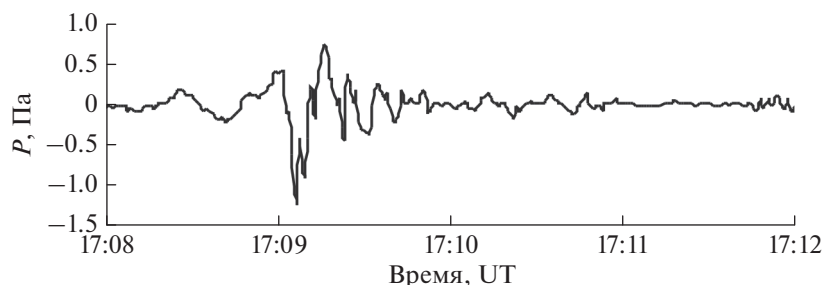


Рис. 1. Инфразвуковой сигнал, вызванный эксплозией вулкана Стромболи 03.07.2019 г. по данным МНВ.

ного тока  $I$ . В качестве примера на рис. 2 представлены эффекты эксплозии вулкана Асо (Япония, 08.10.2016 г, ~10:30 UTC), зарегистрированные в МНВ (расстояние ~7274 км) и в Центре геофизического мониторинга ИДГ РАН (ЦГМ; расстояние ~7288 км). Из рис. 2 видно, что эксплозия вулкана вызвала повышенные вариации  $E$  и  $I$ , а также горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $B_H$  на значительном расстоянии от источника. При этом важно отметить, что указанные возмущения геомагнитного поля и электрических характеристик атмосферы зарегистрированы в период времени, достаточно близкий ко времени эксплозии.

Необходимо также отметить, что помимо возмущений, вызванных собственно эксплозией и регистрируемых на больших расстояниях в этот период, при вулканических извержениях регистрируются вариации магнитного поля и электрических характеристик атмосферы в более поздний период – период прихода акустического сигнала в пункт наблюдений. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты регистрации электрических характеристик приземной атмосферы в период эксплозии вулкана Стромболи (Италия, 03.07.2019 г.) и в период прихода инфразвуковой волны в МНВ.

Из рис. 3 следует, что характер вариаций  $B_H$  и  $E$ , а также их длительность (~50 мин) и амплитуда (5 и 8 нТл) практически одинаковы в период эксплозии вулкана и в период прихода инфразвукового сигнала. Что касается атмосферного тока, то вариации  $I$ , вызванные приходом акустического сигнала, примерно в 4 раза превышают по амплитуде вариации, зарегистрированные в период эксплозии.

## 2.2. Геофизические эффекты землетрясений

Наряду с традиционно рассматриваемым сейсмическим эффектом землетрясения вызывают волновые движения в приземной атмосфере, а также вариации геофизических полей [Гармаш и др., 1989; Голицын, Кляцкин, 1967; Швед и др., 2018]. При этом разделяются эффекты, сопровождаю-

щие распространение сейсмических волн, и эффекты, связанные с очаговой зоной землетрясения [Собисевич, 2020; Собисевич и др., 2020].

Акустические возмущения являются одним из важных эффектов, сопровождающих землетрясения. Издавна известны факты, свидетельствующие о необычных, как считается, инфразвуковых проявлениях, непосредственно перед сильными землетрясениями в их эпицентральной зоне, что приводит, в частности, к изменению поведения живых организмов [Мариковский, 1984]. Акустические возмущения в приземной атмосфере в эпицентральной зоне землетрясения связаны с вертикальными смещениями земной коры в период основного толчка [Шалимов и др., 2019;

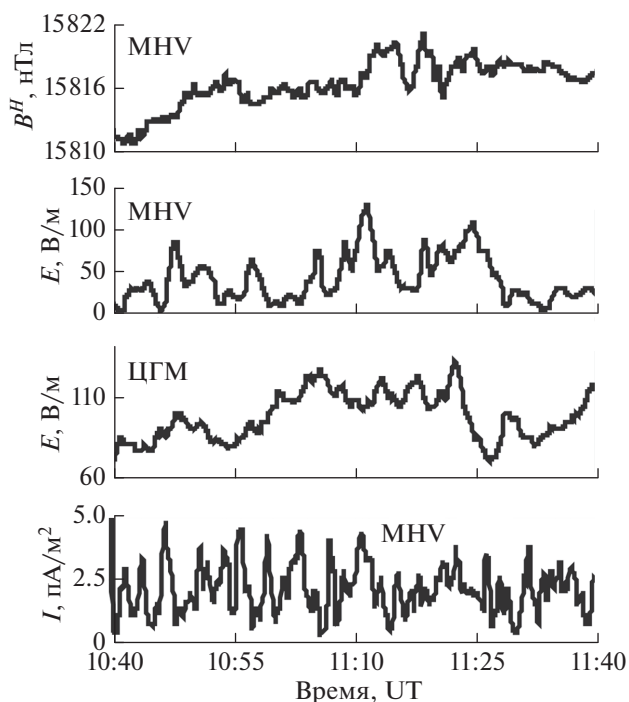
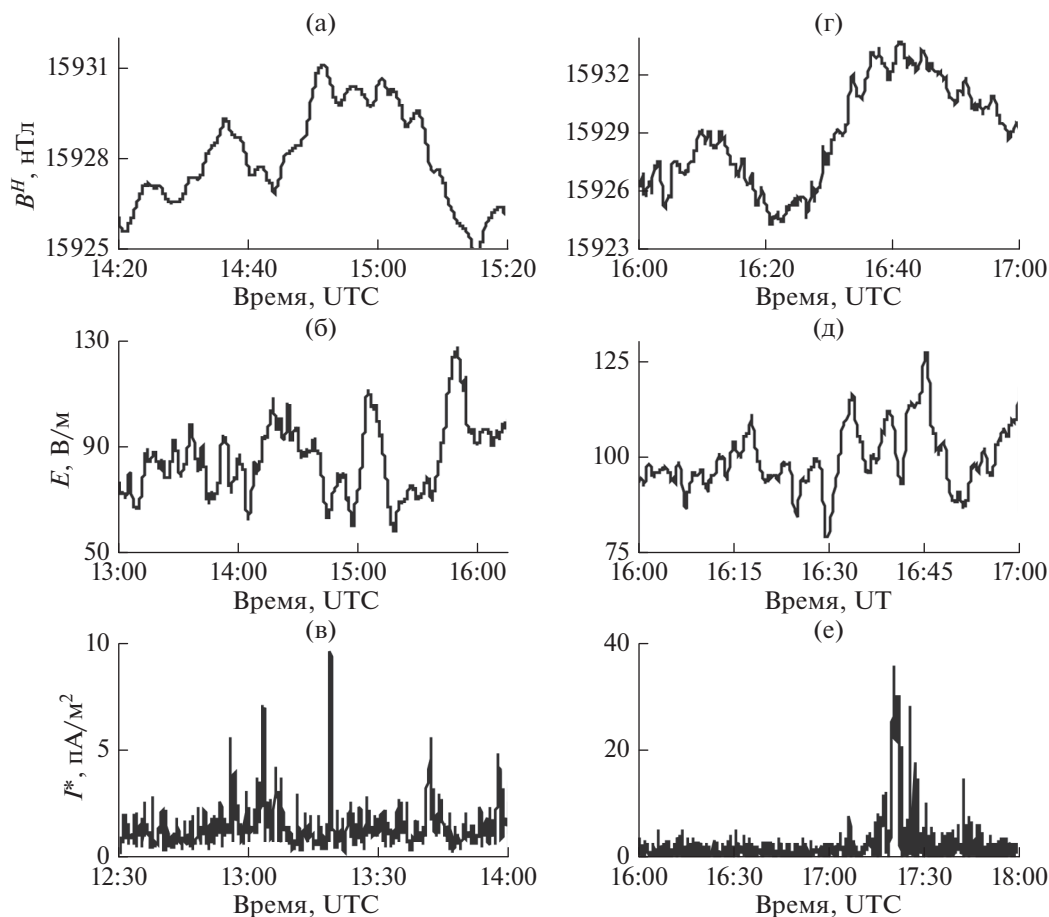


Рис. 2. Возмущение геомагнитного поля, электрического поля и атмосферного тока в период эксплозии вулкана Асо (Япония) 08.10.2016 г. по данным МНВ и ЦГМ.



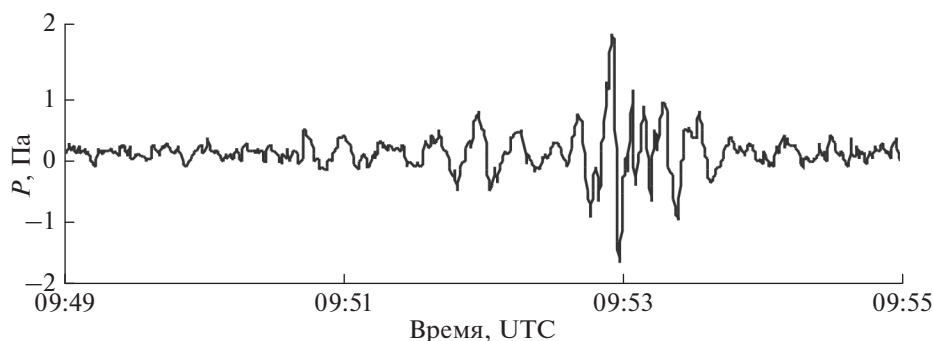
**Рис. 3.** Возмущение геомагнитного поля, электрического поля и атмосферного тока в период эксплозии вулкана Стромболи (а)–(в) и в период прихода инфразвуковой волны (г)–(е). Символом  $I^*$  обозначены вариации модуля вертикальной компоненты атмосферного тока.

Cook, 1971; Takahashi et al., 1994; Jones et al., 2017; Kim et al., 2004; Mutschlecner, Whitaker, 2005]. В пунктах наблюдений, расположенных на разных эпицентральных расстояниях от очага, акустические колебания в атмосфере обусловлены распространением сейсмических волн, также вызывающих вертикальные смещения земной поверхности [Голицын, Кляцкин, 1967; Гохберг, Шалимов, 2008; Volt, 1964]. В этом случае акустический эффект в атмосфере определяется интерференционным сложением акустических сигналов (интеграл Релея), вызванных всеми источниками, а именно: некоррелированными вертикальными движениями на разных участках земной коры вблизи пункта регистрации, участвующими в сейсмическом движении, и вызванными сейсмическим сигналом колебаниями различного рода близкорасположенных объектов (зданий и сооружений). Именно с этим связано часто наблюдаемое на практике несовпадение частотных характеристик сейсмических волн и вызванных ими акустических возмущений в атмосфере. Результаты наших исследований свидетельствуют о том,

что даже на значительных расстояниях от очага землетрясения, где амплитуда сейсмического сигнала достаточно мала, отчетливо регистрируются акустические колебания в атмосфере в периоды прохождения как головных, так и поверхностных сейсмических волн [Спивак, Рыбнов, 2021].

Большой интерес с точки зрения характеристики очага вызывают акустические сигналы, генерируемые в эпицентре землетрясения и распространяющиеся по атмосфере. Имеющиеся данные свидетельствуют, что эти сигналы представляют собой инфразвук и распространяются сложным образом в стратосферном волноводе [Адушкин и др., 2020]. В качестве примера на рис. 4 приведена типичная запись инфразвукового сигнала (данные МНУ), вызванного эпицентральной движением при землетрясении 08.07.2019 г. (Иран,  $m_b = 5.7$ ; время в очаге 07:00 UTC) и распространяющегося по стратосферному волноводу.

Так же, как это отмечалось выше, в сигнале, распространяющемся по волноводу, отчетливо



**Рис. 4.** Волновая форма инфразвукового сигнала, распространяющегося по стратосферному волноводу (результаты регистрации в MNV).

выделяются два участка: первый длительностью ~2 мин характеризуется периодом ~20 с и следующий за ним длительностью также ~2 мин, но с большей амплитудой и заметно меньшим характерным периодом (~7 с).

*Геомагнитные возмущения*, вызванные землетрясениями, в большинстве своем имеют аперриодический характер и наиболее ярко проявляются в период самого события [Спивак, Рябова, 2019а]. В качестве примера на рис. 5 приведены записи геомагнитных вариаций, полученные в магнитных обсерваториях сети ИНТЕРМАГНЕТ, расположенных на разных эпицентральных расстояниях  $R$  от очага сейсмического события (табл. 1), в период землетрясения в Индонезии 15.04.2018 г. ( $M = 6.0$ ; время в очаге ~19:30 UTC).

Из рис. 5 следует, что практически одновременно на всех обсерваториях за ~12–15 мин до основного толчка регистрируется начало аномальных вариаций наиболее чувствительной к внешним воздействиям горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $B_x$ . Максимум вариаций приходится на период после основного толчка. При этом характер вариаций и их максимальная амплитуда примерно одинаковы, несмотря на большую разницу в расстояниях до очага (табл. 1).

*Возмущение электрических характеристик приземной атмосферы.* Результаты анализа данных инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что землетрясения, особенно сильные, сопровождаются вариациями не только электрического поля, но также атмосферного тока в приземной атмосфере, причем на значительных расстояниях от очага сейсмического события. При этом отклик электрических характеристик атмосферы наблюдается как в период основного толчка, так и в предшествующий ему период, связанный с заключительной стадией подготовки очага. В качестве примера рассмотрим вариации  $E$  и  $I$ , зарегистрированные в период разрушительного землетрясения в Албании 26.11.2019 г. ( $M = 5.2$ ; время в очаге 02:59 UTC).

На рис. 6 приведены вариации вертикальных компонент электрического поля и атмосферного тока в период рассматриваемого события.

Из рис. 6 видно, что примерно в 02:55 UT напряженность электрического поля начинает достаточно резко возрастать и в целом возмущение  $E$  характеризуется положительной бухтообразной вариацией с максимальной амплитудой ~70 В/м и длительностью ~15 мин.

**Таблица 1.** Пункты геомагнитных наблюдений

Наименование	Код	Географ. координаты, град		$R$ , км	$B_x$ , нТл
		Широта	Долгота		
Бельск (Польша)	BEL	51.84	20.79	~11200	~5
Борок (РФ)	BOX	58.07	38.23	~10130	~6
Иркутск (РФ)	IRT	52.27	104.45	~6810	~3
Киев (Украина)	KIV	50.72	30.3	~10530	~4
Михнево (РФ)	MNV	54.94	37.73	~10120	~5
Новосибирск (РФ)	NVS	54.85	83.23	~7690	~2
С.-Петербург (РФ)	SPG	60.54	29.72	~10710	~6
Хабаровск (РФ)	KNB	47.61	134.69	~6370	~2

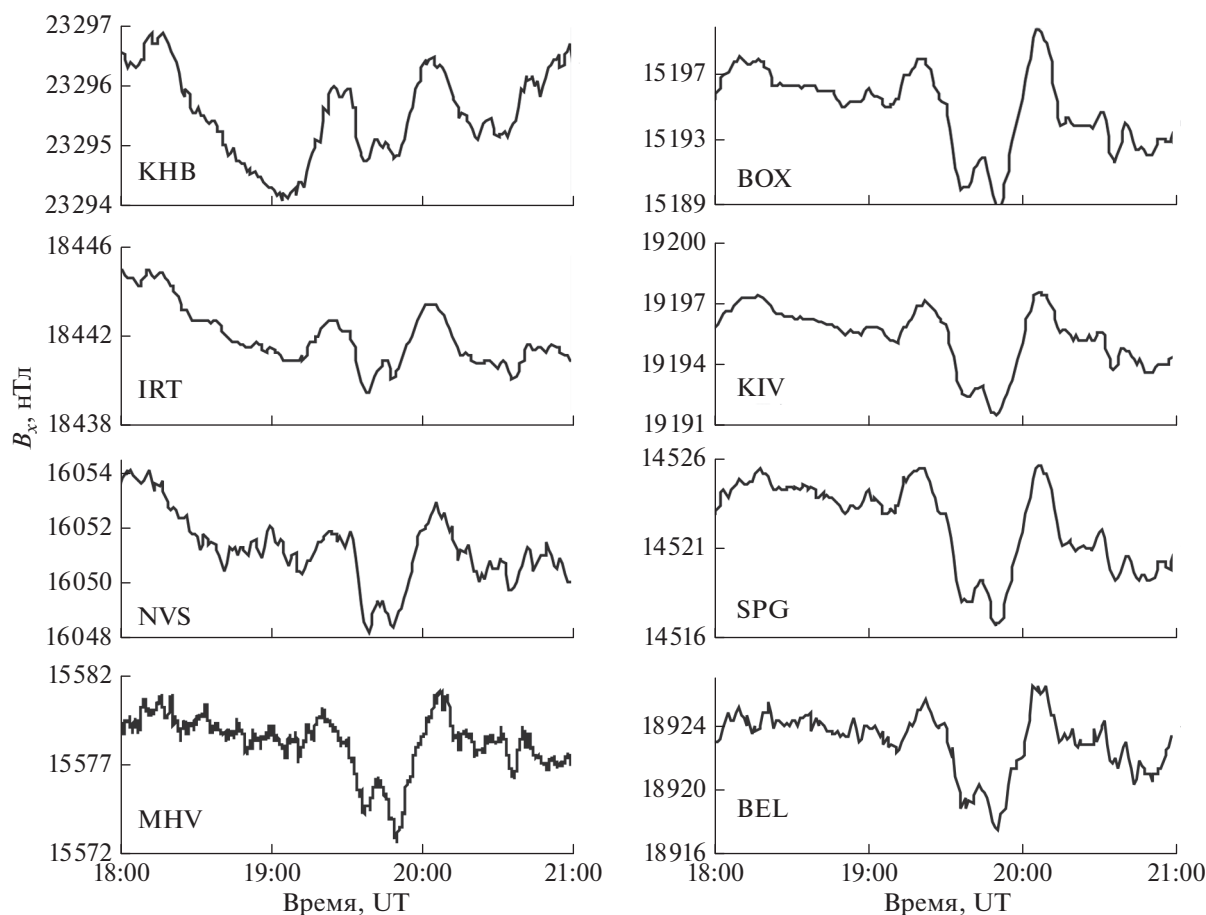


Рис. 5. Вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля в период землетрясения в Индонезии 15.04.2018 г. по данным сети ИНТЕРМАГНЕТ.

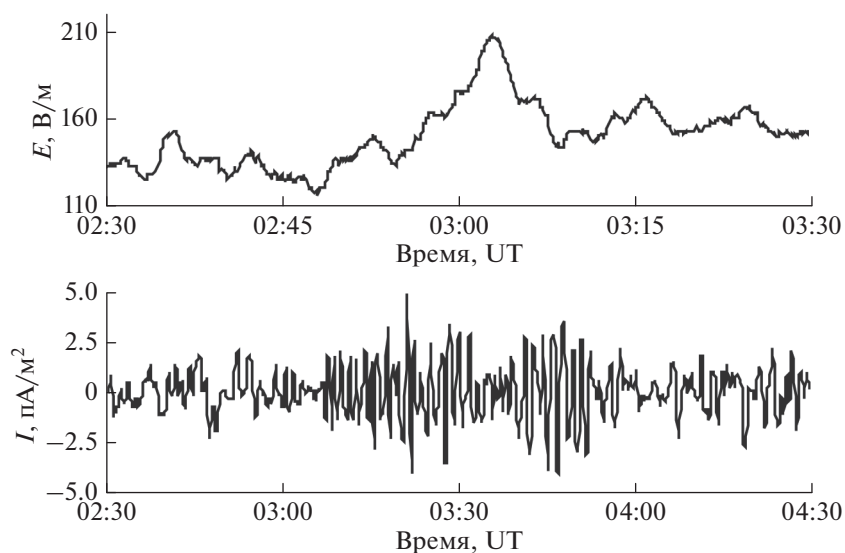


Рис. 6. Вариации вертикальных компонент электрического поля  $E$  (данные ЦГМ) и атмосферного тока  $I$  (данные МНУ) в период землетрясения в Албании 26.11.2019 г. (расстояние ЦГМ и МНУ от очага соответственно  $\sim 24060$  и  $\sim 2010$  км).



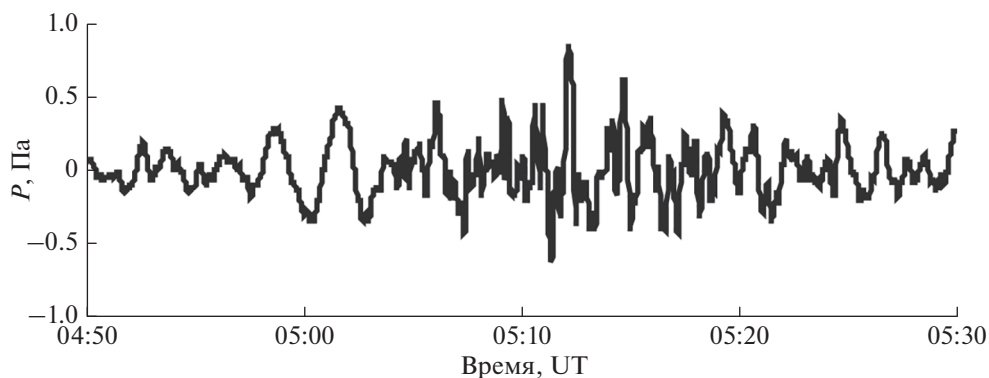


Рис. 7. Волновая форма акустического сигнала, зарегистрированного в МНУ при падении Челябинского болида.

Как это следует из рис. 6, отклик атмосферного тока на землетрясение в виде повышенных амплитуд регистрируется в  $\sim 03:08$  UTC и характеризуется длительностью  $\sim 45$  мин. При этом в период вызванных вариаций заметно изменяются спектральные характеристики вариаций  $I$ : преимущественная частота вариаций в период землетрясения составляет  $\sim 1$  Гц, в то время как в предшествующий период невозмущенного состояния атмосферы частота естественных вариаций составляет  $\sim 0.3$  Гц.

### 2.3. Воздействие падений космических тел на геофизические поля

Падение космических тел на Землю сопровождается сильными атмосферными явлениями, которые проявляются нагревом и свечением воздушных масс, образованием ударной, а затем и акустической волны и т.д. В свою очередь это вызывает возмущение геофизических полей [Катастрофические..., 2014]. Инструментальные наблюдения за вызванными вариациями геофизических полей позволяют получить важную информацию о характере воздействия космических тел на атмосферу Земли, а также сформировать количественную основу для верификации теоретических и численных моделей, разрабатываемых для описания реакции внешних геосфер на сильные локальные возмущения и уточнения механизмов взаимодействия и преобразования полей Земли разной природы.

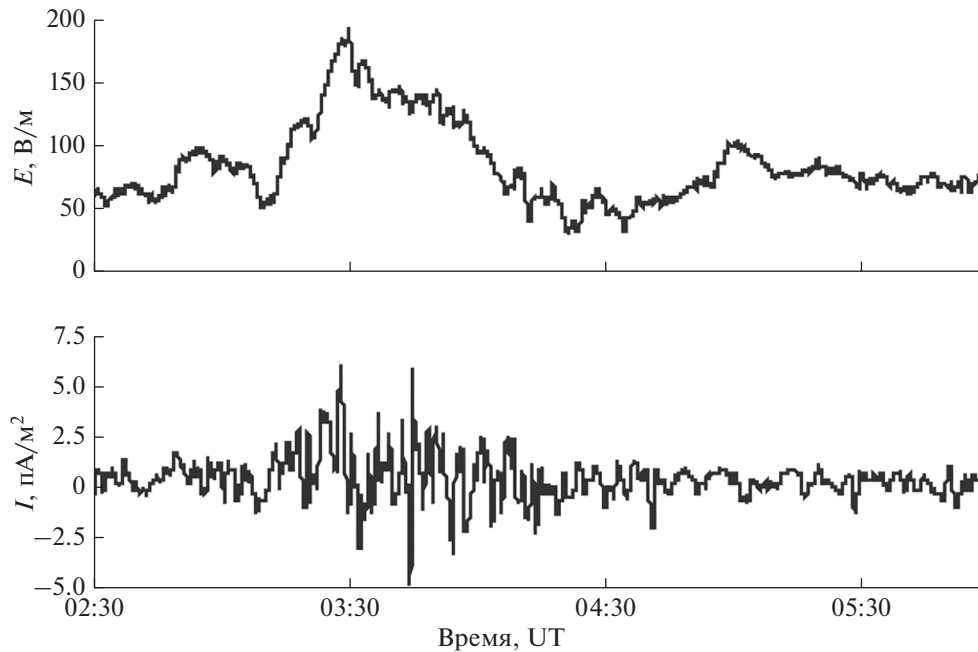
Известные исследования посвящены большей частью описанию локальных эффектов, вызванных падением космических тел [Адушкин и др., 2004; Бернгардт и др., 2013; Кузьмичева, Лосева, 2010; Кузьмичева и др., 2014; Немчинов и др., 1999; Рыбнов и др., 2014; Светцов и др., 2014; Черногор, 2009; 2018; Adushkin, Nemchinov, 1994; Beech, Forschini, 1999; Bronshten, 1983; и др.]. Нас же заинтересовали геофизические эффекты, про-

являющиеся на значительном удалении от места падения либо места взрыва космического тела.

*Акустический эффект.* Результаты инструментальных наблюдений показывают, что сформированный при взрыве болида акустический сигнал хорошо регистрируется на больших расстояниях. Так, например, при взрыве Челябинского болида (15.02.2013 г.), взорвавшегося на высоте  $\sim 30$  км в  $\sim 03:17$  UTC [Бернгардт и др., 2013], в МНУ (расстояние  $\sim 1510$  км от места взрыва) зарегистрирован инфразвуковой сигнал достаточно высокой амплитуды  $\sim 40$  Па (рис. 7). При этом в  $\sim 04:58$  UTC зарегистрирован приход длиннопериодной моды (период  $\sim 2.8$  мин), а затем в  $\sim 05:04$  UTC — короткопериодной (период  $\sim 0.8$  мин).

*Вариации электрических характеристик атмосферы.* Вариации электрического поля и атмосферного тока при падении космического тела рассмотрим также на примере Челябинского болида. Взрыв болида вызвал аномальные вариации напряженности электрического поля и атмосферного тока в приземной атмосфере. На рис. 8 приведены вариации  $E$  и  $I$  в периоды вхождения в атмосферу и взрыва болида. Хорошо видно, что вызванные возмущения  $E$  и  $I$  зарегистрированы практически сразу после взрывного разрушения космического тела. Причем амплитуды вызванных вариаций представляются весьма значительными, несмотря на достаточно большое расстояние от места взрыва. Действительно, вариация напряженности электрического поля в виде положительной бухты составляет почти  $50$  В/м. Также значительной выглядит амплитуда вариаций атмосферного тока ( $\sim 6$  нА/м<sup>2</sup>).

*Вариации магнитного поля при падении болидов.* Вызываемые взрывом болида плазменные образования и ударные волны сопровождаются нарушением естественных токов в ионосфере, что приводит к локальным, а в конечном итоге глобальным вариациям геомагнитного поля [Спивак, Рябова, 2019б]. Геомагнитный эффект от падения и взрыва болидов регистрируется на значитель-



**Рис. 8.** Вариации вертикальных компонент напряженности электрического поля  $E$  и атмосферного тока  $I$  в период падения Челябинского болида.

ных расстояниях и практически на всех широтах. В качестве примера на рис. 9 приведены геомагнитные вариации, зарегистрированные на некоторых геомагнитных станциях сети ИНТЕРМАГНЕТ и в МНУ в период падения и взрыва Липецкого болида 21.06.2018 г. (примерное время взрыва 01:30 UTC).

Из рис. 9 следует, что взрыв болида вызвал бухтообразное понижение горизонтальной компоненты магнитного поля Земли на фоне суточного хода. При этом длительность и амплитуда вызванных вариаций не сильно зависят от расстояния и находятся соответственно в пределах 11–15 мин и 2–5 нТл.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перечень источников, вызывающих возмущение геофизических полей, не ограничивается рассмотренными природными процессами. Сильные грозовые явления и атмосферные явления в виде ураганов и шквалов также сопровождаются акустическими эффектами, геомагнитными вариациями и вариациями электрических характеристик приземной атмосферы. Однако, несмотря на высокие амплитуды этих вариаций (например, при прохождении грозовой ячейки амплитуда вариаций  $E$  может превышать 10 кВ), эффекты являются локальными, вызванные возмущения не распространяются на большие расстояния и, таким образом, не вносят заметного вклада в глобальный процесс межгеосферных

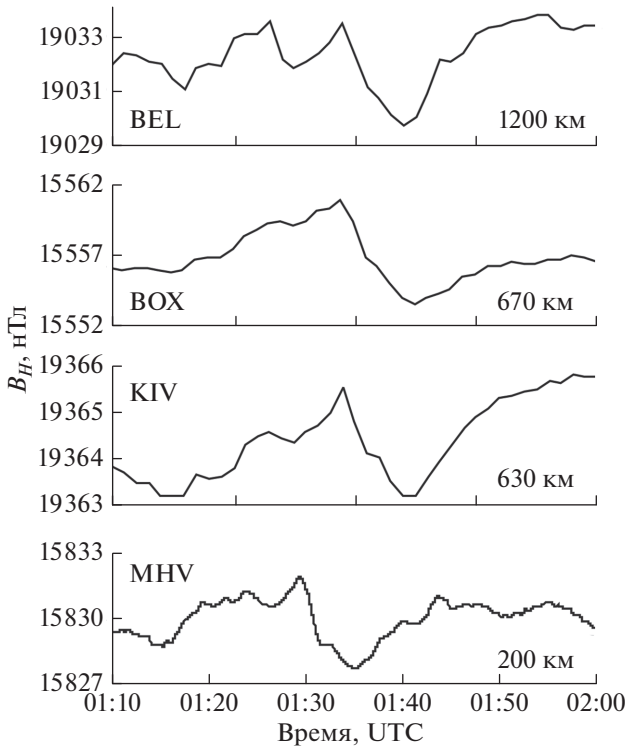
взаимодействий. Также как и процессы техногенного происхождения, например, технологические и аварийные взрывы, крупные пожары и т.д., которые наблюдаются все чаще вследствие развивающейся цивилизации.

Рассмотренные выше возмущения геофизических полей, вызванные сильными природными источниками, являются, как мы убедились, глобальными. И хотя амплитуды вызванных геофизических эффектов в ряде случаев малы, их анализ имеет важное информационное значение как в плане всестороннего описания природных явлений, так и с точки зрения установления источников и механизмов преобразования и взаимодействия геофизических полей и, в конечном итоге – межгеосферных взаимодействий.

Анализируя результаты инструментальных наблюдений, следует отметить следующие общие характерные особенности геофизических эффектов, сопровождающих сильные природные явления: 1) эффекты регистрируются на значительных расстояниях от источника возмущений, что и определяет вышеупомянутый их глобальный характер; 2) геомагнитные вариации и вариации электрических характеристик приземной атмосферы наблюдаются на больших расстояниях практически в период самих природных явлений, что можно объяснить высокой скоростью распространения возмущений.

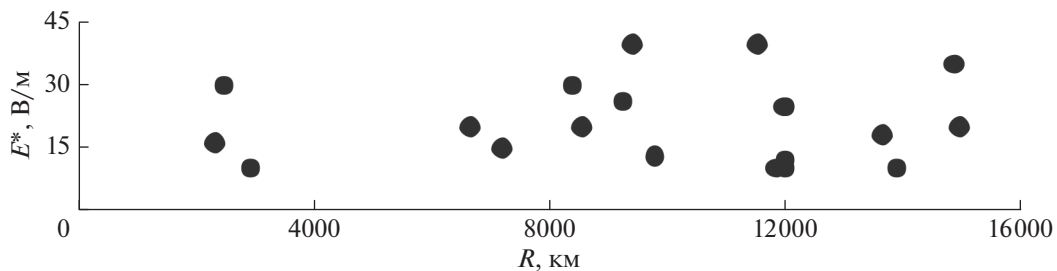
Дополнительно следует отметить отсутствие значимой зависимости амплитудных характеристик вызванных геомагнитных вариаций и вариаций





**Рис. 9.** Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля Земли в период падения и взрыва Липецкого болида 21.06.2018 г. (расстояние до места взрыва болида приведено в поле рисунков).

ций электрических характеристиках атмосферы от расстояния  $R$ . В качестве примера на рис. 10 приведены амплитуды вызванных вариаций напряженности электрического поля  $E^*$  в диапазоне расстояний от 2000 до 15000 км при 20 землетрясениях с магнитудой 6.5–7.5. Видно, что, несмотря на значительную разницу в расстояниях, величина  $E^*$  находится в узком диапазоне 10–40 В/м. Согласно данным работы [Спивак, Рябова, 2019а], амплитуда геомагнитных вариаций на разных эпицентральных расстояниях от очагов землетрясений разной магнитуды по данным гео-



**Рис. 10.** Зависимость амплитуды вариаций вертикальной компоненты электрического поля от расстояния при землетрясениях (20 событий) магнитудой в диапазоне 6.5–7.5.

магнитных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ также заключена в узком диапазоне 2–5 нТл.

Аналогичное заключение можно сделать по данным работы [Спивак, Рябова, 2019б], согласно которым, например, для Румынского болида амплитуда геомагнитных вариаций для всех среднеширотных станций сети ИНТЕРМАГНЕТ, расположенных на значительно отличающихся расстояниях от источника возмущений, составляет 2.8–5 нТл.

С учетом вышеизложенного можно сделать предположение о том, что основным проводником передачи возмущения магнитного поля и электрических характеристик атмосферы на большие расстояния является ионосфера. В этом случае в качестве одного из наиболее вероятных механизмов возбуждения ионосферы можно рассматривать воздействие акустико-гравитационных волн, генерируемых сильными природными событиями в их эпицентральной области. Действительно, воздействие акустико-гравитационных волн на ионосферу вызывает в ней магнито-гидродинамические волны, которые распространяются по ионосфере с большой скоростью (~20 км/с) [Сорокин, Федорович, 1982]. В этом случае вызванные возмущения геофизических полей регистрируются на значительных расстояниях практически в период самого события (время распространения акустических колебаний от земной поверхности до ионосферы составляет ~5–7 мин в зависимости от термодинамического состояния атмосферы и высоты активного слоя ионосферы). С учетом сложной структуры очага геофизического события (землетрясения, эксплозия вулканов) в нем могут предварительно развиваться определенные процессы подготовки этого события, поэтому возможна генерация акустических волн также за некоторое время до самих событий, что объясняет наблюдаемые в ряде случаев возмущения геофизических полей, например, до основного толчка перед землетрясениями.

Следует отметить, что известные механизмы аномалий геофизических полей, вызванных

сильными природными процессами, не объясняют в полной мере выявленные во многих случаях резкие и отличающиеся по характеру изменения хода геофизических полей в периоды сильных природных явлений, что определяет актуальность и необходимость дальнейшего проведения инструментальных исследований. Помимо накопления фактического материала возникает необходимость в решении ряда задач, связанных с разработкой подходов и конкретных моделей воздействия акустико-гравитационных волн на ионосферу и определения количественных последствий этого воздействия в виде формирования особого рода плазменных структур, которые способны распространяться по ионосфере с высокими скоростями на значительные расстояния. В качестве других задач следует рассматривать разработку теоретических и расчетных моделей процессов, связанных с формированием откликов магнитного поля и электрических характеристик атмосферы на сильные природные события, очаги которых расположены в верхней части литосферы. Но все это — предмет дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение геофизических полей и их вариаций представляется весьма важным при решении ряда задач, связанных с установлением характеристик природных явлений и процессов, установлением источников аномального поведения полей и условий, определяющих взаимодействие между геосферами.

Представляется, что экстремальные природные явления в виде землетрясений, вулканических извержений, падения крупных космических тел и т.д. являются своеобразными каналами повышенной интенсивности межгеосферных взаимодействий. Именно в периоды экстремальных природных явлений особенно ярко проявляются процессы обмена массой и энергией в системе литосфера—атмосфера—ионосфера, что существенно облегчает определение общих условий, в которых протекают геофизические процессы на Земле, а также, по возможности, предупреждать негативные последствия эволюционного развития планеты. Особо это относится к приповерхностной зоне Земли, в которой осуществляется вся жизнедеятельность человека, и в которой человек оказывает максимальное воздействие на природу. В связи с этим следует больше внимание уделять исследованиям, направленным на установление перспектив преобразования среды обитания, а в более широком смысле — биосферы. Объединить такие исследования можно под маркой геофизической экологии.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН (тема АААА-А-19-119021890067-0, шифр темы 0146-2019-0009).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Попова О.П., Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Мальцев А.Л., Харламов В.А.* Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2022 г. // Докл. РАН. 2004. Т. 397. № 5. С. 685–688.
- Адушкин В.В., Спивак А.А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС. 2014. 360 с.
- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А.* Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2020. 332 с.
- Адушкин В.В., Фирсов П.П.* Особенности эксплозивных процессов вулканических извержений и их проявление в волновых возмущениях в атмосфере. Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. М.: ИФЗ РПАН. 2010. С. 264–268.
- Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Жеребцов Г.А., Михалев А.В., Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматулин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г.* Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Докл. РАН. 2013. Т. 452. № 2. С. 205–207.
- Гармаш С.В., Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Швед Г.М.* Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1989. № 12. С. 1290–1299.
- Голицын Г.С., Кляцкин В.И.* Колебания в атмосфере, вызванные движениями земной поверхности // Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3. № 10. С. 1044–1052.
- Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 296 с.
- Катастрофические воздействия космических тел /* Под ред. Адушкина В.В., Немчинова И.В. М.: ИКЦ “Академкнига”. 2005. 310 с.
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В.* Оценка геомагнитного эффекта при Тунгусском событии 1908 г. Динамические процессы в геосферах. М.: ГЕОС. 2010. С. 261–269.
- Кузьмичева М.Ю., Лосева Т.В., Ляхов А.Н.* Ионосферный эффект Челябинского события. Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. М.: ГЕОС. 2014. С. 86–95.
- Куличков С.Н., Авилов К.В., Буш Г.А. и др.* Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т.40. № 1. С. 3–12.
- Мориковский П.И.* Животные предсказывают землетрясения. Алма-Ата: Наука. 1984. 144 с.
- Немчинов И.В., Лосева Т.В., Меркин В.Г.* Оценка геомагнитного эффекта при падении Тунгусского метеороида. Физические процессы в геосферах: их проявления и взаимодействие. М.: ИДГ РАН. 1999. С. 324–338.
- Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А.* Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления. Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. М.: ГЕОС. 2014. С. 78–85.
- Светцов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П., Шувалов В.В.* Падение Челябинского метеорита — типичное собы-

тие в истории Земли. Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. М.: ГЕОС. 2014. С. 7–20.

Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 1982. 136 с.

Собисевич Л.Е. Сейсмогравитационные процессы и гравимагнитные возмущения – спутники геофизических катастроф // Геофизика. 2020. № 1. С. 70–76.

Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В. Сейсмогравитационные процессы, сопровождающие эволюцию сейсмофокальных структур литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 1. С. 53–61.

Спивак А.А., Рябова С.А. Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019а. № 6. С. 3–12.

Спивак А.А., Рябова С.А. Геомагнитные вариации при падении метеоритов // Геомагнетизм и аэрономия. 2019б. Т. 59. С. 655–665.

Спивак А.А., Рыбнов Ю.С. Акустические эффекты сильных землетрясений // Физика Земли. 2021. № 1.

Черногор Л.Ф. Физические процессы, сопутствующие пролету Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Вестник астрономической школы. 2009. Т. 6. № 1. С. 30–43.

Черногор Л.Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 2. С. 267–280.

Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // Физика Земли. 2019. № 1. С. 180–198.

Швед Г.М., Голицын Г.С., Ермоленко С.И., Кукушкина А.Е. Связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 3. С. 315–319.

Adushkin V.V., Nimchinov I.V. Consequences of impacts of cosmic bodies on the surface of the Earth. Hazards due to Comets and Asteroids / Ed. T. Gehrels. Tucson; London: Univ. Arizona Press. 1994. P. 721–778.

Beech M., Foschini L.A. A space charge model for electrophonic busters // Astron. Astrophys. 1999. V. 345. L27–L31.

Bolt B.A. Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake // Nature. 1964. V. 202. P. 1095–1096.

Bronshten R.P. A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs // Sol. Sys. Res. 1983. V. 17. P. 70–74.

Cook R.K. Infrasound radiated during the Montana earthquake of 1959 August 18 // Geophys J. R. Astr. Soc. 1971. V. 26. P. 191–198.

Gossard E.A., Hook W.H. Waves in the atmosphere. Amsterdam; Oxford; N.Y.: Elsevier Sci. Publ. Comp. 1975. 456 p.

Jones R.M., Ostrovsky L.A., Bedart A.J. Ionospheric effects of magneto-acoustic-gravity waves: dispersion relation // J. Atmosph. And Solar-Terrestrial Physics. 2017. V. 159. P. 7–22.

Muschlecner J.P., Whitaker R.W. Infrasound from earthquakes // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. D01108.

Slater L. Near-surface geophysics. A new focus group // EOS. 2006. V. 87. № 25. P. 249.

Takanashi Y., Koyama Y., Isei T. In situ measured infrasound at Sapporo associated with an earthquake occurring offshore in southwest Hokkaido on July 12, 1993 // J. Acoust. Soc. Japan. 1994. V. 15. P. 409–411.

## Impact of Natural Extreme Events on Geophysical Fields in the Environment

V. V. Adushkin<sup>a</sup> and A. A. Spivak<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: aaspivak100@gmail.com*

The paper discusses the effects of strong natural events on the acoustic fields in the atmosphere, on the geomagnetic field, and on the electrical characteristics of the atmospheric surface layer—atmospheric current and electric field. The extreme events covered by the work are volcanic eruptions, earthquakes, and impacts of cosmic bodies falling to the Earth. These natural phenomena are considered as local indicators of enhanced interactions between the geospheres in the lithosphere—atmosphere near-surface system with active involvement of the ionosphere. It is shown that in these cases, the induced effects in the geophysical fields are observed at quite a distance from an event source and have similar amplitudes, which may testify to a special role of the ionosphere in a rapid long-distance transfer of the disturbances. As the main excitation mechanism of the ionosphere, the effect of the acoustic-gravity waves generated by the strong natural events in their epicentral zone is considered. The objectives and tasks of the research aimed at establishing main regularities and interaction mechanisms between the geospheres in the environment are formulated.

*Keywords:* geospheres, geophysical fields, interaction, environment