

УДК 550.3; 550.4

ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОСФЕР И ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

© 2019 г. В. В. Адушкин¹, А. А. Спивак^{1*}

¹Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 07.05.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Сформулированы и обсуждаются основные перспективные направления и задачи исследований в рамках нового, активно развивающегося в настоящее время научного направления «Приповерхностная геофизика». Предложен комплексный подход к изучению межгеосферных взаимодействий на границе земная кора–атмосфера, где осуществляется наиболее интенсивный массо- и энергообмен между внутренними и внешними геосферами, а также взаимодействий и преобразований геофизических полей в приповерхностной зоне Земли, включающей ее биосферу. Представлен ряд новых результатов, полученных при исследовании процессов взаимодействия геосфер и физических полей Земли. Подчеркивается важность установления как геофизических условий среды обитания человека, так и характеристик его техногенной деятельности.

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

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-3337201914-15>

ВВЕДЕНИЕ

Геофизика как комплексная наука включает в себя ряд научных направлений, отличающихся предметом и методами исследований. Среди многих других направлений в геофизике нами особо выделена «Приповерхностная геофизика» – направление, не так давно выделившееся в самостоятельное и имеющее в качестве объекта исследований явления и процессы, протекающие в приповерхностной зоне Земли, которая включает область земной коры до глубин ~ 10 км и приповерхностный слой атмосферы толщиной ~ 10 км. Важность и актуальность исследований, выполняемых в рамках приповерхностной геофизики, обусловлены рядом причин. Прежде всего, следует отметить тот факт, что исследования в этом случае выполняются в окрестности наиболее контрастной межгеосферной границы Земли, которая разделяет внутренние геосферы, сложенные плотным веществом, что не допускает значительных его перемещений, и внешние, представленные атмосферой с существенно более низкой плотностью и отличающейся значительными перемещениями воздушных масс, а также верхними геосферами Земли в виде ионосферы и магнитосферы. По сравнению с другими межгеосферными

границами именно на границе земная кора – атмосфера происходит наиболее интенсивный обмен массой и энергией, и, следовательно, наиболее интенсивно протекают межгеосферные взаимодействия [Адушкин, Спивак, 2014; Новик, 2001; Резанов, 2002].

Другой важной особенностью приповерхностной геофизики является то, что она объединяет исследования, выполняемые вблизи земной поверхности в рамках ряда смежных наук, где осуществляется основная человеческая деятельность, и таким образом это направление исследований имеет непосредственное отношение к среде обитания человека, а, если смотреть шире, – биосфере. Пожалуй, это единственное направление в геофизике, в котором биосфера представлена в явном виде. Здесь следует добавить, что именно в приповерхностной области Земли концентрируются наиболее опасные для человека явления как природного, так и техногенного происхождения. При этом важно отметить, что в последнее время техногенная составляющая геофизических явлений в среде обитания постоянно увеличивается.

В целом, Земля со всеми геосферами и геофизическими полями представляет собой единую динамическую систему, элементы которой

не могут существовать независимо и вынуждены взаимодействовать между собой, обмениваясь массой и энергией. Весьма важным элементом таких взаимодействий являются геофизические поля, а именно: гравитационное, тепловое, электрическое и магнитное поле Земли, поля эманаций подземных флюидов, сейсмические и акустические колебания и т. д.

Также вызывает интерес взаимодействие геофизических полей и преобразование энергии одного из полей в энергию поля другой природы, посредством чего в большинстве случаев и осуществляются межгеосферные взаимодействия. Изучая поведение геофизических полей в разных условиях и закономерности, определяющие корреляционные соотношения между вариациями полей разной природы, можно устанавливать механизмы межгеосферных взаимодействий. Другая важная роль геофизических полей связана с возможностью их инструментальных наблюдений и использования получаемых при этом данных для характеристики явлений и процессов, которые не поддаются измерениям.

Изучение вопросов, связанных с взаимодействием и преобразованием геофизических полей позволяет не только устанавливать причины и механизмы межгеосферных взаимодействий, но, что важно, приближаться к решению конкретных практических задач, таких как: оценка физико-механических свойств среды и направленности их изменений, определение преимущественной направленности потоков энергии и массы, прогнозирование сильных атмосферных явлений, а также их негативных и катастрофических последствий и т. д. Выполняемые на основе этого поиски и обоснования механизмов взаимодействий между геосферами необходимы для разработки моделей геофизических явлений и процессов. При этом наряду с установлением синхронизма немаловажным является обоснование причинно-следственных связей между ними.

Широкий охват проблем определяет и широкий круг задач, стоящих перед приповерхностной геофизикой, в перечень которых наряду с установлением общих закономерностей взаимодействия геосфер и физических полей входит также разработка новых подходов к изучению проявлений глобальных явлений и процессов в геофизических полях, что дает возможность не только более детально исследовать закономерности их развития, но и получать новые знания, например, о внутреннем строении Земли и динамике внутренних

геосфер. Предполагается шире использовать возможности спутникового позиционирования на основе систем ГЛОНАСС и GPS для получения фактических данных не только о движении отдельных участков земной коры, что в известной мере уже налажено, но, что особенно важно, – выделения скрытой информации о таких важных информационно насыщенных процессах как эффекты лунно-солнечного прилива и собственные колебания Земли. Правда, при этом следует иметь в виду, что при всей информативности и привлекательности спутниковых наблюдений важным направлением в геофизических исследованиях является развитие и совершенствование наземных инструментальных наблюдений, более простых в осуществлении и предоставляющих широкие возможности для непрерывной регистрации в отдельно взятых пунктах наблюдений. Количество таких пунктов можно наращивать, создавая более плотную наблюдательную сеть, в результате чего появится возможность детального изучения пространственных характеристик геофизических явлений и процессов, протекающих в среде обитания человека. Здесь уместно отметить, что основной акцент в геофизических исследованиях необходимо делать на организации и проведении инструментальных наблюдений – основного источника экспериментального материала, без которого очень сложно решать задачи, связанные с поиском причин и механизмов взаимодействий в геофизических системах и разработкой их теоретических моделей.

С учетом отмеченного комплексного подхода к решению геофизических задач следует рассматривать приповерхностную геофизику как междисциплинарную науку, которая объединяет в себе элементы сейсмодинамики, электродинамики, гидродинамики и общей физики Земли.

Важно, что рассматриваемое научное направление «Приповерхностная геофизика» зародилось в недрах ИФЗ (Спецсектор ИФЗ) и развивается в настоящее время в Институте динамики геосфер РАН, который организован на базе Спецсектора ИФЗ и по существу и идеологически представляет собой фактически одну из структур ИФЗ РАН. Следует отметить, что коллектив исследователей в ИФЗ РАН на протяжении длительного периода времени успешно занимался, например, проблемами преобразования сейсмической энергии в энергию электромагнитных колебаний. В этой связи необходимо отметить хорошо известные работы Гершензона Н.И., Гохберга М.Б., Гульельми А.В.,

Моргунова В.А. и др. [Гершензон и др., 1993; Гохберг и др., 1987; 1988; Гульельми, Рубан, 1990; Гульельми, Левшенко, 1994; и др.]. Авторы настоящей публикации также начинали исследования, связанные с межгеосферными взаимодействиями, в ИФЗ РАН и продолжают их в ИДГ РАН.

В настоящем материале рассмотрены основные задачи и сделана попытка сформулировать, не претендуя на общность, наиболее важные направления исследований в области приповерхностной геофизики. При этом рассматривается случай межгеосферных взаимодействий в зоне соприкосновения континентальных зон земной коры с атмосферой, поскольку взаимодействие между океанической поверхностью и атмосферой имеет свои специфические особенности. И в этом случае необходимо проводить специальные исследования.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние годы нами выполнен ряд работ, результаты которых существенно расширяют сложившиеся ранее представления о проблеме межгеосферных взаимодействий и взаимодействия геофизических полей [Адушкин, Спивак, 2014]. Работы основаны на анализе экспериментальных данных, получаемых в результате инструментальных наблюдений, проведенных в Геофизической обсерватории «Михнево» (ГФО МНВ) и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН [Спивак и др., 2016]. Значительный объем накопленных данных позволил не только получить новую информацию, касающуюся вариаций геофизических полей, но также характеристики, описывающие взаимное влияние геофизических полей и ряда взаимодействующих природных процессов.

Преобразование энергии сейсмических колебаний в энергию электрического поля

Несмотря на то, что со времени первых наблюдений за возникновением вариаций электрического поля в горных породах под действием упругих колебаний – сейсмоэлектрического эффекта [Thompson, 1936] прошло уже более 80 лет, интерес к нему не ослабевает и в настоящее время. Это связано со все возрастающей необходимостью разработки новых, более совершенных методов и способов описания строения земной коры и диагностики ее геодинамического состояния. Действительно, интенсивность преобразования

энергии колебаний среды в энергию электрического поля во многом определяется не только электрофизическими свойствами среды, но также ее структурой и характеристиками ее напряженно-деформированного состояния [Мигунов, 1984]. Регистрируя отклик среды на сейсмическое воздействие в виде вариаций напряженности электрического поля и генерации электрических сигналов¹ (рис. 1), допустимо говорить об изменении ее свойств, напряженного состояния и характера деформаций [Mikhailov et al., 1997; Zhu, Toksoz, 2005]. Особое значение это имеет при определении степени современной активности разломных зон, выделении их активных участков, а также оценке изменений механических свойств среды, поскольку в большей степени сейсмоэлектрический эффект проявляется на ее неоднородностях [Кочарян, 2016; Соловьев, Спивак, 2006; Thompson, Gist, 1993].

Несмотря на известные успехи в разработке теоретических моделей, описывающих генерацию электрических возмущений при распространении сейсмических волн [Назарный, Комаров, 2001; Неновски, Бойчев, 2004; Светов, 2000; Соболев, Демин, 1980; Соловьев, Спивак, 2009], и наличие, правда, немногочисленных наблюдений за сейсмоэлектрическим эффектом [Адушкин и др., 2016а; Okubo et al., 2006; Zhu, Toksoz, 2005], ощущается серьезный недостаток данных инструментальных наблюдений. В связи с этим остается неясность в понимании механизма эффекта и пока не разработана основа для создания практических моделей, на основе которых можно было бы оценивать геодинамические, сейсмические и электрофизические характеристики среды и ее тектоническую активность по амплитудным и спектральным характеристикам вызванных вариаций электрического поля.

Отсюда вытекает одна из интересных задач, которая связана с установлением и теоретическим обоснованием зависимости между амплитудой и спектральными особенностями сейсмоэлектрического эффекта и геодинамическими характеристиками среды, в которой он возбуждается.

¹ Здесь и в дальнейшем, в подрисуночных подписях приведены ссылки на опубликованные работы, в которых описаны технические характеристики применяемых средств измерений и методы обработки данных.

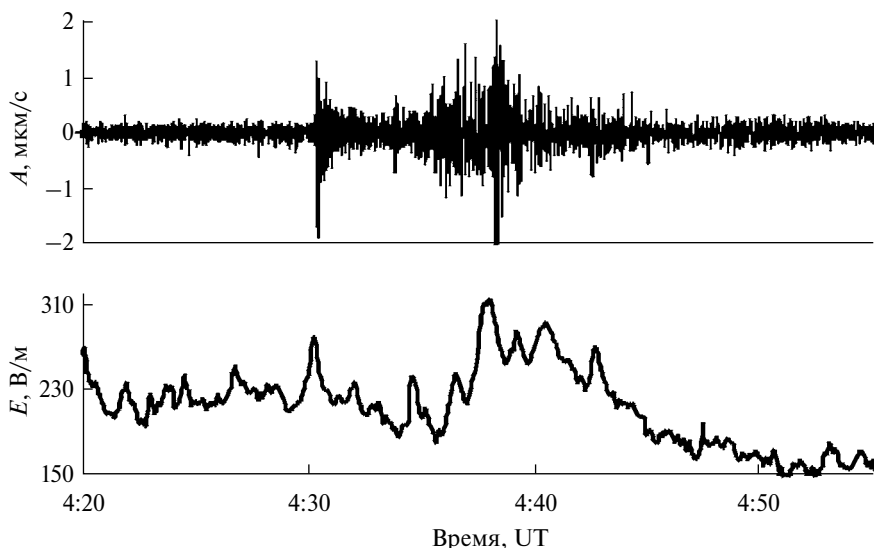


Рис. 1. Пример вызванных вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля E (нижняя панель) во время сейсмического возмущения (верхняя панель), вызванного землетрясением на архипелаге Додеканес (Греция) с магнитудой 5.0 на ГФО МНУ (22.08.2014 г.) [Адушкин и др., 2016а].

Прямой и обратный сейсмомагнитный эффект

Другим эффектом, который представляет интерес с точки зрения оценки структуры и физико-механических свойств среды, является сейсмомагнитный эффект, выражающийся в вариациях магнитного поля при распространении сейсмических волн в земной коре [Анисимов и др., 1985; Белов и др., 1974; Гершензон и др., 1993; Гохберг и др., 1987; 1988; Гульельми, Левшенко, 1994; Соболев, Демин, 1980; Sgrigna et al., 2004]. Так же, как и в случае сейсмоэлектрического эффекта, для описания механизма сейсмомагнитного эффекта предложено несколько теоретических моделей источника [Гульельми, Рубан, 1990].

Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о том, что в качестве одного из основных факторов, определяющих интенсивность магнитных эффектов при распространении сейсмических волн, следует рассматривать неоднородности среды [Соловьев, Спивак, 2009]. Именно неоднородности структуры среды, наличие границ раздела между горными породами разного вещественного состава, зон нарушенности среды и разного напряженно-деформированного состояния способствует более интенсивному преобразованию механической энергии в энергию электромагнитного поля (рис. 2), [Лукишов и др., 2012; Адушкин и др., 2017]. Это расширяет возможности исследования сейсмомагнитного эффекта в плане выделения разломных зон и высококонтрастных неоднородностей земной коры, а также оценки свойств их внутренней структуры и величины возможных

дифференциальных смещений в среде на основе анализа особенностей пространственных и временных вариаций геомагнитного поля. И в этом плане весьма перспективными представляются исследования, направленные на разработку моделей, позволяющих ранжировать тектонические структуры по степени современной активности и определять физико-механические свойства среды-заполнителя на основе характеристик сейсмомагнитного эффекта, регистрируемого при распространении сейсмических волн вдоль разных трасс.

Представляет интерес и обратный процесс, а именно: возмущение сейсмических колебаний геомагнитными импульсами (рис. 3) [Закржевская, Соболев, 2002; Рябова, Спивак, 2017]. В этом случае также важно устанавливать конкретные механизмы преобразования энергии между геомагнитным и сейсмическим полями, а главное разрабатывать модели взаимодействия между ними, с помощью которых можно определять электродинамические свойства среды.

Проявление лунно-солнечного прилива в геомагнитных вариациях

В качестве весьма важного фактора, определяющего многие геофизические процессы, следует рассматривать гравитацию Земли, а также ближайших к ней космических тел — Солнца и Луны. Длительные по времени и постоянно повторяющиеся по величине приливные возмущения представляют собой глобальный фактор. Вызывая значительные перемещения глубинных

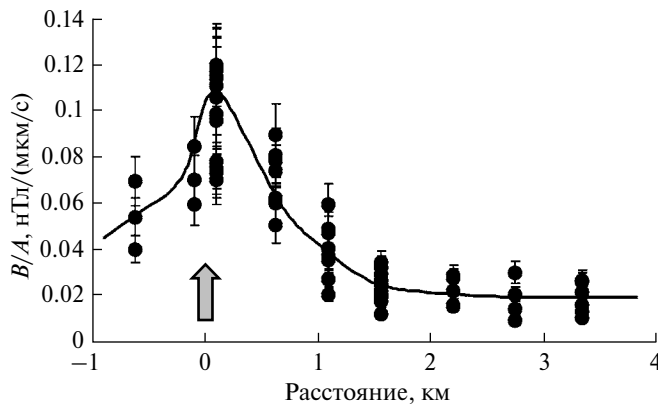


Рис. 2. Отношение абсолютной величины модуля наведенной магнитной индукции B к амплитуде сейсмического сигнала A в зависимости от расстояния до серединной линии разломной зоны (вертикальной стрелкой показано положение центральной линии разломной зоны) [Адушкин и др., 2017].

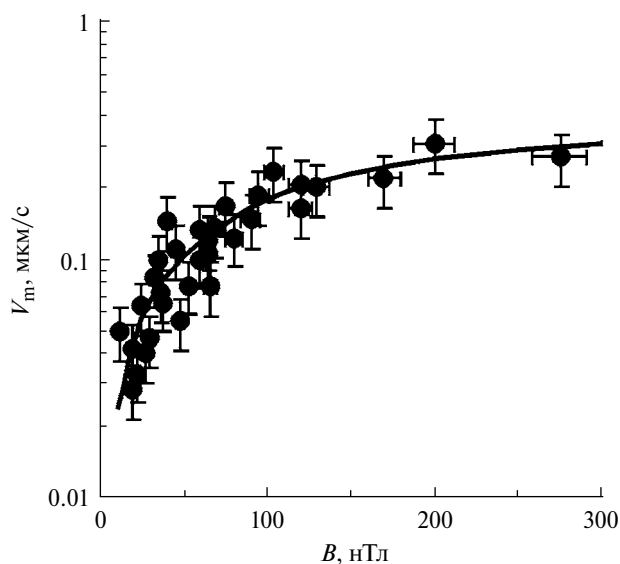


Рис. 3. Зависимость между среднеквадратичной амплитудой вариаций сейсмического фона V_m , наведенных в период геомагнитных вариаций с амплитудой горизонтальной составляющей B [Рябова, Спивак, 2017].

и близповерхностных масс земного вещества, прилив определяет не только пространственные особенности крупных форм рельефа земной поверхности, горизонтальную расслоенность земной коры и регматическую сеть разломов и трещин, но также реагирует на нестабильность вращения Земли [Сидоренков, 2002; Тектоническая..., 1990; Хаин, 2009]. Все это свидетельствует о том, что земной прилив является важным фактором, который не только определяет

основные периодичности и направленность геофизических процессов в окружающей среде, но, в известном смысле, может являться их триггером.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что гравитационное взаимодействие в системе Земля – Луна – Солнце оказывает значительное влияние не только на механические процессы, протекающие в недрах Земли, и, в частности, в земной коре, но также на режимы геофизических полей, например, магнитного поля Земли [Адушкин и др., 2017a].

Результаты теоретических исследований и инструментальных наблюдений свидетельствуют о достаточно высокой чувствительности магнитного поля Земли к приливным воздействиям (рис. 4) [Адушкин и др., 2017a; Грунская и др., 2011; Кролевец, Шереметьева, 2004; Старжинский, 2008; Шереметьева, 2011; Шереметьева, Смирнов, 2007]. В геомагнитных вариациях удается выделять практически все известные приливные волны с околосуточным и полусуточным периодом. Это дает возможность при соответствующей организации наблюдений получать данные о вариациях амплитудных и фазовых характеристик, а также затуханиях приливных волн на основе простых в осуществлении измерений на земной поверхности. Как следствие – появляется принципиальная возможность оценивать приповерхностное строение Земли и свойства твердых геосфер.

Влияние лунно-солнечного прилива на микропульсации атмосферного давления

Изучение атмосферного прилива, который играет значительную роль в формировании средних характеристик движения воздушных масс, представляет особый интерес не только для установления морфологических особенностей глобальных и локальных распределений приливных вариаций атмосферного давления и векторных характеристик атмосферы, но также для уточнения модели внутреннего строения Земли и процессов взаимодействия на границе ядро – мантия [Адушкин и др., 2016b; Голицын, 2004; Сидоренков, 2002; Чепмен, Линдзен, 1972; Zurbenko, Portzeva, 2009]. Последнее связано с тем, что частота и амплитуда околосуточной нутации Земли, хорошо проявляющаяся в приливных движениях воздушных масс, в значительной мере определяется ее внутренним строением. По этой причине анализ отклонения наблюдаемых с использованием результатов регистрации приливных эффектов в атмосфере

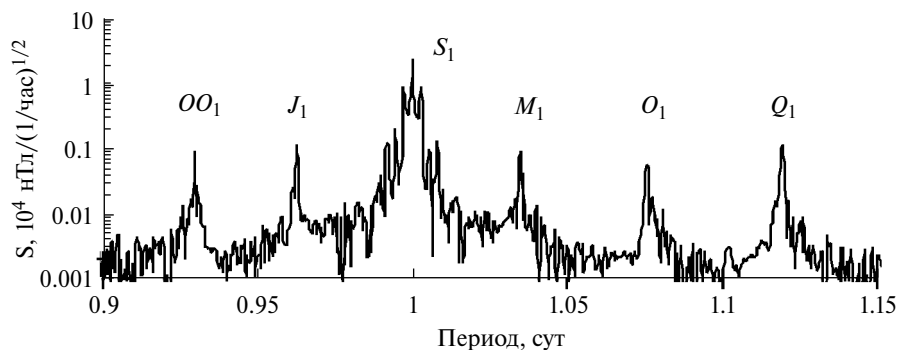


Рис. 4. Фрагмент спектра геомагнитных вариаций на ГФО МНУ по данным за 2014 г. (квазигармонические пики с частотами, близкими к частотам приливных волн, обозначены в поле рисунка принятыми обозначениями) [Адушкин и др., 2017а].

амплитуд нутационных гармоник от теоретически предсказанных по имеющимся моделям предоставляет хорошие возможности для уточнения модели Земли.

Используя новый метод, основанный на анализе не абсолютных значений атмосферного давления, а его микропульсаций, удастся выделить весь ряд приливных волн в атмосфере в широком диапазоне частот (рис. 5) [Адушкин и др., 2017б]. Как указано выше это предоставляет новые возможности для уточнения модели Земли. Однако для этого требуется не только развитие соответствующих инструментальных наблюдений, но также разработка моделей влияния внутренних структур Земли с учетом их динамики на атмосферные процессы.

Проявление собственных колебаний Земли в геомагнитных вариациях

Весьма интересным в плане межгеосферных взаимодействий представляется рассмотрение проявлений собственных колебаний Земли (СКЗ) в вариациях магнитного поля. Действительно, изучение тонов и обертонов СКЗ, а также расщеплений мультиплетов позволяет получать информацию о геометрии и свойствах отдельных внутренних областей Земли, вариаций скорости вращения и изменения ее формы [Адушкин и др., 2017в; Жарков, 2012; Милуков, 2005; Милуков и др., 2015; Dahlen et al., 1968; Gilbert, Backus, 1968; Winch et al., 1963; Suda et al., 1998]. Хотя и в меньшей степени по сравнению с приливной деформацией, СКЗ связаны с изменением формы Земли в целом, ее внутренних геосфер, включая жидкое и твердое,

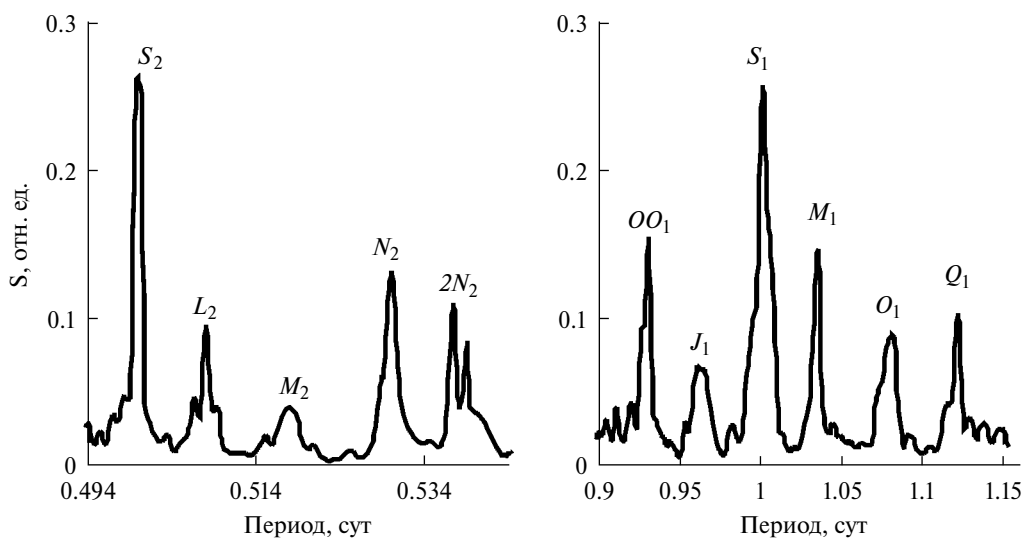


Рис. 5. Полусуточная и околосуточная область спектра микропульсаций атмосферного давления в г. Москве [Адушкин и др., 2016б].

и это вызывает вариации глобального магнитного поля. Суммарные геомагнитные вариации на отдельных участках земной коры складываются из глобальных вариаций и локальных, обусловленных изменением физико-механических свойств среды и динамики ее флюидопотоков, а, следовательно, токовых систем вблизи земной поверхности.

Исследования последнего года свидетельствуют о том, что в спектре геомагнитных вариаций хорошо выделяются квазигармонические составляющие с частотами, близкими к частотам значительного числа сфероидальных и тороидальных СКЗ (рис. 6) [Адушкин и др., 2017в]. Это позволяет рассматривать магнитное поле в качестве источника информации о СКЗ и их изменений со временем. Таким образом, возникает задача, связанная с разработкой расчетной модели влияния СКЗ на геомагнитные вариации, решение которой можно было бы использовать для получения новых знаний о процессах во внутренних геосферах и, возможно в перспективе, о вариациях скорости осевого вращения Земли.

Геофизические эффекты, предвещающие и сопутствующие сильным атмосферным явлениям

В связи с отчетливо проявляющейся тенденцией [Бережная и др., 2018] к увеличению количества опасных атмосферных явлений в виде ураганов, шквалов и сильных гроз, представляется важным установление сопутствующих им вариаций геофизических полей, а также прогностических признаков, которые могли бы составить основу для разработки мероприятий по предупреждению негативных последствий указанных явлений. Одновременно это представляет собой одну из важных задач приповерхностной геофизики, связанных с установлением

характеристик, описывающих взаимодействие геофизических полей.

Сильные возмущения атмосферы проявляются не только в виде изменений температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и скорости ветра, но вызывают также заметные вариации геофизических полей, в частности, электрического поля, микросейсмического фона и акустических колебаний у земной поверхности. В качестве примера на рис. 7 приведены совместно вариации метеорологических параметров (температура воздуха T , атмосферное давление P_0), амплитуды акустических (P) и микросейсмических (A) колебаний, а также вертикальной компоненты электрического поля E в период урагана 29.05.2017 г. в Москве (данные Центра геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН [Спивак и др., 2016а]).

Обработка и анализ данных, полученных в результате инструментальных наблюдений, показывают, что наступление крупномасштабного возмущения атмосферы, которое сопровождается ураганами, шквалами и сильными грозами, предвещается за $\sim 1-4$ часа повышенными вариациями электрического поля, амплитудой акустических колебаний и сейсмического фона при изменении их спектральных характеристик (рис. 8) [Спивак и др., 2017; 2018]. При накоплении статистики это может рассматриваться в качестве одного из прогностических признаков сильных атмосферных явлений. И в этом случае важно разрабатывать критерии, позволяющие выделять среди подобных по синоптической обстановке и интегральным метеорологическим характеристикам события, которые могут привести к негативным последствиям.

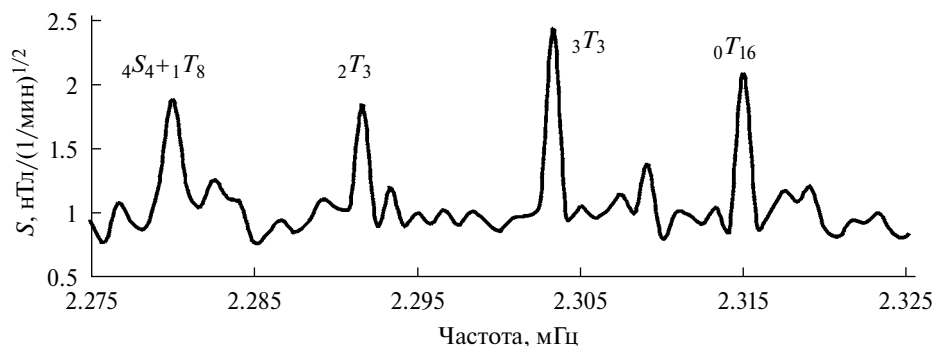


Рис. 6. Фрагмент спектра геомагнитных вариаций на ГФО МНУ за 2014 г. [Адушкин и др., 2017в].

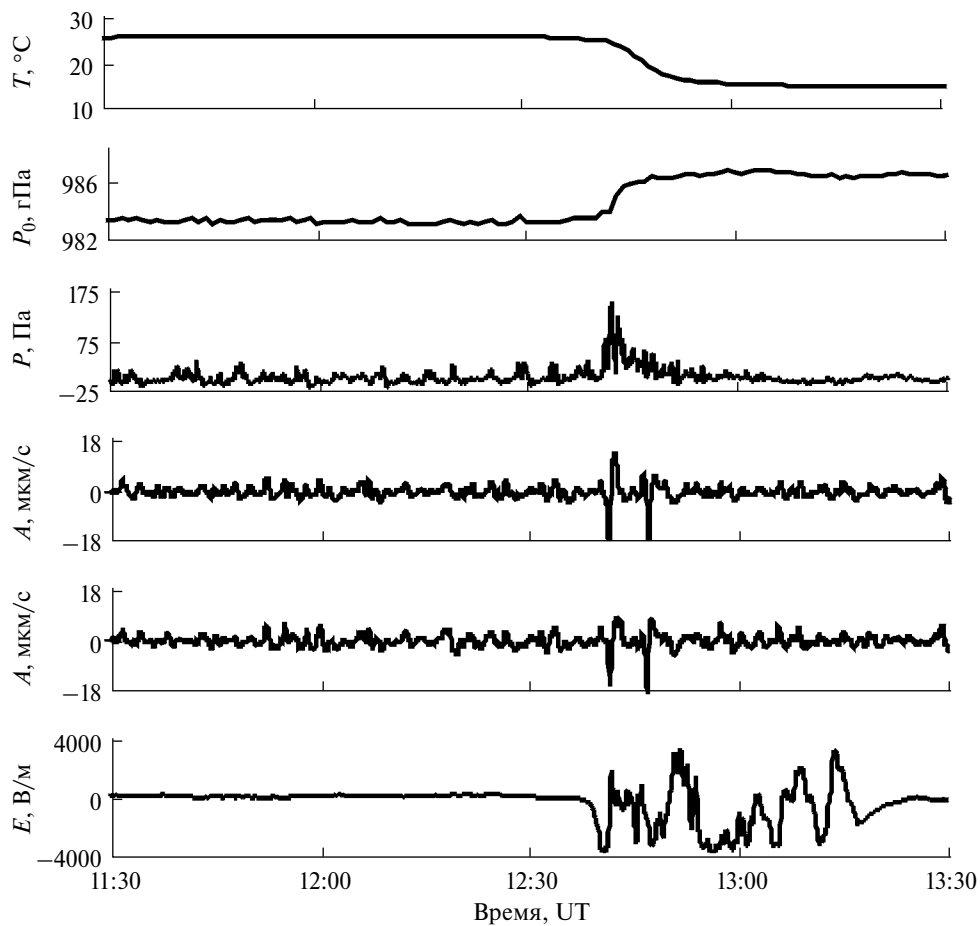


Рис. 7. Изменение метеопараметров и вариация геофизических полей в период урагана в г. Москве 29.05.2017 г. (компоненты сейсмических колебаний в горизонтальной плоскости обозначены в поле рисунка) [Спивак и др., 2018].

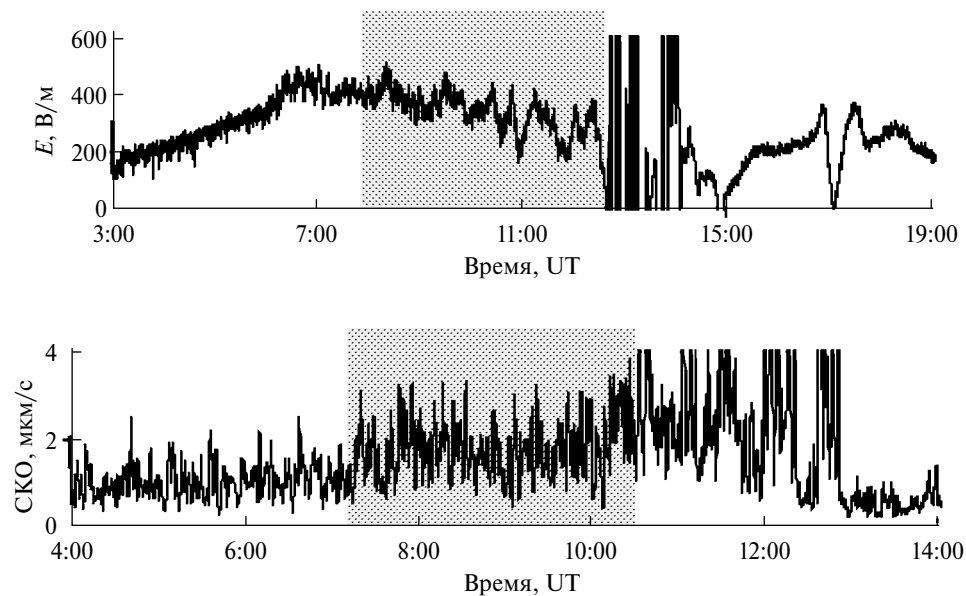


Рис. 8. Верхняя панель: вариации вертикальной компоненты электрического поля в период, предшествующий урагану 29.05.2017 г.; фоном выделена область повышенных вариаций E перед ураганом; нижняя панель: среднеквадратичное отклонение (СКО) амплитуды сейсмического шума в период урагана 29.05.2017 г. (усреднение по интервалам длительностью 60 с); фоном выделена область повышенных значений СКО перед ураганом [Спивак и др., 2018].

Разработка новых подходов к определению энергии акустических источников

Акустические колебания в атмосфере вблизи земной поверхности, включая акустико-гравитационные волны (АГВ), следует рассматривать в качестве одной из важных характеристик среды обитания человека, а в ряде случаев — весьма информативного источника данных о динамических процессах, протекающих в приземной атмосфере и на приповерхностных участках земной коры. В последнем случае первоочередной задачей является оценка энергии источника. При этом наряду с источниками высокой энергии (взрывы различной природы, ракетные старты, извержения вулканов и землетрясения) определенный интерес вызывают низкоэнергетические акустические источники, такие как магнитные бури, вход в атмосферу Земли и разрушение космических объектов, атмосферные фронты, крупные пожары и т. д. Возникающие в результате действия перечисленных источников АГВ распространяются не только на значительные расстояния вдоль земной поверхности, но также достигают ионосферы Земли, создавая систему прямых и отраженных волн, что оказывает на нее возмущающее влияние.

Разработанные к настоящему времени подходы к описанию закономерностей распространения АГВ позволяют с достаточной для практических оценок точностью определять энергию в источнике (на рис. 9 приведена зависимость энергии акустического источника от характерной частоты сигнала, полученная на основе анализа данных инструментальных наблюдений в работе [Адушкин и др., 2017]). Дальнейшее развитие этой задачи связано с необходимостью определения расстояния от места регистрации до источника и разработкой критериев его дискриминации.

Определение источников техногенных возмущений атмосферы и земной коры

С учетом все возрастающего влияния человеческой деятельности на природные системы возникает необходимость выделять среди прочих возмущений атмосферы и верхней части земной коры возмущения техногенного происхождения. Как правило, источники подобных возмущений располагаются на территориях мегаполисов и их агломераций [Спивак и др., 2016]. Изучение особенностей поведения геофизических полей в этих условиях позволяет не только устанавливать и характеризовать техногенные источники, но также оценивать их воздействие на среду обитания человека.

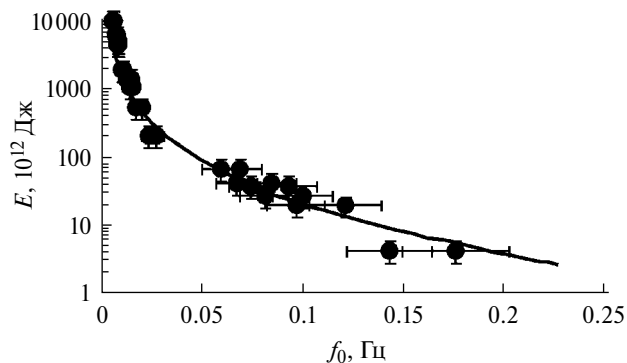


Рис. 9. Зависимость энергии акустического источника E от характерной частоты акустического сигнала f_0 по данным инструментальных наблюдений [Адушкин и др., 2017].

ОСНОВНЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Имеющиеся на сегодняшний день результаты исследований по рассмотренному выше, хотя и не полному перечню проблем, позволяют сформулировать наиболее важные направления дальнейших исследований в приповерхностной геофизике, имеющих непосредственное отношение к взаимодействию геосфер и геофизических полей. Обобщая, выделим следующие перспективные направления и задачи исследований.

1. Исследование причинно-следственных связей и пространственно-временных закономерностей взаимодействия и преобразования геофизических полей разной природы, а также определению корреляционных соотношений между ними с использованием современных подходов к многомерному анализу результатов инструментальных наблюдений.
2. Разработка прогностических признаков сильных атмосферных явлений.
3. Установление источников возмущений геофизических сред техногенного происхождения и их влияния на среду обитания.
4. Определение роли геофизических процессов и полей в приповерхностной части Земли в формировании режимов верхних геосфер, в том числе в глобальном масштабе.
5. Установление фундаментальных закономерностей преобразования геофизических полей разной природы и механизмов межгеосферных взаимодействий на границе земная кора — атмосфера.

6. Разработка моделей прямого и опосредованного влияния структуры земной коры и ее физико-механических свойств на проявление слабых воздействий в виде лунно-солнечного прилива, собственных колебаний Земли и барических возмущений атмосферы в геофизических процессах с целью определения динамики изменения свойств приповерхностных участков литосферы и атмосферы.

7. Разработка моделей взаимодействий геосфер и геофизических полей с учетом возможности возникновения триггерных эффектов в массо- и энергообменных процессах.

8. Определение роли межгеосферных взаимодействий в формировании динамического равновесия в системе «Земля – внутренние/внешние геосферы», а также в эволюции Земли в целом.

Перечисленные направления исследований имеют важное значение не только для понимания законов коллективного поведения сильно отличающихся по составу, структуре и физико-механическим свойствам геосфер, но также для установления количественных соотношений, позволяющих определять эти свойства на основе регистрации и анализа режимов и вариаций геофизических полей. Естественно, что для этого необходимо постоянно совершенствовать и развивать инструментальные наблюдения, результаты которых представляют собой один из самых важных источников информации.

В целом, следует отметить наличие и роль в формировании условий совместного существования геосфер и геофизических полей таких основополагающих факторов как гравитационное взаимодействие в системе Земля – Луна – Солнце, тепловой поток со стороны Солнца и из недр Земли, сейсмичность Земли и т. д. При этом гравитационные силы, пожалуй, следует рассматривать как один из важнейших. Не исключается, что результат интегрального гравитационного воздействия на земные сферы и поля сравним с тепловым воздействием такого мощного источника энергии как Солнце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приповерхностная геофизика, в рамках которой рассматриваются вопросы, связанные с установлением закономерностей геофизических явлений и процессов в приповерхностной зоне Земли, объединяет широкий круг геофизических задач, решение которых позволит не только установить общие закономерности

взаимодействий между геосферами и геофизическими полями по-отдельности и в совокупности, но также построить геофизическую модель среды обитания человека. Последнее представляет особый интерес, поскольку может явиться основой для нового направления исследований – геофизической экологии.

Одновременно следует подчеркнуть, что сформулированные выше научные направления в рамках приповерхностной геофизики представляются важными, поскольку нацелены не только на получение фундаментальных знаний о динамике геофизических процессов, но также на решение конкретных практических задач, связанных с совершенствованием и разработкой новых моделей Земли и установлением условий существования биосферы.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 19 «Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А.* Сейсмомагнитный отклик разломной зоны // Физика Земли. 2017. № 1. С. 87–96.
- Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А.* Сейсмоэлектрический эффект по данным геофизической обсерватории «Михнево» // Докл. РАН. 2016а. Т. 467. № 4. С. 454–457.
- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А., Харламов В.А.* Оценка энергии источников инфразвукового возмущения в атмосфере по спектру волновых форм. Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2017 г. С. 416–426.
- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А.* Эффекты лунно-солнечного прилива в земной коре и атмосфере Земли // Физика Земли. 2017б. № 4. С. 76–92.
- Адушкин В.В., Спивак А.А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС. 2014. 360 с.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Рябова С.А., Харламов В.А.* Приливные эффекты в геомагнитных вариациях // Докл. РАН. 2017а. Т. 474. № 2. С. 226–229.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А.* Инструментальные наблюдения приливных волн в атмосфере // Докл. РАН. 2016б. Т. 469. № 3. С. 343–346.
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А.* Новый метод изучения собственных колебаний Земли на основе анализа геомагнитных вариаций // Докл. РАН. 2017 в. Т. 476. № 5. С. 452–455.
- Анисимов С.В., Гохберг М.Б., Иванов Е.А. и др.* Короткопериодные колебания электромагнитного поля при

- промышленном взрыве // Докл. АН СССР 1985. Т. 281. № 3. С. 556–559.
- Белов С.В., Мигунов Н.И., Соболев Г.А.* Магнитный эффект сильных землетрясений на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14. № 3. С. 380–382.
- Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в марте 2018 г. // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 132–140.
- Гершензон Н.И., Гохберг М.Б., Гульельми А.В.* Электромагнитное поле сейсмического импульса // Физика Земли. 1993. № 9. С. 48–53.
- Голицын Г.С.* Динамика природных явлений: климат, планетные атмосферы, конвекция, волновые и случайные процессы. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 344 с.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Козырева О.В. и др.* Электромагнитное излучение горной среды в условиях взрывного нагружения // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295. № 2. С. 321–325.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука. 1988. 174 с.
- Грунская Л.В., Морозов В.Н., Закиров А.А., Рубай Д.В., Рубай Р.В.* Солнечные и лунные приливы в геомагнитном поле // Изв. вузов. Физика. 2011. № 2. С. 8–19.
- Гульельми А.В., Рубан В.Ф.* К теории индукционного сейсмомагнитного эффекта // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1990. №5. С. 47–54.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т.* Электромагнитные сигналы от землетрясений // Физика Земли. 1994. № 5. С. 65–70.
- Жарков В.Н.* Физика Земных недр. М.: Наука и образование. 2012. 384 с.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.Н.* О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 4. С.3–15.
- Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
- Кролевец А.Н., Шереметьева О.В.* Возможный механизм магнитных вариаций // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 16–21.
- Лукишов Б.Г., Спивак А.А., Тер-Семенов А.А.* Вариации геомагнитного поля при распространении сейсмических волн через разлом // Докл. РАН. 2012. Т. 442. № 2. С. 259–262.
- Мигунов Н.И.* Об использовании сейсмоэлектрических явлений для изучения напряженного состояния насыщенных горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 9. С. 20–28.
- Милюков В.К.* Наблюдение тонкой структуры основной сфероидальной моды Земли OS2 // Физика Земли. 2005. № 4. С. 16–22.
- Милюков В.К., Виноградов М.П., Миронов А.П., Мясников А.В., Перельгин Н.А.* Собственные колебания Земли, возбужденные тремя крупнейшими землетрясениями последнего десятилетия, по деформационным наблюдениям // Физика Земли. 2015. № 2. С. 21–36.
- Назарный С.А., Комаров В.А.* Вызванная сейсмоэлектрическая поляризация. СПб.: изд-во С.-Петербур. ун-та. 2001. 144 с.
- Неновски П.И., Бойчев Б.В.* Механизмы возникновения сейсмо-электрических сигналов в земной коре // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44. № 4. С. 545–553.
- Новик О.Б.* Электромагнитные и тепловые сигналы из недр Земли. М.: Круглый год. 2001. 255 с.
- Резанов И.А.* Эволюция представлений о земной коре. М.: Наука. 2002. 299 с.
- Рябова С.А., Спивак А.А.* Возмущение сейсмического фона геомагнитными импульсами // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 2. С. 65–76.
- Светов Б.С.* К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки // Геофизика. 2000. № 1. С. 28–39.
- Сидоренков Н.С.* Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука. 2002. 384 с.
- Соболев Г.А., Демин В.М.* Механоэлектрические явления в земле. М.: Наука. 1980. 215 с.
- Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электромагнитные сигналы в результате электрической поляризации при стесненном деформировании горных пород // Физика Земли. 2009. № 4. С. 76–84.
- Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электромагнитные эффекты как следствие неоднородного строения и дифференциальных движений в земной коре. Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. М.: ГЕОС. 2006. С. 196–204.
- Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Аппаратура и методика для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016а. Т. 52. № 2. С. 65–78.
- Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Геофизические поля мегаполиса // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 2. С. 39–54.
- Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Акустические и электрические предвестники сильных грозных явлений в условиях мегаполиса // Геофизические процессы и биосфера. 2017. Т. 16. № 4. С. 81–91.
- Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А.* Вариации геофизических полей при ураганах и шквалах // Докл. РАН. 2018. Т. 480. № 5. С. 592–595.
- Старжинский С.С.* Исследование динамики лунно-солнечных вариаций в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 2. С. 275–286.
- Тектоническая* расслоенность литосферы и региональные геологические исследования / А.А. Белов, В.С. Буртман, В.П. Зинкевич и др. М.: Наука. 1990. 293 с.
- Хаин В.Е.* О главных направлениях в современных науках о Земле // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 1. С. 50–56.

- Чепмен С., Линдзен Р. Атмосферные приливы. М.: Мир. 1972. 295 с.
- Шереметьева О.В. Составляющие геомагнитных вариаций с частотами приливных волн // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51. № 2. С. 224–228.
- Шереметьева О.В., Смирнов С.Э. Приливные компоненты геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47. № 5. С. 624–633.
- Dahlen F.A. The normal modes of a rotating, elliptical Earth // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1968. V. 16. P. 329–367.
- Fukao Y., Nishida N., Suda N., Nawa R., Kobayashi N. A theory of the Earth's background free oscillations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. doi: 10.1029/2001JB000153
- Gilbert J.F., Backus G.T. Approximate solutions to the inverse normal mode problem // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1968. V. 58. P. 103–131.
- Mikhailov O.V., Haartsen M.V., Toksoz M.N. Electro seismic investigation of the shallow subsurface: field measurements and numerical modeling // *Geophysys.* 1997. V. 62. P. 97–105.
- Okubo K., Sato Sh., Ishii T., Takeushi N. Observation of atmospheric electricity variation signal during underground seismic wave propagation // *Transactions on electrical and electronic engineering.* 2006. V. 1. Is. 2. P. 182–187.
- Sgrigna V., Buzzi A., Conti L. et al. Electromagnetic signals produced by elastic waves in the Earth's crust // *Nuovo Cimento.* 2004. V. 27. № 2. P. 115–132.
- Suda N., Nawa K., Fukao Y. Earth's background free oscillations // *Science.* 1998. V. 79. P. 2089–2091.
- Thompson A.H., Gist G.A. Geophysical applications of electrokinetic conversion // *The leading Edge.* 1993. V. 12. P. 1160–1173.
- Thompson R.R. The seismic-electric effect // *Geophysys.* 1936. V. 1. № 3. P. 48–51.
- Winch D.E., Bolt B.A., Slauicajts L. Geomagnetic fluctuations with the frequencies of torsional oscillations of the Earth // *J. Geophysical Res.* 1963. V. 68. № 9. P. 2685–2693.
- Zhu Z., Toksoz M.N. Seismoelectric and seismomagnetic measurements in fractured borehole models // *Geophysys.* 2005. V. 70. F45–F51.
- Zurbenko I.G., Potrzewa A.L. Tidal waves in the atmosphere and their effects // *Acta geophysica.* 2009. V. 58. № 2. P. 356–373.

Problems of Interaction of Geospheres and Physical Fields in Near-Surface Geophysics

V. V. Adushkin^a and A. A. Spivak^{a,*}

^a*Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**E-mail: spivak@idg.chph.ras.ru*

Received June 13, 2018

The main directions and problems addressed by near-surface geophysics – the new currently actively developing scientific discipline – are formulated and discussed. A combined approach is proposed for exploring the geospheres' interactions at the Earth's crust – atmosphere boundary where mass- and energy exchange between the internal and external geospheres is most intense and for studying the interactions and transformations of the geophysical fields in the surface zone of the Earth including its biosphere. New results obtained in the studies of inter-geosphere interactions and physical fields of the Earth are presented. It is emphasized that establishing the geophysical conditions of human environment and characteristics of manmade activity is of great importance.

Keywords: geospheres, geophysical fields, interaction, human environment