

УДК 533.95:550.34:551.51

ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2013 г. М. Н. Дубров, В. М. Смирнов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино (Московская обл.)

e-mail: mnd139@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 20.12.2010 г.

После доработки 16.02.2012 г.

Приведены результаты оригинальных экспериментов, выполненных наземным геофизическим лазерным интерферометром и спутниковым ионосферным профилометром на основе навигационной системы GPS. Зарегистрировано синхронное возрастание деформаций земной поверхности, вариаций атмосферного давления и уровня пространственно-временных модификаций электронной концентрации в слое F_2 ионосферы с характерными пространственными масштабами 10^2 – 10^3 км и периодами 10^2 – 10^3 с. Проанализирована связь обнаруженных явлений с сейсмической активностью Земли.

DOI: 10.7868/S0016794013010082

1. ВВЕДЕНИЕ

Многолетние параллельные исследования нестационарных процессов в верхних слоях земной коры и в атмосфере Земли, выполненные в разные годы многими авторами с помощью различных геофизических инструментов, указывают на существование детерминированной связи между атмосферными и литосферными явлениями в широкой полосе частот [Трубицын и Макалкин, 1976; Любушин и др., 1992; Дубров и др., 1998; Волков и др., 2001]. Характерной особенностью наблюдаемого динамического взаимодействия этих соприкасающихся геосфер, кроме чисто метеорологических факторов (ветер, осадки, тепло-массообмен), является наличие спорадических волновых и других аномальных процессов, одновременно наблюдаемых как в литосфере, так и в атмосфере Земли. И, как правило, эти аномальные явления сопровождаются усилением сейсмической активности и нередко – сильными землетрясениями [Деформационные..., 1989; Volkov et al., 1999; Алешин и др., 2003]. С другой стороны, экспериментально давно отмечено, что перед сильными землетрясениями возрастает интенсивность нестационарных динамических процессов в ионосфере, усиливаются возмущения электрических и магнитных полей Земли [Белов и др., 1974; Гогатишвили, 1984; Липеровский и др., 1992; Poponagiev et al., 2003]. Существенный прогресс в изучении сейсмоионосферных явлений был достигнут с применением методов радиофизического зондирования ионосферы Земли, основанных на использовании спутниковых навигационных систем. Работы в этом направлении, начатые в нашей стране при участии одного из соавторов

данной работы [Андрианов и Смирнов, 1993; Смирнов, 2001а, б], впоследствии были развиты многими группами исследователей как у нас, так и за рубежом. Особенно эффективным для изучения ионосферных вариаций в слое F_2 оказалось использование разветвленной сети спутниковых систем GPS и FORMOSAT (см., например, [Hsiao et al., 2009; Намгаладзе и др., 2009] и приведенную там литературу). В результате было установлено, что ионосферные возмущения, выражающиеся в модификации электронной плотности ионосферы над территориями, непосредственно связанными с очагом будущего землетрясения, наблюдаются за времена от десятков часов до нескольких суток перед особенно сильными землетрясениями [Pulinets et al., 2005; Smirnov and Smirnova, 2008; Намгаладзе и др., 2009]. В связи с этим представлял особый интерес вопрос о непосредственном сопоставлении сейсмоионосферных вариаций, регистрируемых спутниковыми радиотехническими методами, с результатами измерения деформаций земной поверхности и атмосферных процессов, фиксируемых независимыми наземными средствами [Любушин и др., 1992; Дубров и др., 1998], в том числе, в периоды, предшествующие сильным землетрясениям [Dubrov, 2006; Липеровский и др., 2008]. Изучению взаимосвязи указанных явлений, а также их сопоставлению с сейсмичностью Земли посвящена данная работа. Сравнительный анализ динамических процессов, экспериментально зарегистрированных одновременно в трех средах: в земной коре, в атмосфере и ионосфере Земли, судя по опубликованным работам, проводится впервые.

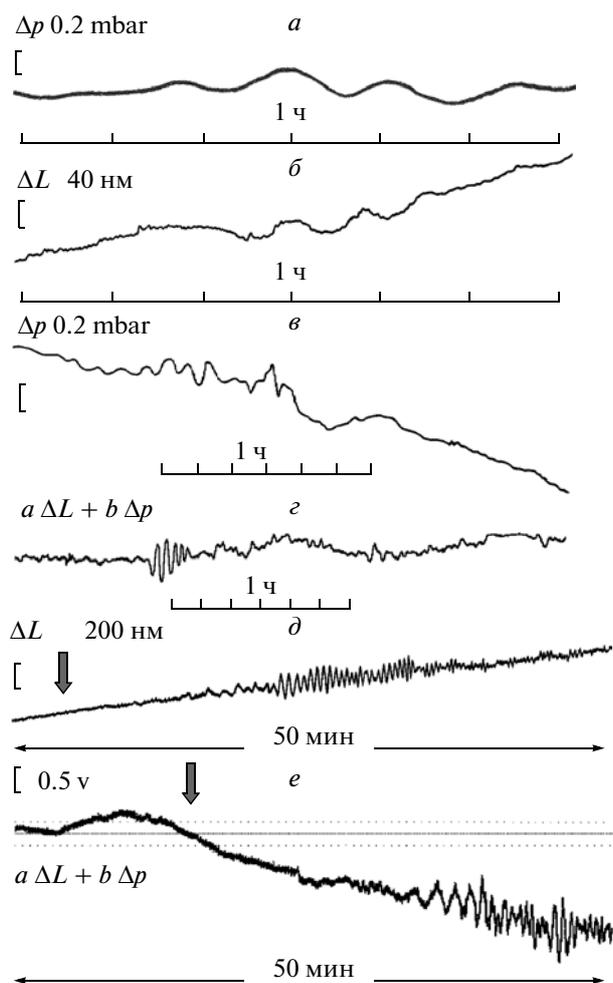


Рис. 1. Барические и деформационные вариации, зарегистрированные во Фрязино:

а) оптическим микробарографом 25.09.1973 г.; б) 10-метровым лазерным деформографом 19.06.1983 г.; в) фотоэлектрическим микробарографом 14.01.1994 г.; г) 100-метровым лазерным деформографом 23.09.2001 г.; д) 100-метровым равноплечим лазерным деформографом 07.09.1974 г., е) 300-метровым широкополосным лазерным деформографом 20.03.2008 г. По вертикальной оси указаны характерные масштабы вариаций Δp в миллибарах и ΔL в нанометрах.

2. ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ: ДЕФОРМАЦИОННО-БАРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

При выполнении точных измерений деформаций земной поверхности и вариаций атмосферного давления можно часто наблюдать случаи спорадического появления волнообразных синхронных деформаций земли и колебаний атмосферного давления [Дубров и др., 1998]. Регистрируемые преимущественно в безветренную погоду, эти динамические возмущения носят квазиволновой характер с периодами колебаний от единиц минут до нескольких часов и суток [Вол-

ков и др., 2001; Алешин и др., 2003]. Здесь мы не рассматриваем хаотические микродеформации земной поверхности и микропульсации атмосферного давления, связанные с ухудшением погодных условий — усилением ветра, выпадением осадков и другими проявлениями стохастической атмосферной активности. Такие колебания имеют свои отличительные признаки [Дубров и др., 1998] и носят случайный шумовой характер, а их периоды лежат в диапазоне единиц — десятков секунд.

Характерные примеры спорадических квазиволновых возмущений, зарегистрированных нами в разные периоды времени с помощью различных приборов, показаны на рис. 1. Представленные результаты получены в ходе наблюдений, проводившихся оптическим и фотоэлектрическим микробарографами (а, в), 10- и 100-метровым лазерными деформографами (б, г). Длительность фрагментов записей изменяется от одного до нескольких часов, характерные периоды квазиволновых возмущений лежат в пределах 5–60 мин. При этом на отдельных записях выделяются как сравнительно короткопериодные процессы с периодами единицы — первые десятки минут, рис. 1а, б, так и более длиннопериодные колебания с характерными периодами от нескольких десятков минут до нескольких часов. В ряде случаев, как это, например, видно на рис. 1в, г, одновременно наблюдаются волновые процессы обоих типов.

Для сравнения на этом же рисунке приведены примеры записей деформаций — рис. 1д, е, вызванных сейсмическими волнами от удаленных землетрясений, которые были зарегистрированы лазерными интерферометрами на лучеводном полигоне ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН во Фрязино [Дубров и др., 1998, 2007]. При расстояниях $D = 10^3 - 10^4$ км до эпицентра землетрясения наиболее быстрые — объемные сейсмические волны — достигают пункта регистрации через 10–20 мин после основного толчка (его момент на рис. 1 показан вертикальной стрелкой), тогда как более медленные — поверхностные волны — регистрируются сейсмическими приборами с гораздо большим запаздыванием, составляющим 30–50 мин. Запись, приведенная на рис. 1д для землетрясения 07.09.1974 г. (о-в Ява, магнитуда $M = 7.2$), выполнена во Фрязино 100-метровым равноплечим интерферометром, который не чувствителен к барическим возмущениям Δp , поверхностные волны выделяются достаточно четко. Землетрясение 20.03.2008 г. (Китай, $M = 7.4$) зарегистрировано 300-метровым широкополосным лазерным интерферометром неравноплечего типа, чувствительного к вариациям Δp : кроме сейсмических волн ΔL , достигших максимальной амплитуды через 30–35 мин после начала землетрясения (рис. 1е), на записи наблюдается колоколообразное деформационно-барическое возмущение, опережающее момент основного толчка на 5–10 мин.

Для выявления связи квазиволновых колебаний земной поверхности и вариаций атмосферного давления с отмеченными характерными периодами (от единиц минут до нескольких часов), а также для изучения их пространственного распределения была разработана и применена специальная методика [Дубров и др., 1998; Волков и др., 2001; Volkov et al., 1999]. Использовались результаты наблюдений за движениями земной поверхности в трех пунктах Подмосковья. Выполнялись измерения: деформаций (лазерные деформографы во Фрязино [Дубров и др., 1998]), наклонов и вариаций силы тяжести (наклонометры и гравиметры в Обнинске и на территории ИФЗ в Москве [Волков и др., 2001]). Расстояние между пунктами наблюдений находилось в пределах 45–140 км. В результате проведения параллельного анализа полученных данных исследована связь микровариаций атмосферного давления и регистрируемых геофизических полей в разнесенных пунктах наблюдения. Установлено, что динамические возмущения в атмосфере имеют волновую микроструктуру и сопровождаются движениями земной поверхности в виде достаточно сложной суперпозиции деформаций, наклонов и вертикальных перемещений. Эти возмущения имеют также четко очерченный фазовый состав и распространяются вдоль границы раздела Земля – атмосфера со скоростями 30–50 км/ч [Volkov et al., 1999].

С помощью параллельно работающих и разнесенных в пространстве инструментов обнаружено одновременное возрастание интенсивности квазиволновых деформационно-барических возмущений и сейсмической активности Земли. Например, впервые выявленные нами процессы усиления атмосферно-литосферного взаимодействия в период 21.03–25.03.1998 г., предшествовавший серии сильных землетрясений в Южной части Тихого океана (в секторе, ограниченном координатами 0.4 – 63° S и 99° E–75° W), характеризуются следующими особенностями. Землетрясения происходили с интервалом в 3–4 сут: 25.03.1998 г., район о-вов Балени, магнитуда $M_{PLP} = 7.5$; 29.03.1998 г., о-ва Тонга, $M_{PLP} = 6.9$; и еще два землетрясения произошли 01.04.1998 г. с магнитудой $M_{PLP} = 7.5$ – Индонезия и у южного побережья Чили. Более сильных землетрясений не было зарегистрировано мировыми сейсмическими службами в течение временного интервала длительностью более 70 сут: с 20.02.1998 г. по 02.05.1998 г.

Максимальная интенсивность деформационно-барических процессов была отмечена нашими приборами 22.03–23.03.1998 г.: четырех–пятичасовые колебания атмосферного давления величиной 0.8–0.9 мбар сопровождались деформациями земной поверхности $\Delta L = 0.3$ –0.5 мкм на базе $L = 10$ м, наклонами 0.005 угл. с. и вертикальными изменениями силы тяжести 8.6 мГал

с теми же характерными периодами [Волков и др., 2001]. Подобные возмущения, продолжавшиеся более 50 ч, не были больше зарегистрированы нами ни разу за весь упомянутый цикл наблюдений. Описываемые процессы сходны по форме своего проявления и выглядят, как динамическое взаимодействие двух соприкасающихся геофизических сред – двух геосфер, в данном случае – земной поверхности и атмосферы.

Интересную возможность для регистрации такого рода процессов предоставляет лазерный деформограф с воздушнонаполненным и частично связанным с внешней атмосферой измерительным плечом [Дубров, 1976]. Регистрируемое таким прибором изменение сигнала ΔU может быть представлено в виде

$$\Delta U = a\Delta L + b\Delta p, \quad (1)$$

где U – напряжение, например, в вольтах на выходе системы регистрации интерферометра-деформографа; ΔL и Δp – измеряемые вариации длины L базиса прибора и атмосферного давления p соответственно; a и b масштабные, или калибровочные, коэффициенты. Величина коэффициента a

$$a = \partial U / \partial L \quad (2)$$

определяет чувствительность интерферометра к деформациям земной поверхности и для инструментов длиной $L = 10$ м–100 м может в среднем составлять единицы В/мкм. Величина и знак коэффициента b

$$b = \partial U / \partial p$$

выражают зависимость регистрируемого сигнала от вариаций атмосферного давления и определяют степень герметичности защитного трубопровода в измерительном плече интерферометра: $b_1 = \pm(3-30)$ мВ/мбар – для абсолютно герметичного (или вакуумированного) интерферометра; $b_2 = \pm(3-30)$ В/мбар – для интерферометра, плечо которого свободно связано с атмосферой. В последнем случае оба слагаемых в выражении (1) являются величинами одного порядка. Именно этот вариант реализован в схемах лазерных интерферометров-деформографов, записи которых приведены на рис. 1г, е.

Исследования, выполняемые с применением предложенной методики, при их сопоставлении с результатами равномерных наблюдений [Любушин и Малугин, 1993] показали, что в описанный выше механизм взаимодействия литосферы и атмосферы вовлекается также и гидросфера Земли. Причем, наблюдается как деформо-барическое, так и гидро-барическое возбуждение указанных геосфер [Дубров и др., 2007]. Примеры регистрации такого взаимодействия геофизических полей в отмеченный выше период возрастания сейсмической активности Земли 21.03–25.03.1998 г. при-

ведены в работах [Алешин и др., 2003] и [Дубров и др., 2007] соответственно. Если влияние литосферных деформаций на вариации уровня подземных вод, которое рассматривается многими авторами как воздействие “снизу”, физически оправдано, то по аналогии можно говорить и о воздействии “сверху”, т.е. о вовлечении в общий геодинамический процесс не только вышележащих слоев атмосферы (тропосферы, термосферы), но также ионосферы и магнитосферы Земли [Yumoto, 2010].

3. ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ: СЕЙСМОИОНОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Связь сейсмических и электромагнитных процессов в земной коре и прилегающих геосферах (атмосфере, ионосфере) отмечена давно многими авторами [Белов и др., 1974; Гогатишвили, 1984; Липеровский и др., 1992; Ponomarev et al., 2003]. Возможность обнаружения эффектов сейсмической активности Земли с помощью аппаратуры, установленной на спутниках и орбитальных станциях, во многом стимулировало использование космической техники для решения проблем прогноза землетрясений на основе ионосферных предвестников [Липеровский и др., 1992]. Один из наиболее эффективных вариантов такого использования базируется на изучении сейсмоионосферных эффектов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС и др. Стабильные радиосигналы, излучаемые спутниками этих систем и принимаемые на Земле, являются зондирующими сигналами при определении параметров ионосферы методом радиопросвечивания [Андрианов и Смирнов, 1993; Смирнов, 2001а, б]. Наличие разветвленной сети наземных станций, принимающих сигналы навигационных систем, и возможность использования радиотехнических методов измерений для определения физических параметров ионосферы позволяет осуществлять непрерывный спутниковый мониторинг модификаций ионосферы, связанных с сейсмической активностью Земли, основанный на уже обнаруженных и вновь открываемых ионосферных эффектах.

В настоящем разделе работы мы приводим сопоставление двух типов экспериментальных данных, полученных одновременно наземными и спутниковыми средствами, а именно: результаты измерений и количественных оценок

– деформационно-барических вариаций, зарегистрированных лазерными интерферометрами – деформографами протяженностью 100 м и 300 м на полигоне ИРЭ во Фрязино [Дубров и др., 1998, 2007];

– пространственно-временных модификаций электронной концентрации в ионосфере Земли по данным глобальной навигационной системы GPS, рассчитанных с применением описанных в работах [Смирнов, 2001а, б; Smirnov и Smirnova, 2008] методов и алгоритмов радиопросвечивания.

Для анализа вариаций интегральной электронной концентрации (Total Electron Contents – TEC или полного электронного содержания – ПЭС) в ионосфере использованы результаты обработки данных, принимаемых местными (расстояние до деформографов 100–300 км) и удаленными GPS станциями – расположенными на расстоянии от 2 до 7 тыс. км от места установки деформографов. В результате таких измерений фактически определяются пространственно-временные вариации ПЭС области, расположенной, в основном, в ионосферном слое F_2 на высотах до 400 км. При движении спутника GPS по его траектории (высота орбиты ~20000 км) эта область в пространстве и ее проекция на земную поверхность (подионосферная точка) также перемещаются относительно приемной станции. Таким образом, путем выбора номера спутника и станции GPS ионосферные вариации можно контролировать над различными регионами, включая зону очага будущего землетрясения.

С использованием описанной методики было проанализировано несколько десятков землетрясений, в том числе ряд региональных землетрясений, т.е. происходивших на расстояниях до 100–300 км от пунктов наблюдения. Некоторые примеры проанализированных сейсмических событий и зарегистрированные вариации параметров приведены в табл. 1. Практически для всех рассмотренных авторами землетрясений (более 90% случаев) с магнитудой $M > 5$ полученные значимые вариации параметров, позволявшие квалифицировать их как достоверные предвестники. Анализ состояния ионосферы показывает увеличение электронной концентрации за 4–5 сут с последующим значительным ее уменьшением за 1–3 сут до предстоящего землетрясения [Смирнов, 2001б; Бондур и Смирнов, 2005; Смирнов и Смирнова, 2006, 2008]. Такой характер изменения электронной концентрации наблюдался для всех станций, расположенных вблизи эпицентра события. При этом происходит не только уменьшение электронной концентрации, но и “нарушение” ее пространственно-временного хода относительно предыдущих дней. Более чем в 50% случаев для таких событий отмечаются волнообразные вариации с периодами 10–90 мин, подобные тем, которые показаны на рис. 1.

При выполнении сравнительного анализа лазерных деформографических наблюдений и сейсмоионосферных вариаций, полученных при обработке сигналов спутников GPS, нами была выявлена кор-

Таблица 1. Параметры землетрясений, условия регистрации и периоды наблюдаемых вариаций

Дата	Место эпицентра, магнитуда	Станция GPS	Среднее расстояние, км:		Зарегистрированный период вариаций, мин
			до станции	до подионосферной точки	
17.08.1999 г.	Турция, $M = 7.7$	ANKR (Анкара)	3001	100–400	70–90
16.10.1999 г.	Nector Mine, Калифорния $M = 7.1$	ZECK (Зеленчукская)	100	700–1400	–
		COSO (Coso Junction, США)	300	400	–
		AMC2 (Colorado Springs, США)	1200	1300	–
23.09.2001 г.	Греция, $M = 4.7$	SOFI (София)	500	300–600	0–40
		MDVJ (Менделеево)	2000	2000	25–10
22.12.2003 г.	Центральная Калифорния, $M = 6.5$	USLO (San Luis, США)	70	50–500	–
		AMC2 (Colorado Springs, США)	1500	1500	–
21.09.2004 г.	Калининградская обл., $M = 4.8$ и $M = 5.0$	RIGA (Рига) MDVJ (Менделеево)	300	200–400	70–80
08.10.2005 г.	Пакистан, $M = 7.6$	SELE (Алма-Ата)	800	600–900	–
		IISC (Bangalore, Индия)	2500	2100–2900	–
07.05.2008 г.	о-в Хонсю, $M = 6.6$	TSKB (Цукуба, Япония)	200	50–1000	40–60 10–20

реляция волнообразных деформационно-барических колебаний земной поверхности и атмосферного давления в диапазоне частот 1–10 миллигерц, а также синхронно регистрируемых пространственно-временных вариаций ПЭС. На рисунке 2 показаны результаты такого эксперимента, проведенного с помощью 100-метрового лазерного деформографа, установленного на лучеводном полигоне ИПЭ во Фрязино, и четырех GPS станций. Были использованы данные местных станций, расположенных в Звенигороде и Менделеево (Московская обл.), и удаленных, расположенных южнее – в Софии и Анкаре, когда расстояние от лазерного деформографа на порядок больше [Дубров и Смирнов, 2004]. Нами исследованы фрагменты записей, полученных лазерным деформографом, регистрирующим движение земной поверхности, и результаты расчетов скорости изменения ПЭС в ионосфере за период с 22 по 24.09.2001 г. На рисунке 2 и далее временные вариации интегральной электронной концентрации выражаются в стандартных единицах – TEC units в секунду ($1 \text{ TECU}/\text{с} = 10^{16} \text{ эл м}^{-2} \text{ с}^{-1}$).

Результаты сопоставления регистрируемых деформаций земной поверхности и ионосферных вариаций показывают коррелированное возбуждение волнообразных деформационных колебаний земной поверхности и вариаций электронной концентрации в ионосфере. Сравнение фрагментов записей деформаций (рис. 2а) и ионосферных вариаций (рис. 2б, в) за рассматриваемый 3-суточ-

ный период времени демонстрирует одновременное усиление возмущений 23.09.2001 г. по всем каналам регистрации, в то время как поведение наблюдаемых величин имеет практически стационарный характер 22.09 и 24.09 (см. соответствующие треки на рис. 2). При этом характерные периоды аномальных вариаций ПЭС ионосферы, полученные в результате обработки сигналов спутника № 6, составляют 5–10 мин для местных станций (рис. 2б) и 20–40 мин для удаленных станций (рис. 2в). В то же время, на треке 23.09 лазерным деформографом (рис. 2а) зарегистрированы как короткопериодные (5–10 мин), так и длиннопериодные (20–40 мин) колебания.

Интересной особенностью наблюдаемых волновых возмущений является то, что они возникли за 1–2 ч до землетрясения в Ионическом море у берегов Греции (21:16:13.7 GMT, 37.75 N, 20.98 E, $M = 4.7$, $h = 33$ км) – самого близкого регионального сейсмического события за рассматриваемый 3-суточный промежуток времени (см. табл. 2) [Оперативный..., 2001]. Момент землетрясения на рис. 2 показан вертикальной стрелкой. При этом ближайшее по времени сейсмическое событие (№2658, 22:41:04, Западный Иран, $M = 4.0$) имело на порядок меньшую энергию, а более сильные землетрясения ($M = 4.9–5.8$) происходили на эпицентральных расстояниях, в 3–7 раз превышающих расстояние до упомянутого выше землетрясения № 2657 у берегов Греции (табл. 2).

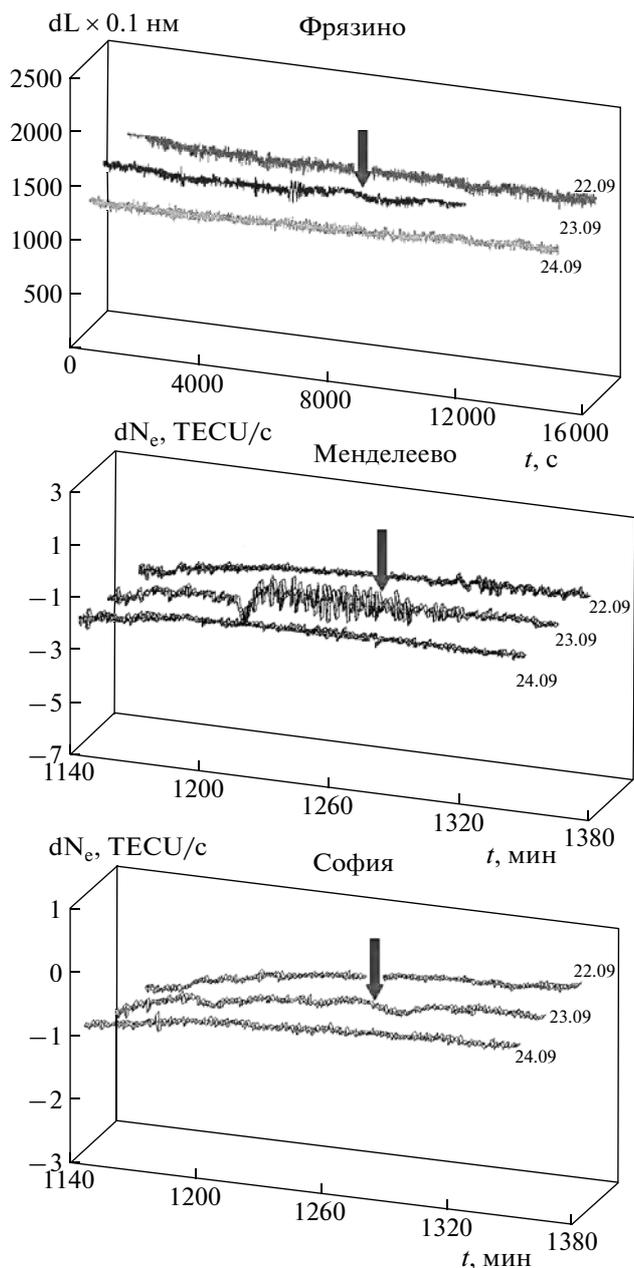


Рис. 2. Деформационно-барические и ионосферные вариации 22, 23 и 24 сентября 2001 г. по данным: а) 100-метрового лазерного деформографа, Фрязино; б) спутника №6, ст. Менделеево; в) спутника №6, ст. София. Момент землетрясения 23.09.2001 21:16:13, $M = 4.7$ (Греция) показан стрелкой.

Экспериментально установленный факт существования одновременного динамического возбуждения литосферы, атмосферы и ионосферы Земли в диапазоне частот 0.01–0.0004 Гц косвенно подтверждается результатом сопоставления зарегистрированных нами процессов с возмущениями магнитного поля Земли по данным Московской геомагнитной обсерватории ИЗМИРАН

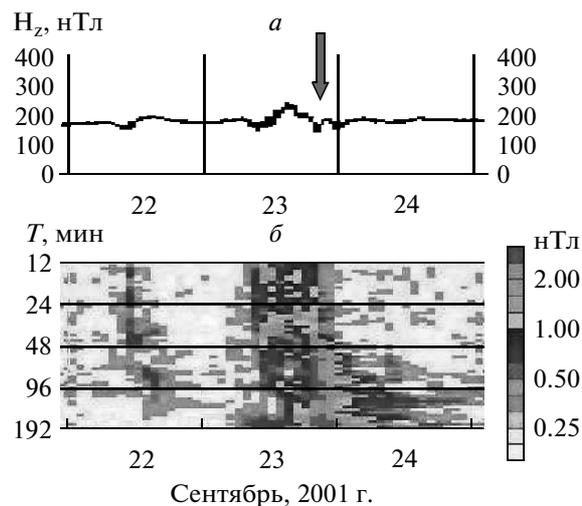


Рис. 3. Возмущения магнитного поля Земли 22–24.09.2001 г. по данным Московской геомагнитной обсерватории ИЗМИРАН [Zaitzev and Odintsov, 2005]: а) вариации Z -компоненты геомагнитного поля; б) спектрально-временная диаграмма этих вариаций в диапазоне периодов 10–190 мин.

[Zaitzev and Odintsov, 2005] за этот же период. На рисунке 3 приведены вариации Z -компоненты магнитного поля и спектрально-временная диаграмма этих вариаций, зарегистрированные в течение 22–24 сентября 2001 г. Возрастание геомагнитных возмущений от уровня фоновых флуктуаций 0.1–0.2 нТл до величин 1–2 нТл с характерными периодами 15–150 мин происходит синхронно по времени с зарегистрированными нами спорадическими волновыми возмущениями в литосфере и ионосфере Земли (рис. 2), и, в целом, наблюдаемый процесс коррелирован с возрастанием региональной сейсмической активности. Отмеченный обсерваторией ИЗМИРАН рост геомагнитных возмущений в другие дни сентября 2001 г. по времени также соответствует росту сейсмической активности в Восточном Средиземноморье.

Приведенный анализ полученных результатов свидетельствует о том, что спорадические волновые явления, зарегистрированные нами одновременно в трех сопредельных геосферах, нельзя отнести к случайному совпадению трех независимых физических процессов. Однако для выявления их связи с возрастанием локальной сейсмической активности Земли необходимо дальнейшее накопление экспериментального материала и его статистический анализ.

Рассмотрим результаты обработки данных, полученные для других более сильных и удаленных землетрясений. На рисунке 4 приведены результаты расчетов временных вариаций ПЭС за период с 22.09 по 28.09.2003 г. для спутника № 24 по данным GPS ст. Цукуба (Япония). В этот пери-

Таблица 2. Землетрясения 22–24 сентября 2001 г. [Оперативный..., 2001]

№	Число	Время в очаге hh:mm:ss	Широта, (градусы)	Долгота, (градусы)	Глубина, км	Магнитуда, M_{PSP}	Район
2641	22	3:23:37	3.97 N	75.88 W	169	5.8	Колумбия
2642	22	6:48:06	55.81 N	154.49 W	33	5.3	Аляска
2643	22	8:31:54	37.42 N	141.39 E	33	4.2	о-в Хонсю
2644	22	10:42:04	18.57 S	174.70 W	33	5.0	о-ва Тонга
2645	22	13:29:20	37.08 S	179.91 E	33	4.9	Новая Зеландия
2646	22	13:34:16	30.29 N	50.38 E	33	4.4	Иран
2647	22	14:57:32	56.20 N	114.83 E	14	4.0	оз. Байкал
2648	22	22:25:01	13.39 N	90.62 W	33	4.7	Гватемала
2649	23	1:14:04	39.55 N	49.44 E	39	4.3	Каспийское море
2650	23	2:48:30	37.17 N	71.65 E	130	4.0	Афганистан
2651	23	6:41:21	5.95 S	147.47 E	33	4.6	Н. Гвинея
2652	23	8: 6:11	13.05 N	120.50 E	33	4.6	о-в Миндоро
2653	23	8:30:16	8.00 S	155.60 E	33	4.3	Соломоновы о-ва
2654	23	12:25:41	12.19 N	95.30 E	33	4.2	Андаманские о-ва
2655	23	14:47:56	24.43 N	94.80 E	33	4.3	Мьянма – Индия
2656	23	15:16:47	46.48 N	149.74 E	166	4.1	Курилы
2657	23	21:16:13	37.75 N	20.98 E	33	4.7	Ионическое море (Греция)
2658	23	22:41:04	32.56 N	49.14 E	33	4.0	Западный Иран
2659	24	1:29:10	0.03 S	35.91 E	33	4.9	Кения
2660	24	4:49:58	40.37 S	175.97 E	33	5.0	Новая Зеландия
2661	24	5:31:25	36.87 N	71.49 E	118	4.0	Афганистан
2662	24	15:55:37	44.81 N	147.25 E	138	4.0	Курилы
2663	24	17:15:39	2.02 N	128.08 E	129	4.6	о-в Хальмахера
2664	24	18: 5:49	34.32 N	102.49 E	33	4.3	Китай
2665	24	18:15:49	14.92 S	166.86 E	33	4.6	Новые Гебриды
2666	24	19:35:15	36.41 N	140.19 E	82	4.6	о-в Хонсю
2667	24	19:57:27	36.40 N	140.20 E	79	5.0	Район о-ва Хонсю
2668	24	22:44:55	18.51 N	146.75 E	35	4.3	Марианские о-ва

од времени произошла серия крупных землетрясений, наиболее сильные из них – два в Японии (25.09.2003 г., Хоккайдо, $M_S = 8.3$ 19:50:08 и $M_S = 7.2$ 21:08:00) и два на Алтае (27.09.2003 г., Казахстан-Синьцзянь, $M_S = 7.3$ 11:33:26 и Горный Алтай, $M_S = 6.7$ 18:52:47).

Кроме ярко выраженного аномального хода и временных вариаций ПЭС за сутки и часы до указанных землетрясений, наблюдается необычно высокое абсолютное значение скорости роста ПЭС на конечном участке траектории 24.09.2003 г. (около 23:00 UTC), которое в 2–3 раза превышает соответствующие значения этой скорости до и после землетрясений, т.е. 22.09 и 28.09.2003 г. Замечательной особенностью кривой хода ПЭС за 25.09.2003 г. является наличие контрастных и значительных по амплитуде вариаций с 20:05 до 20:15, т.е. спустя

15 мин после первого наиболее сильного сейсмического события с магнитудой $M_S = 8.3$. Аналогичные вариации выделяются также и на записи 100-метрового лазерного деформографа во Фрязино (см. нижнюю запись на рис. 5).

Кроме стандартных объемных и поверхностных сейсмических волн на записи интерферометра присутствует деформационно-барическая вариация, близкая по форме ионосферному отклику, но в несколько раз растянутая по времени – ее период составляет ~40–50 мин. Такой же величиной можно оценить и задержку времени ее прихода во Фрязино. Отсюда следует, что скорость распространения выделенного возмущения лежит в пределах 8400–10500 км/ч или 2.3–2.9 км/с, что соответствует скоростям распространения поверхностных сейсмических волн. По-видимому, такую же природу имеют отмеченные нами ранее крупномас-

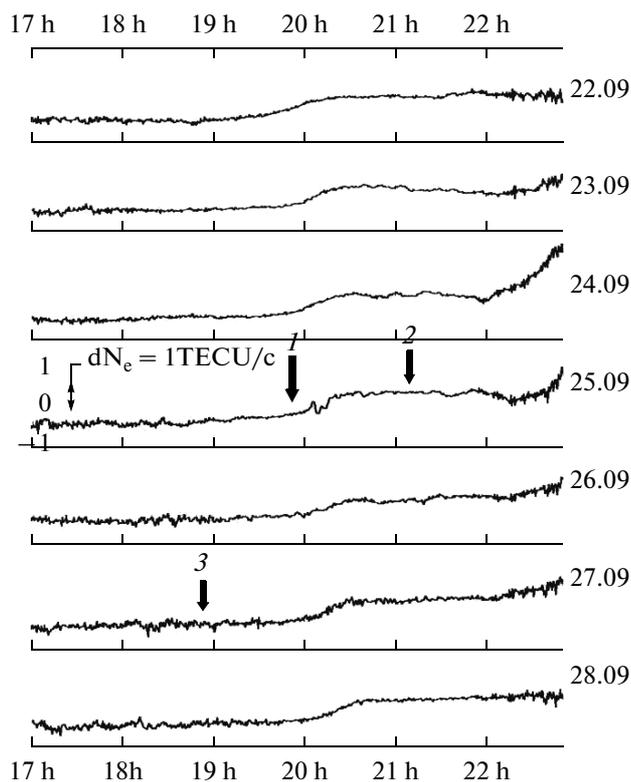


Рис. 4. Вариации интегральной электронной концентрации (TEC units) 22–28.09.2003 г., спутник № 24, GPS-ст. Цукуба (Япония); стрелками показаны землетрясения: 1 – Хоккайдо, $M_S = 8.3$; 2 – Хоккайдо, $M_S = 7.2$; 3 – Горный Алтай, $M_S = 6.7$.

штабные вариации с периодами 20–40 мин, которые были зарегистрированы при расстоянии между деформографом и станциями GPS ~ 2000 км в период землетрясения у берегов Греции (раздел 3.1).

Мониторинг ионосферы с двух станций, расположенных наиболее близко к эпицентру алтайских сейсмических событий 2003 г., проводился в период с 24 по 28 сентября. На рисунке 6 приведены высотные профили распределения электронной концентрации, полученные по наблюдениям GPS ст. URUM. Данная станция располагалась примерно на одной долготе с эпицентрами землетрясений и была удалена от них на расстояние ~600 км.

Видно, что 27 сентября, в день землетрясений, в период с 0 до 3 ч произошло значительное уменьшение электронной концентрации (25–26 сентября в этот период времени значение электронной концентрации примерно одинаковы). По результатам обработки сигналов других спутников было установлено, что снижение электронной концентрации в целом 27 сентября наблюдалось до 6:00–7:00 UT.

Уменьшение электронной концентрации 25–26 сентября составило ~20% относительно ее максимального значения 24 сентября. Дальней-

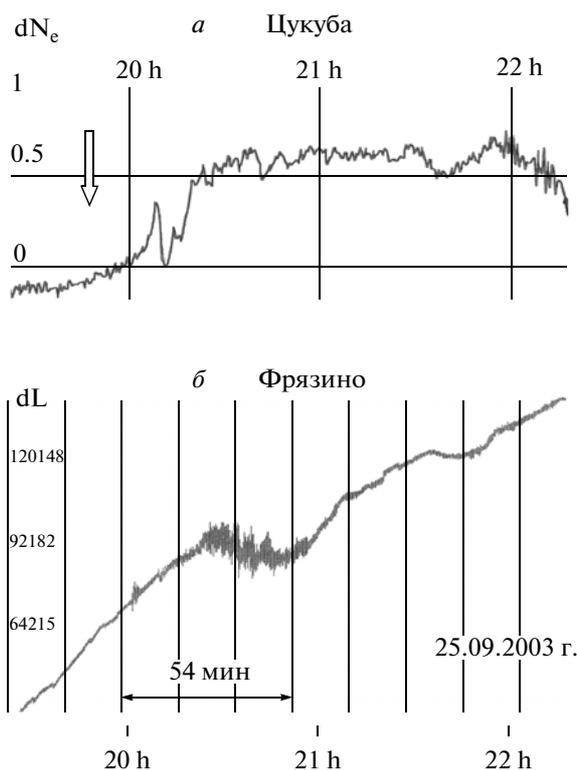


Рис. 5. Синхронная запись возмущений ионосферы и земной поверхности 25.09.2003 г. по данным: а) спутника № 24, ст. Цукуба; б) лазерного деформографа (Фрязино); стрелкой показан момент землетрясения 19:50:08, Хоккайдо, $M_S = 8.3$.

шее уменьшение в утренние часы 27 сентября, в день землетрясений, достигло 30% относительно значения электронной концентрации 26 числа или более 40% относительно 24 сентября.

Лазерный деформограф во Фрязино перед указанными алтайскими землетрясениями зафиксировал продолжавшийся ~8 ч микросейсмический предвестник в виде “замирания” амплитуды узких спектральных пиков в диапазоне частот 1–3 Гц, выделяемых высокоразрешающими спектроскопическими методами. На рисунках 7а и 7б представлены спектрально-временные диаграммы, демонстрирующие этот процесс. Амплитуды наиболее интенсивных в этом диапазоне пиков на частотах 1.94 и 2.79 Гц, составляющие ~64 отн. ед. до развития предвестника рис. 7а, уменьшаются во время “затишья” более чем в 7 раз, и на рисунке 7б практически не выделяются на случайном шумовом фоне. Максимальные амплитуды спектральных компонент фона здесь не превышают 9–10 единиц (предельная амплитуда деформаций порядка $\Delta L/L = 10^{-11}–10^{-12}$). Наблюдаемый процесс согласно общепринятой классификации можно рассматривать как сейсмический предвестник, проявляющийся в виде сейсмического затишья [Соболев и Пономарев, 2003].

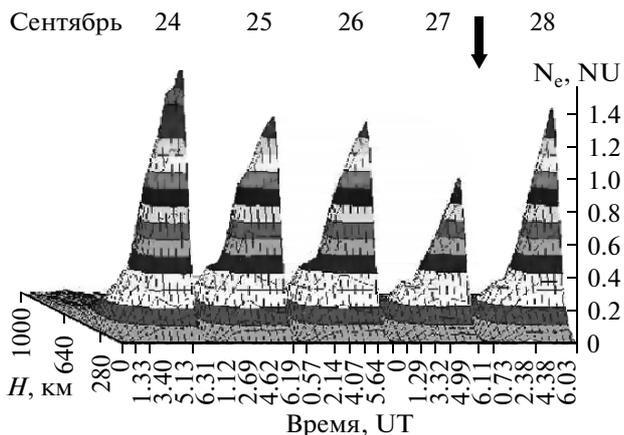


Рис. 6. Высотные профили электронной концентрации N_e в ионосфере 24–28 сентября 2003 г. (спутник № 14, станция URUM). По оси H указана высота в км, $1 \text{ NU} = 2 \times 10^6 \text{ эл см}^{-3}$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о наличии корреляции между динамическими процессами, происходящими в атмосфере и ионосфере Земли, и регистрируемыми одновременно движениями земной поверхности в широком диапазоне временных периодов и пространственных масштабов.

Методы лазерно-интерферометрического измерения деформаций земной поверхности и вариаций давления атмосферы, дополненные данными радиопросвечивания ионосферы Земли сигналами орбитальных систем навигационного

позиционирования, позволяют выявить ряд особенностей наблюдаемых геофизических явлений.

Обнаруженные процессы развития возмущений в трех соприкасающихся геофизических средах представляют собой синхронное возрастание деформаций земной поверхности, вариаций атмосферного давления и уровня пространственно-временных модификаций электронной концентрации в слое $F2$ ионосферы с преобладающими периодами от 5–10 до 20–50 мин при расстояниях между пунктами наблюдений от 100 км до 7 тыс. км соответственно. Отмеченные явления предваряют и (или) сопровождают сейсмические события регионального масштаба, а также удаленные землетрясения с магнитудами $M = 7–8$.

Существующие физические модели, описывающие рассматриваемые атмосферно-литосферные и сейсмоионосферные взаимодействия остаются до сих пор весьма дискуссионными. Наше предположение состоит в том, что наблюдаемые волновые явления не локальны, т.е. характерны не только для земной поверхности и нижних слоев атмосферы [Volkov et al., 1999], но охватывают также и другие прилегающие геосферы, в том числе и ионосферу Земли. Взаимосвязь факторов, участвующих в рассматриваемых процессах, может быть установлена в результате сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных.

Полученные выше оценки пространственно-временных масштабов: $10^2–10^3 \text{ км}$ и $10^2–10^4 \text{ с}$ для выявленных возмущений позволяют сделать некоторые выводы о характере наблюдаемых явлений. По результатам независимых данных синхронного измерения деформаций земной поверхности и вариаций уровня подземных вод [Дубров и др., 2007] оценка пространственного масштаба

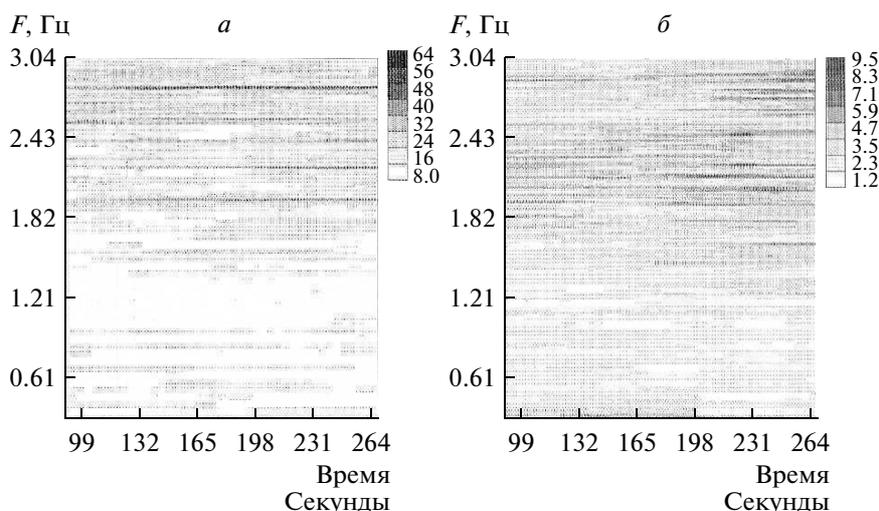


Рис. 7. Микросейсмический фон в диапазоне 1–3 Гц (Фрязино): *a*) в обычных условиях; *б*) во время “затишья” 26.09.2003 г. (Амплитуды спектральных компонент отображаются по шкале яркостей справа от диаграммы).

для сравнительно короткопериодных гидро-барических возмущений составляет 90–100 км при характерных временах возмущений 20–30 мин. Показательно, что такой же пространственный масштаб имеет очаг готовящегося землетрясения с магнитудой $M \sim 7$ [Соболев и Пономарев, 2003], а получаемый из приведенных пространственно-временных масштабов диапазон характерных скоростей $V \sim (10^2-10^3 \text{ км})/(10^2-10^4 \text{ с}) \sim 10^2-10^3 \text{ м/с}$ включает такие характеристики атмосферы и ионосферы, как максимальные скорости перемещения ($\sim 10^2 \text{ м/с}$) воздушных масс в зоне тропических циклонов, скорости перемещения среднемасштабных (150–200 м/с) волновых пакетов в E - и F -областях ионосферы, а также крупномасштабных ($\sim 1000 \text{ м/с}$) ионосферных возмущений типа уединенных волн [Афраймович и др., 2004]. Результаты наших измерений (см. рис. 5) показывают, что сейсмоионосферные возмущения могут распространяться еще на порядок быстрее — со скоростями распространения сейсмических волн в твердой Земле.

По-видимому, только комплексное изучение широкого спектра динамических процессов во всех взаимодействующих геосферах с применением высокоточных инструментальных методов позволит подойти к созданию адекватной физической модели наблюдаемых явлений и, в том числе, к решению на ее основе такой важной практической проблемы, как прогнозирование сейсмической опасности.

5. ВЫВОДЫ

На основе лазерно-интерферометрических наблюдений деформаций земной поверхности и вариаций давления атмосферы, дополненных данными радиопросвечивания ионосферы Земли, показано наличие корреляции между процессами, регистрируемыми одновременно в этих трех средах, и развитием сейсмической активности Земли.

Зарегистрированы динамические процессы с характерными пространственно-временными масштабами 10^2-10^3 км и 10^2-10^4 с соответственно. Рассмотрена связь наблюдаемых явлений с региональными сейсмическими событиями, а также с удаленными землетрясениями с магнитудами $M = 7-8$.

Обнаруженные особенности динамического взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы Земли могут быть использованы для разработки технологии раннего обнаружения предвестников землетрясений и других природоопасных явлений. Представляется важным также исследование возможной реакции контролируемых геосфер на воздействия техногенного происхождения, в том числе, использование разрабатываемых

методов при выполнении геофизического и геоэкологического мониторинга.

Авторы считают необходимым отметить внимательное отношение рецензента проф. В.А. Липеровского к данной работе и высказанные им чрезвычайно полезные замечания, учет которых, несомненно, улучшил ее содержание. Работа выполнена при финансовой поддержке программы ОФН РАН “Плазменные процессы в солнечной системе”, а также гранта РФФИ №02-05-64720.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Алешин В.А., Волков В.А., Дубров М.Н., Калинина А.В., Матвеев Р.Ф., Моисеенко С.А.* Высокоточные наблюдения за движениями земной поверхности и подземных сооружений // Сергеевские чтения. Вып. 5. С. 435–439. М.: ГЕОС. 2003.
- *Андреанов В.А., Смирнов В.М.* Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника. Т. 38. №7. С. 1326–1335. 1993.
- *Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Первалова Н.П.* Определение динамических характеристик перемещающихся волновых пакетов по данным полного электронного содержания на одной станции GPS // Солнечно-земная физика. Вып.5. С. 87–89. 2004.
- *Белов С.В., Мигунов Н.И., Соболев Г.А.* Магнитные эффекты, сопровождающие сильные землетрясения на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 14. № 2. С. 380–382 1974.
- *Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // ДАН. Т. 402. № 5. С. 675–679. 2005.
- *Волков В.А., Дубров М.Н., Калинина А.В., Матвеев Р.Ф., Николаев А.В.* О возможной связи волновых динамических возмущений в атмосфере и литосфере Земли / Тез. докл. V Междунар. конф. “Новые идеи в науках о Земле”. Москва, 3–24 апреля 2001 г. Т. 4. С. 65. М.: МГГА. 2001.
- *Гогатишвили Я.М.* Геомагнитные предвестники интенсивных землетрясений в спектре геомагнитных пульсаций с частотами 1–0.02 Гц // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 24. № 4. С. 697–700. 1984.
- Деформационные процессы в период, предшествующий Спитакскому землетрясению. Ред. Нерсесов И.Л., Латынина Л.А. М.: ИФЗ АН СССР. 100 с. 1989.
- *Дубров М.Н.* Исследование распространения лазерных пучков в протяженных подземных лучеводах. Автореферат канд. дисс. М.: ИРЭ АН СССР. 20 с. 1978.
- *Дубров М.Н., Латынина Л.А., Матвеев Р.Ф., Пономарев А.В.* Наблюдение сверхдлиннопериодных деформационных колебаний земной поверхности, связанных с малыми вариациями атмосферного давления // Физика Земли. № 12. С. 22–30. 1998.

- Дубров М.Н., Смирнов В.М. Возбуждение земной поверхности и ионосферы, регистрируемые лазерным деформографом и ионосферным профилометром на основе GPS данных / Тез. докл. региональной X конференции по распространению радиоволн. Санкт-Петербург, 26–28 октября 2004 г. С. 69–70. СПб.: ВВМ. 2004.
- Дубров М.Н., Казанцева О.С., Манукин А.Б., Понятовская В.И. Исследование синхронных деформаций земной поверхности и вариаций уровня подземных вод // Физика Земли. № 5. С. 71–79. 2007.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 304 с. 1992.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Мейстер К.В., Липеровская Е.В. Физические модели связей в системе литосфера–атмосфера–ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 6. С. 831–843. 2008.
- Любушин А.А. (мл.), Осика В.И., Пчелинцев В.А., Петухова Л.С. Анализ отклика деформаций земной коры на вариации атмосферного давления // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 2. С. 81–89. 1992.
- Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. Статистический анализ отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления // Физика Земли. № 12. С. 74–80. 1993.
- Намгаладзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Физический механизм и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых в полном электронном содержании // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 2. С. 267–277. 2009.
- Оперативный сейсмологический каталог. Обнинск: ЦОМЭ ГС РАН. 2001.
- Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиосвечения ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника. Т. 46. № 1. С. 47–52. 2001.
- Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Электрон. журн. “Исследовано в России”. № 153. С. 1759–1767. 2001б. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/153.pdf>
- Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Детектирование сейсмоионосферных вариаций в период геомагнитных возмущений по данным навигационных систем / Соврем. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. научн. статей. М.: “Азбука-2000”, Т. 2. № 3. С. 242–246. 2006.
- Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Исследование возможности применения спутниковых навигационных систем для мониторинга сейсмических явлений // Вопр. электромеханики. Т. 105. С. 94–104. 2008.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 270 с. 2003.
- Трубицын А.П., Макалкин А.Б. Деформации земной коры под действием атмосферных циклонов // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 5. С. 94–96. 1976.
- Dubrov M.N. Stratigraphy of earthquake precursors according to the laser strainmeters data / European Geosciences Union, General Assembly 2006, Vienna, Austria, 02–07 April 2006 / Geophysical Research Abstracts. V. 8. A03232. 2006. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-03232.
- Hsiao C.C., Liu J.Y., Oyama K.-I., Yen N.L., Wang Y.H., Miao J.J. Ionospheric electron density anomaly prior to the December 26, 2006 M7.0 Pingtung earthquake doublet observed by FORMOSAT-3/COSMIC // Phys. Chem. Earth. P. A/B/C. V. 34. № 6–7. P. 474–478. 2009.
- Ponomarev A., Smirnov V., Qian J. Changes of seasonal variations (apparent resistivity) before earthquake / Proc. 1st International Workshop on Earthquake Prediction, Athens, Greece, 6–7 November 2003.
- Pulinet S.A., Leyva Contreras A., Bisiacchi-Giraldi G., Ciruolo L. Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003 // Geofisica International. V. 44. P. 369–377. 2005.
- Smirnov V.M., Smirnova E.V. Application of radio trans-lu-cence method for the ionospheric foreshock detection / Proc. 12th International ionospheric effects symposium. Ed. John M. Goodman. Alexandria, Virginia, May 13–15, 2008. P. 684–691. 2008.
- Volkov V.A., Dubrov M.N., Matveev R.F. The lithosphere and atmosphere interaction activity and its possible connection with coseismic process / IUGG’99 / Abstracts of XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Birmingham, 18–30 July, 1999. Week A and B. P. 171. A. 467. 1999.
- <http://www.iugg.org/assemblies/1999birmingham/1999abstracts.pdf> (2009)
- Yumoto K., the MAGDAS/CPMN Group. MAGDAS/CPMN Project for Litho-Space Weather during IGY/ISWI (2007–2012). Сб. докл. V международной конференции “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений”, с. Паратунка, Камчатский край, 2–7 августа 2010 г. Отв. ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН. С. 229–250. 2010.
- Zaitzev A.N., Odintsov V.I. Geomagnetic field variations in Moscow observatory, registered by CMVS-6 digital magnetic variation station (<http://www.izmiran.rssi.ru/magnetism/main.htm>). 2005.