

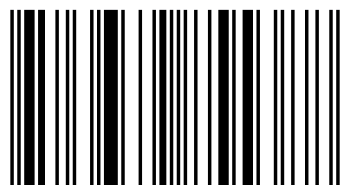
Основы аэрокосмических методов мониторинга землетрясений

В книге изложены основы современных представлений о методах мониторинга сейсмической активности, базирующихся на регистрации геофизических явлений, сопровождающих рост этой активности в течение нескольких дней до землетрясения. Приводится обзор результатов наблюдения вариаций характеристик атмосферы, оптических и электромагнитных излучений, возмущений параметров полей и плазмы в ионосфере в преддверии сильных землетрясений. Обсуждаются модели литосферно – ионосферных связей, которые могут служить основой для разработки новых методов аэрокосмического мониторинга и краткосрочного прогнозирования землетрясений. Дан обзор теории электродинамического воздействия сейсмических процессов на ионосферу. Приведены основные принципы построения аэрокосмической системы раннего обнаружения и мониторинга предвестников землетрясений. Книга рассчитана на научных работников, специализирующихся в области геофизики, физики атмосферы и околоземного космического пространства и разработки методов мониторинга природных и техногенных катастроф, а также на аспирантов и студентов старших курсов технических университетов.



Валерий Сорокин

Доктор физико – математических наук, профессор.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), Российской академии наук.



978-3-639-85538-8

Аэрокосмический мониторинг

Сорокин, Чмырев, Тронин



Валерий Сорокин · Виталий Чмырев · Андрей Тронин

Основы аэрокосмических методов мониторинга землетрясений

Монография


Palmarium
academic publishing

**Валерий Сорокин
Виталий Чмырев
Андрей Тронин**

Основы аэрокосмических методов мониторинга землетрясений

**Валерий Сорокин
Виталий Чмырев
Андрей Тронин**

**Основы аэрокосмических методов
мониторинга землетрясений**

Монография

Palmarium Academic Publishing

Impressum / Выходные данные

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имён, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брендах и их можно использовать всем без ограничений.

Coverbild / Изображение на обложке предоставлено: www.ingimage.com

Verlag / Издатель:

Palmarium Academic Publishing

ist ein Imprint der / является торговой маркой

OmniScriptum GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Германия

Email / электронная почта: info@palmarium-publishing.ru

Herstellung: siehe letzte Seite /

Напечатано: см. последнюю страницу

ISBN: 978-3-639-85538-8

Copyright / АВТОРСКОЕ ПРАВО © 2014 OmniScriptum GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Все права защищены. Saarbrücken 2014

Содержание

Введение.....	2
1. История и современное состояние исследований предвестников землетрясений и методов мониторинга.....	4
2. Геофизические явления, сопровождающие землетрясения.....	7
3. Результаты наблюдения квазистатического электрического поля в системе атмосфера – ионосфера.....	24
4. Модели проникновения квазистатического электрического поля в ионосферу.....	29
5. Электрическое поле сейсмического происхождения в атмосферно – ионосферной электрической цепи.....	41
6. Ионосферные неоднородности, связанные с возмущением тока в атмосферно – ионосферной электрической цепи.....	48
7. Электромагнитные эффекты, сопровождающие возмущение тока в атмосферно – ионосферной электрической цепи.....	63
8. Деформации земной поверхности.....	74
9. Тепловые эффекты.....	80
10. Модели литосферно-атмосферных связей в сейсмических процессах.....	95
11. Основные мировые тенденции в сфере исследований предвестников землетрясений.....	110
Заключение.....	126
Литература.....	128

Введение

Ежегодно человечество испытывает огромные финансовые потери, связанные с землетрясениями и другими природными катастрофами, утраты человеческих жизней и условий для существования, а также серьезные социальные потрясения. Печальная статистика показывает, что ущерб от разрушительного землетрясения в Кобе (Япония) составил около 100 миллиардов долларов США, китайское правительство потратило более 150 миллиардов долларов на восстановление региона, разрушенного Сычуанским землетрясением. От землетрясения в Гаити 2010 г. пострадало примерно 3 миллиона человек, 316 000 человек погибло и около 1 000 000 остались без крова. Землетрясение и цунами 11 марта 2011 г. в Японии убили более 20 тысяч человек, разрушили многие прибрежные города, создали аварийную ситуацию на атомной электростанции и утечку радиоактивных веществ в атмосферу и море. Согласно публикациям (см., например, *The New York Times*, March 15, 2011), убытки японских страховых компаний, глобальных страхователей и перестраховщиков, других инвесторов в катастрофические бонды в Японии превышают 100 миллиардов долларов США. Потери мировой экономики в связи с событием 11 марта 2011 г. в Японии, согласно одной из крупнейших страховых компаний мира *Munich Re*, оцениваются величиной 265 миллиардов долларов США. Все это свидетельствует об актуальности проблемы и дает сильную мотивацию к разработке эффективных аэрокосмических и наземных технологий раннего обнаружения и мониторинга предвестников землетрясений, как важнейшего элемента системы прогнозирования катастроф. Если бы существовала эффективная система раннего предупреждения, многих из этих потерь можно было бы избежать. Стоимость такой системы чрезвычайно мала по сравнению с выгодой от ее использования.

До сих пор основная часть экспериментальных данных по ионосферным предвестникам землетрясений была получена в некоординированных спутниковых проектах, предназначенных для исследования других явлений в косми-

ческой плазме, в то время, как эффекты воздействия землетрясений на ионосферу были получены в виде сопутствующих научных результатов. Единственная целевая научная программа, ориентированная на экспериментальное исследование связанных с землетрясениями явлений в космическом пространстве, была реализована в рамках спутникового проекта ДЕМЕТЕР кооперацией французский институтов с участием многих коллабораторов, включая Институт физики Земли и Геофизическую службу Российской Академии наук. Хотя это был успешный проект, природа литосферно-ионосферного взаимодействия и механизмы трансформации сейсмических процессов в электромагнитные и плазменные возмущения ионосферы и модификации химического состава и электродинамических параметров атмосферы остаются до конца не выясненными. Значение многих явлений и процессов, которые рассматриваются, как предвестники землетрясений, требует уточнения и подтверждения. Из-за малой величины возмущений, обусловленных сейсмической активностью, существует проблема выделения полезных сигналов на фоне сильных помех от других природных или промышленных источников. Следовательно, путь к решению проблемы – созданию системы раннего предупреждения, должен начинаться с разработки и запуска на орбиту специализированных космических аппаратов и проведения вместе с координированными наземными наблюдениями целевых экспериментов для отработки технологии раннего обнаружения предвестников землетрясений и демонстрации возможности ее применения для краткосрочного прогнозирования землетрясений. В данной монографии сделан анализ современного состояния и перспектив развития экспериментальных и теоретических исследований в этой области. На основе анализа выработаны рекомендации по построению интегрированной аэрокосмической и наземной системы мониторинга для всестороннего изучения механизмов формирования и взаимосвязи предвестников землетрясений в различных средах и применения результатов для разработки эффективных методов краткосрочного прогнозирования землетрясений, базирующихся на координированных измерениях в ионосфере, атмосфере и на поверхности Земли.

1. История и современное состояние исследований предвестников землетрясений и методов мониторинга

Спутниковые методы стали применяться для исследования землетрясений почти сразу с появлением спутниковых данных. В первую очередь они были связаны со структурными исследованиями. По космическим снимкам выделялись активные современные разломы и структуры. У этого метода есть существенный недостаток - невозможно наблюдать короткоживущие динамические процессы, связанные с подготовкой и реализацией землетрясения. Спутниковые методы первоначально были простой экстраполяцией методов геологической интерпретации аэрофотоснимков в космос. Дальнейшее развитие получили геофизические методы дистанционных наблюдений. Современные спутниковые методы изучения землетрясений опираются на физические процессы, сопровождающие землетрясения: деформации земной поверхности, изменения температуры и влажности земной поверхности и приземной атмосферы, вариации газового состава и концентрации аэрозолей в атмосфере, возмущения характеристик электромагнитного поля и концентрации заряженных частиц в ионосфере. На сегодняшний день наиболее широкое развитие получили спутниковые методы наблюдения за деформациями земной поверхности, тепловыми, плазменными и электромагнитными явлениями в сейсмическом цикле.

Как горизонтальные, так и вертикальные деформации от десятков сантиметров до метров обнаруживаются на земной поверхности после землетрясения. Такого масштаба смещения уверенно регистрируются спутниковой интерферометрией (Massonnet et al., 1993). Деформации до землетрясения на порядок меньше – миллиметры и сантиметры. Всего несколько случаев такого рода деформаций были зафиксированы спутниковой интерферометрией (Tsai et al., 2006, Kobayashi et al., 2012). Дальнейшее развитие технологии лежит в применении радаров L-диапазона (длина волны 23 см) и комбинации наблюдений с данными от систем позиционирования GPS/ГЛОНАСС. В настоящее время ак-

тивно развиваются исследования, связанные с использованием космической тепловой съёмки для изучения землетрясений (Ouzounov et al., 2006, Tramutoli et al., 2005, Lixin Wu and Shanjun Liu, 2009, Tronin, 2010). Исследованы тепловые аномалии по всем сейсмоопасным регионам Земли, накоплен статистический материал по нескольким сотням землетрясений. Была продемонстрирована связь тепловых аномалий на земной поверхности и сейсмической активности.

Ещё в XIX веке научная мысль пыталась связать электричество и землетрясения. Уильям Стьюкли первый предположил, что электрические токи являются причиной землетрясений. Основываясь на этой гипотезе, Пьер Бертолон предложил защитить целые области Франции от воздействия землетрясений, используя громоотводы. В том же XIX веке были зафиксированы крайне интересные научные факты, свидетельствующие о проявлении электрических процессов в землетрясениях. Так, например, при землетрясении в Иркутске 20 февраля (3 марта) 1871 г., $M=6.3$, во время толчков в течение от 8 до 10 секунд была прервана передача телеграмм из-за падения силы тока в гальванических цепях. Существенное ослабление силы тока в батарее могло быть вызвано увеличением проводимости воздуха. Так или иначе, значительные электрические, или, точнее, электромагнитные процессы происходят при подготовке землетрясения и собственно во время толчка. В работе (Varotsos and Alexopoulos, 1998) рассмотрена технология прогноза землетрясений на основе регистрации земных токов. Анализируя аномалии теллурических токов, авторы применили этот метод для прогноза нескольких землетрясений в Греции.

Современные электромагнитные исследования землетрясений начались с работы Е.А. Чернявского (1955). Ее автор в 1924 проводил измерения атмосферного электричества в Джалал-Абаде (Киргизия). За 3 часа до сильного толчка он наблюдал необычные данные электрометра, которые нельзя было объяснить метеорологическими причинами. Напряженность электрического поля достигала 1000 В/м на эпицентральной расстоянии около 150 км. Подоб-

ные исследования атмосферного электричества продолжаются до настоящего времени (Kamogawa и др., 2004). Электромагнитные явления, сопровождающие землетрясения, изучаются в различных диапазонах частот и разными методами. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на спутниках, свидетельствуют о существовании связи между электромагнитными и плазменными возмущениями в ионосфере с процессами в литосфере Земли. Результаты наблюдений обсуждались в ряде обзоров (Гохберг и др., 1988; Липеровский и др., 1992; Molchanov, 1993; Бучаченко и др., 1996; Varotsos, 2001; Hayakawa and Molchanov, 2002).

Электромагнитные явления представляют интерес для литосферно-атмосферных связей, поскольку они влияют на состояние приземного слоя атмосферы и ионосферы перед землетрясениями. Ионосферные возмущения, связанные с землетрясениями, описаны во множестве работ (см., например, Hayakawa и Molchanov, 2002; Hayakawa, 2001; Гохберг и др., 1988; Гошджанов и др., 1996). Отмечены сильные аномалии концентраций ионов в слое F (200–350 км), связанные с землетрясениями. Ионосферные эффекты были обнаружены и в ряде недавних разрушительных землетрясений: Суматра, 2004 год (Hayakawa et al., 2005; Liu et al., 2010), Кашмир, Пакистан, 2005 год (Bondur, 2006), Сычуань, Китай, 2008 год (Ma and Wu, 2011), Сычуань, Китай, 2008 год (Zhang and Shen, 2011; Ma and Wu, 2012), Гаити, 2010 год (Hayakawa et al., 2011), Тохоку, Япония, 2011 год (Cohen и Marshall, 2012). В настоящее время природа этих аномалий не вполне ясна. В качестве гипотезы, объясняющей происхождение аномалий, в основном, рассматриваются механизмы воздействия на ионосферу акустико – гравитационных волн и электрического поля. Согласно первому механизму, тепловые аномалии на земной поверхности и выбросы газа в атмосферу порождают гравитационные волны, которые и вызывают аномалии в ионосфере (Molchanov et al., 2001; Гохберг и др., 1996; Афраймович и др., 2001). Было показано, что при увеличении концентрации CO_2 в два раза выше фоновых значений в приземном слое толщиной 3 м, тем-

пература поверхности увеличится на 3 градуса за время менее, чем 3 часа. Расчеты проводились только для линии поглощения 15 мкм.

К ионосферным явлениям можно отнести свечение атмосферы. В конце 80-х годов сотрудники Абастуманской астрофизической обсерватории Академии наук Грузии Торошелидзе и Фишкова (1989) обнаружили, что за несколько часов до начала землетрясения в нижней ионосфере (в слое E, 85-110 км) над эпицентром возрастает интенсивность свечения в линиях атомарного кислорода (557,7 мкм и 630,0 мкм). В 80-х годах появились работы, в которых привлекались электромагнитные явления для объяснения атмосферных процессов. Это работы Садовского и др. (1986) и Милькиса (1986), а также другие исследования, связывающие тектонические процессы, электромагнитное излучение и состояние атмосферы (Martelli et al., 1989). Представляют интерес пионерские исследования, экспериментально доказывающие возможность нагрева атмосферы, содержащей CH_4 и CO_2 , переходными электромагнитными полями (Kong и др., 1999). Роль литосферно - атмосферного взаимодействия при электромагнитных исследованиях землетрясений отражена в серии монографий (Найакawa, Fujinawa, 1994, Найакawa, 1999, Найакawa, Molchanov, 2002). В них определена важнейшая роль атмосферы для понимания процессов взаимодействия литосферы и ионосферы.

2. Геофизические явления, сопровождающие землетрясения

Для анализа исторических термальных и атмосферных явлений при землетрясениях был составлен каталог (Тронин, 2011). Он представляет собой описание землетрясений, для которых отмечены космические, атмосферные, гидрогеологические, акустические, электромагнитные и геотермальные явления, а также изменения самочувствия людей и поведения животных. Главное внимание в нем уделяется атмосферным и геотермическим явлениям, связанным с сейсмической активностью. Каталог содержит описание 1507 событий, начиная с 550 г. до н.э. и заканчивая Измитским землетрясением в Турции 17 августа 1999 г. Он состоит из двух частей: собственно каталога с полным описанием

событий и краткой формализованной таблицы, где описания землетрясений классифицированы по типам природных явлений.

Природные явления, наблюдавшиеся в связи с землетрясениями, показаны в Таб. 1.

Таблица 1

Природные явления	Количество событий	Природные явления	Количество событий
Метеоры, огненные шары	123	Необычный дождь, град	23
Полярные сияния	27	Тихая, ясная погода	165
Свет, пламя, призраки	123	Безветрие, затишье	104
Цвет неба, Солнца и Луны	56	Туман, дым, пыль	93
Затмение	32	Пар, сырость, влажность	79
Темень, сумрак	24	Облака	89
Комета, звезда	24	Повышение давления	36
Горячая вода	64	Падение давления	81
Гидрогеология	158	Возмущения в атмосфере	29
Запах	78	Эпидемии и эпизоотии	45
Климат (похолодание)	20	Необычные явления растительного мира	21
Климат (потепление, засуха)	50	Необычное поведение животных	97
Похолодание резкое	79	Люди (поведение и ощущения)	28
Потепление резкое	129	Цунами и сейши	22

Наводнение	41	Звук	140
Гроза (молния)	143	Вулкан	23
Буря, шторм, тайфун	236	Выброс газа, огня из земли	102
Ветер, переменная погода	189	Изменения рельефа	12
Дождь, град, снег	245	ЭМ явления	72

Анализ каталога землетрясений позволяет сделать некоторые выводы:

1) Атмосферные катаклизмы на всей истории человечества рассматривались, как неотъемлемая часть сейсмического процесса. Только в XX веке эта связь была подвергнута сомнению.

2) Исторические описания землетрясений сильно зависят от современных взглядов на происхождение землетрясений. Если в античные времена было много упоминаний о световых явлениях, молниях и поведении животных, то в средние века и позже, когда возобладали взгляды Аристотеля на происхождение землетрясений, возникло множество сообщений об огненных метеорах, неожиданной жаре, бурях, дожде. В XX веке чаще встречались упоминания о гидрогеологических и электромагнитных явлениях, снова появился интерес к биологическим явлениям.

3) Распределение числа описаний землетрясений по годам зависит от источника. Так, максимальное число описаний (291) относится к промежутку 1825-1849 гг. Это последний временной интервал в каталоге Маллета.

Анализ исторических данных по существу показывает следующее.

1) Наблюдалось большое количество различных оптических явлений: метеоры, огненные шары, пролёт огненных змеев и шаровых молний, свет, пламя, призраки.

2) На 158 случаев аномальных гидрогеологических явлений приходится 64 случая повышения температуры воды и 78 случаев появления запаха, обычно

сероводорода. И сегодня гидрогеологические методы рассматриваются, как перспективные. Появление запаха в воздухе можно рассматривать, как признак выброса газа в атмосферу.

3) В связи с землетрясениями наблюдалось 20 случаев климатического похолодания и 50 случаев потепления. Наблюдения за погодой показали, что на 79 случаев резкого похолодания перед толчком приходилось 129 случаев потепления. Таким образом, потепление встречалось чаще похолодания.

4) Множественные случаи гроз, бурь, штормов, ветра, дождя, града и снега упоминаются в связи с землетрясениями.

5) Почти столь же часто, как бури, встречаются описания тихой, ясной погоды, а также особое безветрие и затишье. Такое затишье, как перед бурей, весьма характерно для описания землетрясений.

6) Очень часто встречаются упоминания о тумане, дыме, пыли, паре, сырости, повышенной влажности воздуха. Сюда же относятся описания особого мелкого дождика, который идёт не из облаков, а конденсируется непосредственно у поверхности. В целом, этот класс явлений указывает на внезапное повышение влажности в приземном слое атмосферы и высокую концентрацию аэрозоля в воздухе.

7) Регистрировать изменение давления при землетрясении стало возможным только с конца XVII века. Повышение давления в связи с землетрясениями было зарегистрировано в 36 случаях, а падение - в 81.

8) С древнейших времён поступали сообщения о необычном поведении животных, ощущениях людей, эпидемиях и эпизоотиях. Встречаются даже сведения о фенологических изменениях в связи с землетрясениями.

9) Существует множество свидетельств выброса газа и огня из земли во время землетрясений.

10) Часто отмечался звук до толчка, причём, речь шла не о звуке, вызванном приходом сейсмической р-волны. Звуки были слышны за десятки минут и часы до землетрясения.

11) Первое сообщение об электромагнитных процессах, связанных с землетрясением, поступило в 1720 г. С тех пор отмечалось множество фактов наблюдения электрических и магнитных явлений при землетрясениях. Следует отметить частые сообщения о необъяснимых явлениях потери магнитами их 'силы'. Также иногда отмечались случаи, когда батареи не давали тока во время землетрясения. Этот факт можно объяснить только повышенной проводимостью воздуха.

Геотермических наблюдений в связи с землетрясениями проводилось относительно мало. Практически все исследования, выполненные ранее, относились к измерениям температуры воды и обычно рассматривались, как часть геохимических и гидрогеологических методов исследования, хотя правильной было бы отнести их к геотермическим методам. В данном случае речь идет не о кондуктивном тепловом потоке, рассматриваемом классической геотермией, а о конвективном тепловом потоке, передаваемом с водой и газом. К геотермическим же методам следует отнести работы Тронина (2011), а также последующие исследования в Китае, Японии, Греции, Испании, Индии и других странах по изучению температуры земной поверхности в связи с землетрясениями. Из-за специфики тепловых потоков на земной поверхности и большого объема выполненных работ эти исследования были выделены в отдельную главу (см. ниже).

Последний обзор на данную тему - это небольшой "Каталог термических предвестников землетрясений" (1991). В нем рассматриваются современные термальные предвестники, полученные по данным наблюдений на территории бывшего СССР, Китая, Японии и других стран. В каталоге приведены главным образом результаты измерения температуры в скважинах, колодцах и источниках.

В Таблице 2 показаны примеры измерения температуры почвы перед землетрясениями. Эти измерения, как правило, случайны и были выполнены тогда, когда эпицентр землетрясения находился рядом с метеостанцией. В них речь идет об относительно небольшом росте температуры - до 1.5 °С.

Кроме увеличения температуры почвы перед землетрясениями во многих регионах мира отмечена связь сейсмичности и кондуктивного теплового потока. Сопоставляя карты сейсмической активности и теплового потока, Cermak указывал на такую связь для Чехословакии (1976) и всей Европы (1977). Аналогичные исследования были выполнены для Пиренеев (Albert-Beltrán, 1979) и Румынии (Demetrescu and Andrescu, 1994).

Таблица 2. Изменение температуры почвы в связи с землетрясениями

Дата землетрясения	Район	Магнитуда	Описание	Литература
26 апреля 1966	Ташкент, Узбекистан	5.6	Температура почвы на глубине 3 м выросла на 1 °С с 1956. Максимум температуры наблюдался за месяц перед толчком.	Милькис, 1986
14 мая 1970	Махачкала, Дагестан	5.7	Тепловой поток в неглубоких скважинах увеличился в 3.4 раза.	Дагестанское..., 1980
5 июня 1970	Самарканд, Узбекистан	6.8	Температура почвы на глубине 3 м выросла на 0.4-0.6 °С за 5 дней до толчка.	Омуралиев и Каракеев, 1993
4 февраля 1975	Хайчен, Китай	7.4	Температура почвы на глубине 40 и 80 см росла с 1972 г. по февраль 1975 г. Амплитуда аномалии составила 0.8 °С.	
17 мая 1976	Газли, Узбекистан	7.0	Температура почвы на глубине 1.6 м выросла на 1.5 °С за	Милькис, 1986

	н		10 месяцев до толчка.	
27 июля 1976	Таншан, Китай	7.8	Температура почвы на глубине 40 и 80 см росла с 1973 г. до апреля 1976 г. Амплитуда аномалии составила 0.9 - 1.2 °С.	
24 марта 1978	Киргизия	7.0	Температура почвы на глубине 3 м выросла на 0.4-0.6 °С за 9 дней до толчка.	Омуралиев и Каракеев, 1993
12 ноября 1990	Киргизия	6.1	Температура почвы на глубине 3 м выросла на 0.4-0.6 °С за 5 дней до толчка.	Омуралиев и Каракеев, 1993

Изучение геохимических и гидрогеологических явлений, связанных с землетрясениями, получило в последнее время широкое распространение в практике сейсмологических исследований. Гидрогеохимические и гидрогеологические исследования широко освещены в литературе (Рикитаке, 1979, Roesloffs, 1988). Можно упомянуть фундаментальные труды по этому направлению: Гидросейсмологические предвестники землетрясений (1983), Гидрогеодинамические предвестники землетрясений (1984), Гидрогеохимические предвестники землетрясений (1985), Предвестники землетрясений (Сидорин, 1992). Названия трудов точно отражают содержание исследований и охватывают весь спектр гидрогеологических исследований. Следует отметить труды Вартапяна и Куликова (1983) по гидрогеодеформационным (ГГД) полям, связанным с сейсмической активностью. Ими было показано, что в периоды подготовки землетрясения отдельные изометричные структуры поля в короткие промежутки времени (дни) увеличиваются в размерах, и, приобретая вытянутые формы, сливаются и

образуют протяженные (~1000 км) зоны. Скорости разрастания и вырождения деформационных структур достигают 400 000 км²/сутки.

Для проблемы литосферно - атмосферных связей наиболее важно рассмотрение лишь некоторых аспектов гидрогеологических исследований: 1) изменение уровня воды в скважинах и колодцах, а также дебита источников; 2) изменение температуры воды; 3) выделение газов. Все эти проблемы имеют отношение к потоку флюидов из земной коры в атмосферу. В данной главе мы остановимся на двух сторонах проблемы: гидрогеотермальных и газогеохимических явлениях при землетрясениях. Изменение уровня воды при землетрясениях известны с древнейших времён и хорошо изучены в настоящее время.

Некоторые гидрогеотермальные предвестники описаны в "Каталоге термических предвестников землетрясений" (1991). В Таблице 3 приведены некоторые из гидрогеологических термальных явлений, сопровождавших землетрясения на территории бывшего СССР и Монголии.

Таблица 3. Изменение температуры воды в связи с землетрясениями

<i>Дата землетрясения</i>	<i>Район</i>	<i>Магнитуда</i>	<i>Описание</i>	<i>Литература</i>
5 октября 1948	Ашхабад, Туркмения	7.3	Пульсирующие изменения температуры: долговременные - с амплитудой до 6 °С, краткосрочные - до 2-3 °С.	Милькис, 1986
27 июня 1957	Байкал	7.6	Температура горячих источников выросла на 5 °С.	Новый..., 1977
4 декабря 1957	Гоби, Монголия	8.1	Повысилась температура источников.	Осика, 1981

14 сентября 1958	Олекма, Сибирь	6.4	Температура источников возросла и выделялся сероводород.	Осика, 1981
18 июня 1959	Камчатка	7.6	Температура горячих источников возросла на 5 °С.	Осика, 1981
26 апреля 1966	Ташкент, Узбекистан	5.6	Температура воды в скважинах возросла и уровень воды изменился на 5 м.	Каталог..., 1991
14 мая 1970	Махачкала , Дагестан	5.4	Наблюдался региональный рост температуры на 1-4 °С на площади 60 000 кв. км.	Дагестанс кое..., 1980
5 июня 1970	Саракамы ш, Узбекистан	6.8	Температура выросла на 8-12 °С за два месяца до толчка.	Каталог..., 1991
23 декабря 1974	Махачкала , Дагестан	5.0	Температура горячих источников выросла на 3.5 °С, значительно выросло выделение газов.	Осика, 1981
30 ноября 1981	Исмаилы, Азербайджан	5.2	Температура воды в скважинах выросла на 5.5 °С.	Каталог..., 1991

Измерение температуры и дебита сегодня входит в состав любого комплекса скважинных измерений для изучения землетрясений. В настоящее время при описании практически любого заметного землетрясения можно обнаружить сведения о повышении температуры воды в источниках, колодцах и скважинах.

Началом современного этапа газогеохимических исследований следует считать работы Б.Б. Голицына. Уже в 1911, в программе практических работ

для сейсмологов по прогнозированию землетрясений он указывал: "Возможно, что со временем обнаружатся... явления, имеющие связь с возникновением землетрясения, как, например, изменение количества того или иного газа, выделяемого в различных местностях из недр Земли..." (Голицын, 1960). Позднее газогеохимические исследования выделились в отдельную ветвь исследований из гидрогеологических работ. Начало этим работам положило открытие изменения концентрации радона при Ташкентском землетрясении 1966 г. (Ташкентское..., 1971). После этого геохимические и газогеохимические исследования получили широкое распространение. Особенно много работ в этой области появилось после Дагестанского землетрясения 1970 г. (Осика, 1981). В Узбекистане под руководством Г.А. Мавлянова (1973) и А.Н. Султанходжаева (1977, 1987) проводились многочисленные геохимические исследования. Проводились измерения содержания изотопов и их соотношения в связи с сейсмическими процессами. Ф.И. Монахов и Л.И. Божкова (1985) провели измерения дебита газа в устье самоизливающейся скважины на о-ве Кунашир. Ими была показана высокая перспективность газогеохимических предвестников в прогнозе землетрясений. Характерное время появления предвестника - от 1 до 7 дней.

Следует отметить ведущую роль Г.И. Войтова (1975) в развитии геохимических и, особенно, газогеохимических исследований. Им были приведены оценки "газового дыхания Земли" для различных геологических структур и подчеркнута роль землетрясений в дегазации Земли. Последние его работы связаны с измерением концентрации водорода в геодинамически активных зонах (Войтов и др., 1995). Здесь же отметим лабораторные исследования (Borucki, 1999, Freund, 1999; 2002), которые показывают возможность выделения молекулярного водорода путём редукции гидроксильных групп в минеральном скелете горных пород.

В ГЕОХИ АН СССР были выполнены интересные работы под руководством академика Барсукова (1979) по анализу содержания гелия в скважинах перед землетрясениями в Средней Азии и созданию модели образования геохимических предвестников землетрясений (Барсуков и др., 1987). Большое ко-

личество исследований в этом направлении выполнено в Китае и Японии (Рикитакэ, 1979, Методы..., 1984).

Следует отметить, что наблюдения проводились как в скважинах, так и в атмосфере. Так, после Дагестанского землетрясения 1970 г. в эпицентральной зоне были отмечены выходы газов (Таблица 4), содержащие гелий и водород (Осика, 1981), а содержание CO_2

Таблица 4. Химический состав газов (%), выходящих из трещин в эпицентральной зоне Дагестанского землетрясения 14 Мая 1970 (Осика, 1981).

<i>Участок</i>	<i>H₂</i>	<i>He</i>	<i>O₂</i>	<i>N₂</i>	<i>CO₂</i>	<i>CH₄</i>
Трещина 1	0.038	До 0.001	20.82	78.90	До 0.1	0.00013
Трещина 2	0.014	До 0.001	20.31	79.58	До 0.1	0.00014
Фоновые концентраци и	0.00005	0.000524	20.6	78	0.035	0.00015

в приземной атмосфере эпицентра превышало в 1-3 раза их кларковые содержания в атмосфере (Кравцов и Фридман, 1974). За 10-12 часов до Анапского землетрясения 12 июля 1966 (M=4.5) концентрация CO_2 над рудной жилой ртутного месторождения на северо-западном Кавказе возросла до 12% при фоне 2% (Кравцов и Фридман, 1974). В период Шемахинского землетрясения 1975 г. (M=4) концентрация CO_2 в подпочвенном воздухе возросла с 1 до 6 % (Дадашев т др., 1980).

В 70-80-х годах МИФИ проводились измерения концентраций метана над разломами с помощью лазерного газового анализатора (Колобашкин и Попов, 1981, Бирюлин и др., 1984). На Ашхабадском полигоне наиболее интенсивные подвижки совпали по времени с увеличением концентрации метана в атмосфере. В Бакуриани за несколько часов до локальных землетрясений концентрация

метана возрастала на 20-40 % над фоном (Колобашкин и Попов, 1981), а более сильное Боржомское землетрясение 24.01.82 ($M=4.2$) предварялось за несколько дней до толчка интенсивной аномалией в два раза выше фона (Бирюлин и др., 1984.). Современные методы позволяют восстановить объёмную структуру газового облака над разломом (Cucoli et al., 2000).

Hedervari и Noszticzius (1985) высказали оригинальную гипотезу, объясняющую появление различных оптических эффектов при землетрясениях, выбросом газа фосфина (PH_3) на земную поверхность. Фосфин реагирует с кислородом, и, в зависимости от условий, может сгорать или взрываться, образуя огненные шары или медленно гореть, порождая разнообразные оптические явления. Фосфин - это высокотоксичный газ с запахом чеснока или гнилой рыбы, вызывающий чувство слабости, боли в грудной клетке, ощущение холода, боли в желудке и диарею. Эти симптомы часто встречаются при землетрясениях.

Проводившиеся в Мексике эксперименты показали увеличение концентрации S, Br, Cu, Pb в атмосфере в связи с землетрясениями. Наблюдалось увеличение концентрации сернистого газа ночью за сутки и непосредственно перед землетрясением. Максимум концентраций SO_2 наблюдался с 2 до 5 часов местного времени, тогда как в другие дни максимум был вечером. Перед землетрясением с 6 до 9 часов местного времени было отмечено уменьшение концентраций озона в 2 раза. Для окислов азота аномалий не наблюдалось (Ивлев, 2000).

Комплексные исследования, связывающие эманацию радона, выделение металлосодержащего аэрозоля с параметрами ионосферы, были проведены в 80-х годах в СССР (Pulinets et al., 1997, Liperovsky et al., 2005). Эмиссия радона и аэрозоля рассматривается, как основной механизм образования аномалий ионосферы при землетрясениях в рамках модели лито-атмо-ионосферного взаимодействия (Pulinets, Ouzounov, 2011).

Тертышников (1994, 1995) показал связь возмущений концентрации озона с сейсмическими событиями по данным наземных озонметрических наблюдений.

В данном разделе уместно упомянуть о теориях дегазации земли. Масштабы дегазации были пересмотрены в сторону значительного увеличения благодаря работам Войтова (1975), Осики (1981) и Сывороткина (1993, 1994). Скорость дегазации сейсмически активных регионов колеблется от $120 \text{ см}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$ до $0.26 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$ (Бирюлин и др., 1984). В работе Осики (1981) объем так называемой "холодной" или невулканической дегазации приравнивается по объёму к вулканической дегазации. При этом подчёркивается роль тектонических землетрясений, когда интенсивность дегазации возрастает многократно. Теории неорганического происхождения нефти также предусматривают значительный поток газов (Особенности..., 1982). В работах Сывороткина (1993, 1994) высказывается мнение, что содержание озона в атмосфере зависит от поступления газов из литосферы Земли, при этом метан ответственен за фоновое состояние и баланс озона, а водородные струи определяют локальные понижения концентрации озона - озонные дыры.

Кратко резюмируя многочисленные геохимические и гидрогеологические исследования, можно сделать следующие выводы:

- 1) В период подготовки землетрясения изменяется дебит и температура подземных, а иногда и поверхностных вод.
- 2) В период подготовки землетрясения изменяется поток газов из литосферы в атмосферу.
- 3) Эти проявления носят мозаичный характер, например, в одни местах наблюдается уменьшение дебита, а в других - его увеличение.
- 4) Можно говорить об интегральном повышении температуры и дебита вод, усилении дегазации в период подготовки землетрясений, даже учитывая мозаичный характер проявлений.
- 5) Время появления предвестников различно, но наиболее ярко они проявляются за несколько дней до толчка.
- 6) Расстояние до места регистрации предвестников также различно, иногда оно достигает сотен километров от эпицентра. Часто это расстояние значитель-

но превышает радиус деформационных изменений вокруг эпицентра готовящегося землетрясения.

7) При землетрясениях часто наблюдаются проявления различных гидрогеологических, геотермических и геохимических процессов на земной поверхности: изменение уровня, дебита и температуры поверхностных вод, изменение газового состава приземного слоя атмосферы.

Ряд современных исследований метеорологических явлений, связанных с землетрясениями, довольно ограничен. Систематические изыскания в этой области были выполнены М.Р. Милькисом (1983, 1986). Он проанализировал метеорологическую обстановку при нескольких сильнейших землетрясениях Средней Азии. В результате исследований было установлено, что подготовка сильных землетрясений сопровождается метеорологическими аномалиями, которые наблюдаются над очагами готовящихся землетрясений в период от 1 месяца до 1 года для долгосрочных предвестников, и часы - первые сутки для краткосрочных. Вблизи очагов готовящихся сильных землетрясений установлены максимальные значения солнечной радиации, количества часов 'солнечного сияния', количества ясных дней, температуры воздуха, скорости ветра и минимальные величины облачности, чисел пасмурных дней, дней с туманом, осадков, влажности воздуха. По мнению Милькиса формирование аномалий обусловлено тепловыми и электрическими явлениями, сопровождающими подготовку землетрясений. Тектонические процессы приводят к повышенному выделению тепла из недр в атмосферу вдоль зон сейсмогенных разломов.

Дусмухамедов (1985) проанализировал состояние приземной атмосферы в предверии Назарбекского землетрясения 12 декабря 1980 г. Имело место локальное понижение температуры перед толчком, а сразу после толчка - рост на 10 °С. Атмосферное давление падало перед основным толчком и перед сильными форшоками. Этот же автор (Дусмухамедов, 1988) высказал идею о соответствии зон максимального турбулентного теплообмена на поверхности суши наиболее сейсмоактивным регионам.

Важнейшие исследования по изучению связи температуры и давления воздуха при землетрясениях были проведены в Таджикистане под руководством Садовского (1986). Установлено наличие сбоя равновесного состояния функций температуры и давления в атмосфере и замкнутых объёмах перед землетрясениями. Такой сбой объясняется импульсной ионизацией атмосферы, что ведёт к падению давления. К сожалению, эти работы не получили дальнейшего развития.

В работе Сидорина (1992) дан обзор метеорологических предвестников землетрясений - изменений атмосферного давления, температуры почвы и воздуха, влажности воздуха, атмосферных осадков и облачности. Рассмотрены метеорологические предвестники Джиргитальского землетрясения 26 октября 1984 г.

Многочисленные случаи появления и размыва облачности над очагами землетрясений и сейсмогенными разломами рассмотрены в работах Шульца (1984), Морозовой (1996, 1997) и Shou (1999). Отмечены кольцевые облачные структуры в период подготовки Газлийских землетрясений 1976 и 1984 г.г. Линейные облака отмечены для других сильных землетрясений в Средней Азии. Они наблюдались на расстоянии от десятков до тысяч километров от эпицентра, от нескольких часов до нескольких суток до толчка.

В самое последнее время проведены исследования по анализу содержания аэрозоля в приземной атмосфере. Отмечено снижение электропроводности атмосферы и увеличение концентрации аэрозоля (по его рассеянию) в зоне разлома перед землетрясениями по данным полевого эксперимента в октябре 1999 г. на Кубани (Алексеев и др., 2000). В 1994-95 гг. в западной Мексике вблизи вулкана Колима за 2-3 часа до землетрясения отмечено увеличение концентрации частиц размером 0.5-0.6 мкм и 2-4 мкм. Наблюдалось увеличение концентрации сернистого газа ночью за сутки и непосредственно перед землетрясением.

В книге Кисина (1982) сообщается о связи осадков и уровня воды в реках с сейсмичностью. Согласно наблюдениям в Северо-Восточной Индии силь-

ные предмуссонные дожди предшествовали землетрясениям с магнитудой 7 и более. Американский сейсмолог Мак-Гиннис (Киссин, 1982, в книге Киссина источник не указан) обнаружил четкую зависимость между суммарным количеством сейсмической энергии, выделяемой при землетрясениях в долине среднего течения реки Миссисипи, и уровнем реки: повышение сейсмичности приурочено к паводкам. В Южной Калифорнии за последние 90 лет произошло 12 сильных землетрясений ($M \geq 6$), из них 9 - после необычайно сильных осадков, которым предшествовал четырех-, пятилетний период засухи. Землетрясения следовали после максимума осадков с запозданием от двух месяцев до двух лет. В трех случаях перед сильными землетрясениями были аналогичные, но слабее выраженные аномалии осадков. Корреляция сейсмической активности с атмосферными осадками наблюдались также в Японии на острове Хонсю и в других странах. Отмечалась прямая и обратная связь уровня воды в реках и сейсмичности на Сахалине, Карпатах, Крыму, Таджикистане. Гидрогеолог А.О. Гриневский совместно с И.Г.Киссиным (Киссин, 1982) сопоставил количество месячных атмосферных осадков (в процентах от нормы) с землетрясениями с $M \geq 4$ для Средней Азии и Кавказа. За период с 1926 по 1970 г. на территории Ферганской долины 13 землетрясений было приурочено к максимумам, 9 - к минимумам атмосферных осадков. Не были выявлены четкие зависимости между землетрясениями и атмосферными осадками и для Джавахетского нагорья (Кавказ), где такое сопоставление проводилось с 1960 по 1970 г.

Подводя итоги обзора современных метеорологических исследований, можно сделать следующие выводы о том, что в период подготовки землетрясений:

- 1) увеличивается температура воздуха;
- 2) падает давление;
- 3) наблюдаются облака необычной формы.

В Таблице 5 приведены некоторые случаи повышения температуры воздуха перед землетрясениями.

Таблица 5. Изменение температуры воздуха в связи с землетрясениями

<i>Дата землетрясения</i>	<i>Район</i>	<i>Магнитуда</i>	<i>Описание</i>	<i>Литература</i>
4 ноября 1946	Казанджик, Туркмения	7.0	В момент толчка температура подскочила с 0.0 до 4.4 °С.	Милькис, 1986
5 октября 1948	Ашхабад, Туркмения	7.3	Среднемесячная температура января 1948 была на 3.5 °С выше обычной.	Милькис, 1983
4 декабря 1957	Гоби, Монголия	8.1	Отмечена необычно высокая температура воздуха.	Осика, 1981
26 апреля 1966	Ташкент, Узбекистан	5.6	Среднемесячная температура зимних месяцев была на 4.8 °С выше среднего.	Милькис, 1986
15 февраля 1968	Ашхабад, Туркмения	5.6	За 1-2 дня до толчка наблюдалось необычно высокая температура воздуха.	Милькис, 1983
22 февраля 1984	Туркмения	6.0	За 1-2 дня до толчка наблюдалось необычно высокая температура воздуха.	Милькис, 1986

С древнейших времён до наших дней было отмечено множество случаев необычного поведения животных и людей перед землетрясениями. Современные данные о биологических предвестниках отражены в работах Рикитаке (1979), Никонова (1981), Tributsch (1982), Биологические... (1991), Сидорина (1992), Ikeya (2004).

Кроме необычного поведения животных, отмечалось также изменение со-

стояния растительности. Так, за несколько недель до землетрясения в Штутгарте изменился цвет листьев у цветов, кустарников и деревьев. После землетрясения цвет листьев восстановился. Была высказана гипотеза об увеличении концентрации газов в почве. Предложено использовать дистанционные методы для анализа цвета растительности (Литинецкий, 1988). Есть и другие сведения о нарушении фаз вегетации, необычном цветении, урожайности сельскохозяйственных культур.

В качестве объяснения необычного поведения животных приводятся несколько гипотез: 1) статическое электричество, 2) электромагнитное излучение, 3) акустические и сейсмические колебания, 4) газовый состав атмосферы. Большинство исследователей склоняется к гипотезе о статическом электричестве.

3. Результаты наблюдения квазистатического электрического поля в системе атмосфера - ионосфера

Впервые квазистатические электрические поля амплитудой порядка 10 мВ/м, связанные с подготовкой землетрясения, были обнаружены в работе (Chmyrev et al., 1989). В этой работе проведен анализ записей вертикальной компоненты электрического поля E_z , полученных на спутнике "Интеркосмос - Болгария 1300" (ИКБ-1300), высота траектории которого составляла (800-900) км. Возмущения наблюдались за 15 минут до землетрясения, которое произошло 12.01.1982 в 17.50.26UT. Так как спутник двигался с севера на юг, то рост электрического поля до величины порядка (7 – 8) мВ/м отмечен вначале в сопряженной области, а затем в зоне над эпицентром. Горизонтальный размер возмущенных зон составлял примерно 1.5° по широте. В северном полушарии зона всплеска электрического поля смещена к югу, а в южном полушарии к северу относительно областей пересечения возмущенной магнитной трубки с нижней ионосферой. В южном полушарии эта область совпадает с проекцией эпицентра землетрясения на нижнюю ионосферу. Положение зон всплеска

электрического поля совпадает с областями пересечения спутником возмущенной магнитной трубки на высоте его траектории.

Подробные исследования квазистатических полей на основе прямых спутниковых измерений над сейсмическими районами земного шара позднее были выполнены в работах (Gousheva et al., 2006; Gousheva et al., 2008a; Gousheva et al., 2008b; Gousheva et al., 2009). Анализировались сотни сейсмических событий с целью выделения связанного с ними аномального усиления электрического поля в ионосфере. В этих работах рассмотрены сейсмические источники различной мощности, в различных тектонических структурах на различных широтах. Отбирались орбиты с расстоянием меньше 25° до эпицентра, не пересекающие терминатор, а также периоды с индексом геомагнитной активности меньше $K_p=5$. Приведем несколько примеров полученных результатов. Электрическое поле величиной (5 – 10) мВ/м было обнаружено в сопряженных областях за 11 – 13 часов до двух землетрясений, которые произошли 25.08.1981 в моменты времени 16:54:39UT и 17:29:07UT соответственно (Gousheva et al., 2008b). Землетрясения мощностью $M = 5.2$ и 5.1 произошли на глубине 33 км. Индекс геомагнитной активности составлял $K_p = 3$. Расстояние от эпицентра землетрясений составляло 1640 км и 1790 км. В другом примере электрическое поле величиной 26 мВ/м было обнаружено за 33 часа до землетрясения, которое произошло 23.08.1981 в 23:45:28UT. Магнитуда землетрясения составила $M = 5.0$, его глубина 10 км. Индекс геомагнитной активности равнялся $K_p=3$. Расстояние до эпицентра землетрясения составляло 1467 км. В третьем примере электрическое поле величиной 6 мВ/м было обнаружено за 85 часов до землетрясения, которое произошло 29.08.1981 в момент времени 07:41:51UT (Gousheva et al., 2009). Магнитуда землетрясения составила $M = 4.9$, его глубина 57 км. Индекс геомагнитной активности равнялся $K_p=3$. Расстояние до эпицентра землетрясения было 1386 км. Статистический анализ спутниковых данных, проведенный в работах (Gousheva et al., 2008b; Gousheva et al., 2009), позволил авторам сделать вывод о существовании в ионосфере возмущений

квазистатического электрического поля сейсмической природы. Длительность возмущения электрического поля в ионосфере с амплитудой порядка 10 мВ/м может составлять до 15 дней. Величина возмущения электрического поля для случаев наблюдения в ночные и дневные часы в ионосфере была одного порядка.

Возмущения электрического поля в ионосфере над районами развития тайфунов обнаружены в работах (Isaev et al., 2002; Sorokin et al., 2005a) с использованием данных спутника «Космос – 1809». Характеристики полей подобны тем, которые наблюдаются над сейсмическими зонами. Например, во время трех пролетов над зоной тайфуна HARRY 10 и 13 февраля 1989 года (Sorokin et al., 2005a), получены следующие результаты. Когда спутник пролетал на минимальном расстоянии $\sim 1.5^{\circ}$ к востоку от центра тайфуна, над его зоной наблюдались возмущения электрического поля величиной 15 – 20 мВ/м. Аналогичные результаты получены в той же области и через три дня. При этом на большом расстоянии от центра тайфуна ~ 12000 км возмущения отсутствуют. Подобные результаты получены для нескольких десятков тайфунов. Таким образом, спутниковые данные позволяют заключить, что крупномасштабные сейсмические и метеорологические события сопровождаются формированием возмущений квазистатического электрического поля в ионосфере амплитудой порядка 10 мВ/м и длительностью от десятков часов до десятков дней.

С данными прямых наблюдений квазистатического электрического поля в ионосфере согласуются результаты численного моделирования ионосферного возмущения, возникающего накануне землетрясения. В рамках модельных расчетов анализируется пространственное распределение полного электронного содержания (ПЭС), полученного с помощью GPS приемников. Используется глобальная модель верхней атмосферы, которая описывает термосферу, ионосферу и плазмосферу в виде единой системы. Модель основана на интегрировании нестационарных трехмерных уравнений непрерывности, импульса и баланса энергии многокомпонентного газа совместно с уравнениями потенциала электрического поля. К фоновому электрическому полю добавляется такое мо-

дельное возмущение электрического поля, которое приводит к возмущению ПЭС, совпадающему с наблюдаемым возмущением в районе подготовки землетрясения. Землетрясение в Перу 26.09.2005 анализировалось в работе (Zolotov et al., 2008). Основные характеристики возмущения ПЭС приведены в работе (Zakharenkova et al., 2008). Это возмущение существовало в течение шести дней до землетрясения с 21 по 26 сентября 2005 года. В результате численного эксперимента по подбору возмущающих электрических полей различной конфигурации и амплитуды в работе (Zolotov et al., 2008) было показано, что наблюдаемое возмущение ионосферы возможно при дополнительном электрическом поле амплитудой 6 мВ/м. В работах (Klimenko et al., 2008; 2012; Namgaladze et al., 2009) предполагается, что возможной главной причиной возмущения ПЭС является вертикальный дрейф плазмы под действием зонального электрического поля. Численное моделирование, проведенное в работе (Klimenko et al., 2012), показало, что амплитуда возмущения электрического поля должна составлять (3 – 9) мВ/м.

Наблюдения за поведением электрического поля на поверхности Земли в сейсмических районах были выполнены в работах (Jianguo, 1989; Nikiforova and Michnovski, 1995; Vershinin et al., 1999; Hao et al., 2000; Rulenko, 2000). Анализ результатов показал, что во время подготовки землетрясения возникают короткие, длительностью от единиц до десятков минут, локальные всплески электрического поля большой амплитуды, достигающей нескольких кВ/м. Однако, отсутствуют явные возмущения электрического поля, превышающие фоновые значения, длительностью в несколько дней и наблюдаемые одновременно на горизонтальных расстояниях в десятки и сотни километров.

Косвенным подтверждением возникновения электрического поля в атмосфере служат результаты наблюдения распространения УКВ радиоизлучения от источников, расположенных в тропосфере над районом подготовки землетрясений (Vallianatos and Nomicos, 1998; Ruzhin et al., 2000; Ruzhin and Nomicos, 2007). Исследования проводились на о. Крит в течение трех лет. Приемники с

двумя узкополосными фильтрами на 41 и 53 МГц располагались на четырех станциях наблюдения. Эпицентры землетрясений располагались за горизонтом. Длительные наблюдения показали, что источники импульсного УКВ радиоизлучения находились на высотах от 1 до 10 километров. В качестве источников рассматриваются электрические разряды, которые возникают в результате формирования пробойного электрического поля на этих высотах в течение нескольких дней до землетрясения (Sorokin et al., 2011a,b).

Таким образом, прямые и косвенные данные наблюдения квазистатического электрического поля в ионосфере и на земной поверхности в зоне землетрясений позволяют сформулировать его основные свойства:

1. Сейсмическая активность приводит к росту квазистатического электрического поля в ионосфере величиной порядка 10мВ/м.
2. Поле локализовано в ионосфере над районом эпицентра и сопряженной областью с характерным горизонтальным масштабом (100 – 1000) км.
3. Продолжительность усиления поля в ионосфере перед землетрясением достигает (10 – 15) дней.
4. Квазистатические электрические поля с аналогичными характеристиками наблюдаются над районами тайфунов.
5. Величина вертикальной компоненты электрического поля с теми же пространственными и временными масштабами на поверхности Земли в сейсмическом районе не превышает фоновых значений порядка 100 В/м.
6. Величины поля в дневной и ночной ионосфере - одного порядка.

Следует подчеркнуть принципиальную особенность электрических полей, наблюдаемых в зоне землетрясений: их величина достигает 10 мВ/м в ионосфере и пробойных значений – в тропосфере, однако, не выходит за пределы фоновых значений на земной поверхности. Таким образом, любая модель формирования квазистатического электрического поля, связанного с сейсмической активностью, должна удовлетворять этой особенности и соответствовать другим перечисленным выше свойствам.

4. Модели проникновения квазистатического электрического поля в ионосферу

Литосферная активность стимулирует процессы, которые сопровождаются генерацией электрического поля. Увеличение концентрации заряженных аэрозолей на один – два порядка величины, увеличение уровня атмосферной радиоактивности благодаря инъекции в атмосферу радона и других радиоактивных веществ наблюдается в течение дней и недель до землетрясения (Alekseev and Alekseeva, 1992; Virk and Singh, 1994; Heinke et al., 1994; Voitov and Dobrovolsky, 1994; Pulinets et al., 1997; Yasuoka et al., 2006; Omori et al., 2007). В работе (King, 1986) приведены данные об инъекции в атмосферу почвенных газов, таких, как радон, гелий, водород, углекислый газ, имеющей место в эпицентральной зоне с радиусом ~500 километров в течение времени от нескольких часов до нескольких недель до землетрясения. Пятикратный скачок концентрации радона в грунтовой воде за неделю до землетрясения отмечен в работе (Igarashi et al., 1995). Данные о значительных выбросах аэрозолей металлов и радона приведены в работе (Boyarchuk, 1997). Возмущение квазистатического электрического поля в ионосфере наблюдается в тоже время, что и выбросы активных веществ в нижнюю атмосферу. Наряду с крупномасштабным увеличением концентрации активных веществ в нижней атмосфере накануне землетрясения возникают их локальные кратковременные выбросы. Они могут генерировать импульсные электрические поля у поверхности Земли. Характерная длительность возмущения электрического поля, амплитуда которого может достигать 10 кВ/м, на поверхности Земли не превышает десятков минут. В работах (Liperovsky et al., 2005; 2008) рассмотрена модель генерации импульсов локального электрического поля в приповерхностном слое атмосферы длительностью от единиц до десятков минут. Предполагается, что в ночное время, температура приземной атмосферы понижается, а ее относительная влажность

возрастает. Возможна конденсация воды на аэрозольных частицах. Относительно большие частицы заряжаются отрицательным зарядом, а малые частицы приобретают, в основном, положительный заряд. Полагается, что аэрозольные облака малых размеров внезапно инжектируются в атмосферу, происходит нагрев приземного слоя атмосферы и возникает ее вертикальная конвекция. Одновременная инжекция радона приводит к росту ионизации атмосферы. Отрицательно заряженные более тяжелые частицы оседают быстрее, чем положительно заряженные частицы. Разделение зарядов приводит к появлению поляризованного электрического поля амплитудой $10^3 \div 3 \times 10^3$ В/м. Время его релаксации в результате эволюции облака аэрозолей составляет величину порядка 10 минут.

В работе (Omori et al., 2007) приведены результаты наблюдения аномальной эманации радона, предшествующей крупным землетрясениям. Приведены оценки величины возникающего источника ионизации и проводимости атмосферы. Показано, что эманация радона уменьшает атмосферное электрическое поле на 40%. Авторы воспользовались моделью генерации импульсного электрического поля, рассмотренной в работе (Liperovsky et al., 2005) для оценки амплитуды поля. Для наблюдаемых величин эманации радона они получили значение амплитуды ($10^4 \div 10^5$ В/м). В приведенных выше работах отсутствуют расчеты электрического поля в ионосфере. Однако, предполагается, что подобное поле может служить источником литосферно – ионосферных связей. Следует заметить, что согласно рассматриваемой модели, импульсное поле возникает внутри двойного заряженного слоя, а вне слоя оно резко убывает. Кроме того, поле носит локальный характер. Его длительность порядка десятков минут, в то время как ионосферные предвестники существуют в течение нескольких дней и такое же время наблюдается вызывающее их поле. Следовательно, локальные импульсы электрического поля, наблюдаемые на поверхности Земли, не могут служить причиной ионосферных эффектов, а инжекция радона в данной модели не оказывает влияния на литосферно – ионосферные связи.

В работах (Freund et al., 2006; 2009; Freund, 2010) предложен механизм генерации электрического поля в литосфере, основанный на лабораторных экспериментах по разделению зарядов в каменных образцах под давлением. При этом на поверхности раздела камень – воздух возникает положительный электрический потенциал, происходит ионизация молекул воздуха и коронный разряд. Предполагается, что ионизация воздуха перед землетрясением может служить причиной ионосферных возмущений, свечений и инфракрасных эмиссий. Никаких расчетов, доказывающих воздействие этого источника на ионосферу, не приводится. Как следует из этих работ, длительность действия источника составляет порядка 10 минут. Поэтому он может применяться для интерпретации импульсных воздействий, но не для объяснения длительного существования возмущения квазистатического электрического поля в ионосфере.

Рассмотрим механизмы генерации квазистатического электрического поля в ионосфере, которое имеет горизонтальный масштаб (100 – 1000) км и длительность от десятков часов до десятков дней. Квазистатическим электрическое поле становится в том случае, когда характерное время его изменения значительно превышает время релаксации заряда в приземной атмосфере $\tau \sim \varepsilon_0 / \sigma \sim 10 \div 30$ мин (где ε_0 - электрическая постоянная, σ - проводимость атмосферы). В этом случае атмосферу полагают проводником, проводимость которого возрастает с высотой. Наличие электрического поля в атмосфере свидетельствует о протекании в ней электрического тока проводимости. Для наглядности механизма возникновения атмосферного электрического поля часто используется эквивалентная схема (Goldberg, 1984; Sapkota and Varshneya, 1990; Rycroft et al., 2000), которая приведена на Рис.1. Ток, текущий в цепи, определяется главным образом током генератора, представляющего собой

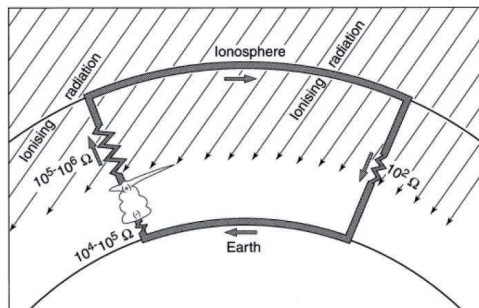


Рис.1. Схема глобальной электрической цепи (Markson, 1978).

суммарное действие гроз на земном шаре. Плотность тока хорошей погоды в замкнутой цепи составляет величину порядка 10^{-12} A/m^2 . Полагая проводимость атмосферы вблизи Земли порядка 10^{-14} См/м , получаем порядок величины электрического поля 10^2 В/м . В ионосфере с проводимостью 10^{-6} См/м току хорошей погоды соответствует электрическое поле величиной 10^{-3} мВ/м . Так как фоновое поле магнитосферной и ионосферной природы в среднеширотной ионосфере составляет величину $(0.1 - 1) \text{ мВ/м}$, то поле атмосферной природы в ней не наблюдается. Изменение квазистатического электрического поля в ионосфере над сейсмическим регионом можно получить двумя способами. Во-первых, можно изменить сопротивление нагрузки и, во вторых, можно включить в цепь дополнительную ЭДС.

Рассмотрим первый способ. Около 80% сопротивления нагрузки цепи сосредоточено в нижней атмосфере, на которую оказывают влияние процессы подготовки землетрясения. Это сопротивление меняется в результате инъекции в атмосферу радиоактивных и химически активных веществ и аэрозолей, изменения размеров аэрозолей и состояния атмосферы. В конечном счете, все эти процессы меняют проводимость приземных слоев атмосферы. На Рис.2 приведена схема цепи Рис.1, на которой выделен участок тока над возмущенным районом.

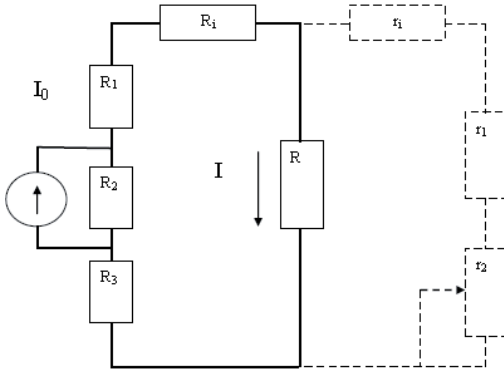


Рис.2. Эквивалентная схема формирования электрического поля в ионосфере над районом возмущения проводимости нижней атмосферы. Сплошной линией обозначена глобальная цепь, прерывистой линией обозначен участок цепи над районом возмущения проводимости.

Сопротивления $R_{1,2,3}$ соответствуют верхней атмосфере над грозами, области грозовой активности и приземным слоям атмосферы. Сопротивление нагрузки R много меньше этих сопротивлений. Сопротивление ионосферы обозначено R_i . Сопротивления r_1, r_2 соответствуют области выше тропосферы и участка ионосферы над возмущенным районом. При изменении проводимости нижней атмосферы меняется ее сопротивление r_2 и ток в участке цепи. В работах (Сорокин и Яценко, 1999; 2000; Sorokin and Yaschenko, 2000; Сорокин и др. 2001a) приведены расчеты изменения высотного распределения электрического поля в слое Земля – ионосфера в результате роста проводимости нижней атмосферы под действием источника ионизации. Проведен расчет высотного распределения скорости ионизации и атмосферной проводимости для различных уровней радиоактивности. Ионизация возникает под действием альфа частиц и гамма квантов распада. Показано, что с ростом проводимости вблизи поверхности Земли поле на ионосферных высотах может меняться в 1.5 – 2 раза. Так как невозмущенное поле величиной 10^{-3} мВ/м значительно меньше фонового значения в ионосфере, то его изменение в два раза не будет оказывать на нее влияния. Эти результаты подтверждаются в работе (Omori et al., 2008). В ней показано,

что в результате увеличения проводимости нижней атмосферы при усилении атмосферной радиоактивности во время инъекции радона квазистатическое электрическое поле вблизи Земли убывает в полтора раза. Расчет поля в ионосфере в этой работе не проводился. В ряде публикаций сделаны попытки объяснить появление квазистатического электрического поля в ионосфере и его возмущения изменением проводимости нижней атмосферы над сейсмическим регионом. В работе (Pulinets, 2009) предполагается, что аномальное электрическое поле в ионосфере в окрестности активного разлома возникает в результате изменения проводимости приземного слоя атмосферы. Проводимость меняется под действием дополнительной ионизации инжектируемым радоном и снижения подвижности ионов за счет образования больших кластеров. В работе не приводятся ни доказательства данного предположения, ни расчета величины поля в ионосфере. Согласно (Omori et al., 2007; 2008) выброс радона величиной 10 Бк/м^3 увеличивает скорость ионизации на величину $(10^6 - 10^7) \text{ 1/м}^3\text{с}$. При этом проводимость атмосферы у поверхности Земли увеличивается в 1.5 раза, а поле в ионосфере изменится так же примерно в 1.5 раза. Так как его невозмущенное значение в ионосфере составляет 10^{-3} мВ/м , то изменение в полтора раза намного меньше фонового его значения и, следовательно, никак не может оказывать влияния на состояние ионосферы. Оценка изменения тока, протекающего из ионосферы к Земле, в результате возмущения проводимости приземной атмосферы радоном приведена в работе (Harrison et al. 2010). Показано, что увеличение в два раза скорости ионизации воздуха радоном величина тока изменяется на 10%. Следовательно, на такую же величину изменится значение электрического поля в ионосфере. Приведенные в данных работах результаты позволяют заключить, что любые модели формирования в ионосфере квазистатического электрического поля, основанные на изменении проводимости атмосферы, в том числе радоном, противоречат экспериментальным данным и не могут служить основой механизма литосферно – ионосферного взаимодействия. Инъекция радона не может привести к усилению электрического поля в ионосфере до 10 мВ/м на горизонтальном масштабе (100 – 1000) километров и

при этом объяснить отсутствие его заметного возмущения на поверхности Земли.

Рассмотрим второй способ формирования квазистатического возмущения электрического поля в ионосфере. При включении в глобальную цепь внешнего источника ЭДС, связанного с подготовкой землетрясения, изменяется вертикальный ток в атмосфере и электрическое поле в ионосфере сейсмического района. ЭДС может располагаться в литосфере, в атмосфере и в окрестности границы между литосферой и атмосферой. На Рис.3 приведена схема высотной зависимости полного электрического тока $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} + \mathbf{j}_e$ в этих трех случаях. Начало координат расположено на поверхности Земли.

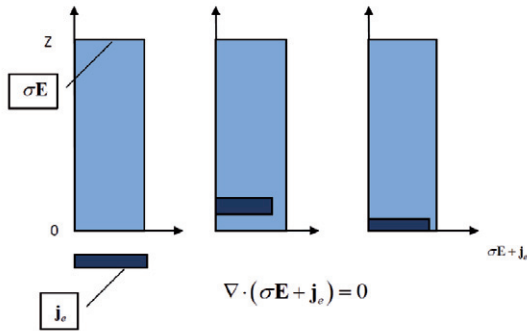


Рис.3. Зависимость полного электрического тока в атмосфере от высоты. Светлая фигура – ток проводимости, темные квадраты – сторонний ток ЭДС.

Рассмотрим случай расположения ЭДС в литосфере, соответствующий левому блоку на Рис.3. В рамках этой модели полагается, что поле передается через атмосферу. Атмосфера в слое между Землей и ионосферой полагается в виде проводника, проводимость которого зависит от высоты. Этот слой является участком замкнутой глобальной атмосферно – ионосферной электрической цепи, как показано на Рис.4. В этом случае в слое Земля – ионосфера выполняется однородный закон Ома для участка цепи без ЭДС. В работах, использующих эту модель, не рассматривается природа источника тока в литосфере или его характеристики. Этот источник должен создавать квазистатический элек-

трический ток в участке цепи в течение нескольких дней. Поле ищется в ионосфере при заданном пространственном распределении амплитуды его вертикальной компоненты на поверхности Земли (Kim and Hegai, 1999; Grimalsky et al., 2003; Denisenko et al., 2008; Rapoport et al., 2004; Pulinets et al., 2000, 2003; Ampferer et al., 2010). Расчеты поля в ионосфере производятся для различных интерполяций высотной зависимости компонент тензора ее проводимости, различных граничных условий и различной формы и размеров горизонтального распределения поля на поверхности Земли. В работе (Kim and Hegai, 1999) показано, что в ночной ионосфере поле достигает значения $0.3 - 0.7$ мВ/м, если полагать, что у поверхности Земли его значение составляет 1000 В/м. Так как поле в сейсмическом регионе не превышает примерно 100 В/м, то величину амплитуды поля следует уменьшить до $0.03 - 0.07$ мВ/м. Принимая во внимание, что в дневных условиях проводимость ионосферы возрастает на один – два порядка, величина поля составит примерно 10^{-3} мВ/м. Расчеты, проведенные в работах (Pulinets et al., 2000, 2003), показали, что поле в ночной ионосфере может достигать величины $(0.1 - 1)$ мВ/м, если его значение на поверхности Земли составляет десятки киловольт на метр на горизонтальном масштабе в 100 километров. Таких полей с длительностью в несколько дней не существует.

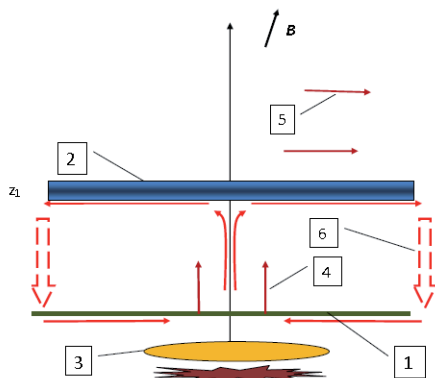


Рис.4. Схема проникновения в ионосферу электрического поля, в случае расположения ЭДС в литосфере. 1. Поверхность Земли. 2. Проводящий слой ионосферы. 3. ЭДС в литосфере. 4. Электрическое поле в атмосфере. 5. Квазистатическое электрическое поле в ионосфере. 6. Атмосферно – ионосферная электрическая цепь.

Если принять, что величина поля на поверхности Земли составляет порядка 100 В/м, то его значение в ионосфере согласно этой модели будет 10^3 мВ/м. Проведенные в работе (Denisenko et al., 2008) расчеты подтверждают этот вывод. Показано, что при максимальном значении поля на поверхности Земли 100 В/м поле в ионосфере имеет величину порядка $10^3 - 10^4$ мВ/м. Следует заметить, что фоновое поле в среднеширотной ионосфере составляет величину порядка 1 мВ/м. Аналогичный порядок величины поля в ионосфере получен и во всех других работах, использующих данную модель. Они показали, что источник, расположенный в литосфере, не может сформировать квазистатическое электрическое поле в ионосфере. Этот вывод не зависит от способов расчета поля. Он становится очевидным исходя из следующей простой оценки. Для однородного участка цепи имеем закон непрерывности тока проводимости $\nabla \cdot \mathbf{j} = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E} = 0$. Максимальная оценка амплитуды поля будет в одномерном приближении $d\sigma E/dz = 0$. Обозначив: σ_0, σ_1 - проводимость атмосферы у поверхности Земли и в ионосфере, E_0, E_1 - значение электрического поля на поверхности Земли и в ионосфере, из этого уравнения получим: $E_1 = E_0 (\sigma_0 / \sigma_1)$. Принимая $\sigma_0 \approx 10^{-14} \text{ S/m}$; $\sigma_1 \approx 10^{-6} \text{ S/m}$; $E_0 = 100 \text{ V/m}$, получим $E_1 \approx 10^3 \text{ mV/m}$, что на три порядка меньше величины фонового поля в ионосфере. Рассматриваемая модель противоречит экспериментальным данным, отмеченным выше. Именно, процесс подготовки достаточно крупных землетрясений сопровождается усилением квазистатического электрического поля в ионосфере до величин порядка 10 mV/m одновременно на горизонтальных масштабах в сотни километров. Чтобы объяснить экспериментальные данные с помощью обсуждаемой выше модели, необходимо предположить, что поле на поверхности Земли возрастает, по меньшей мере, в 10^4 раз и его величина сохраняется в течение нескольких дней на горизонтальных расстояниях в сотни километров. Измерения электрического поля на поверхности Земли не подтверждают подобного предположения. Значительные долгоживущие возмущения поля на поверхности Земли не наблюдаются.

Случай расположения ЭДС в атмосфере соответствует среднему блоку Рис.3. Подобная ситуация возникает во время грозовой активности. Метод расчета поля грозового облака в ионосфере предложен в работе (Park and Dejnakar-intra, 1973). В ряде работ этот метод был использован при исследовании проникновения электрического поля сейсмического происхождения в ионосферу. Существует принципиальная разница между этими двумя явлениями, позволяющая считать подобный подход ошибочным. Под грозовым облаком на поверхности Земли наблюдается электрическое поле величиной до десятков киловольт на метр, в то время как в сейсмическом регионе отсутствует заметное изменение электрического поля на поверхности Земли. Поэтому в работах (Molchanov and Hayakawa, 1996; Pulinets et al., 2000) не удалось получить механизм проникновения квазистатического электрического поля в ионосферу. Проведенные исследования в упомянутых выше работах позволяют сделать вывод о том, что расположение ЭДС в литосфере или в атмосфере не может объяснить возникновения квазистатического электрического поля в ионосфере амплитудой 10 мВ/м и горизонтальным масштабом (100 – 1000) км, действующего в течение нескольких дней. Кроме этого, необходимо объяснить отсутствие в то же время заметного возмущения поля с теми же характеристиками на поверхности земли.

Единственная на настоящее время возможность объяснить результаты наблюдения квазистатического электрического поля сейсмического происхождения в ионосфере проиллюстрирована в правом блоке Рис.3. Эта возможность использована в принципиально иной модели, активно разрабатываемой в последнее время (Sorokin et al., 2001; Сорокин и Чмырев, 2002; Sorokin et al., 2005; Sorokin et al., 2007; Sorokin and Chmyrev, 2010). Модель основана на том, что во время подготовки землетрясения возникает дополнительный источник тока в глобальной цепи, связанный с подготовкой землетрясения. Область ЭДС формируется в приземных слоях атмосферы и включает в себя границу раздела литосфера – атмосфера. В этом случае наблюдаемое электрическое поле на по-

верхности Земли находится внутри источника ЭДС. На Рис.5 приведена схема формирования ЭДС. Она возникает в результате переноса

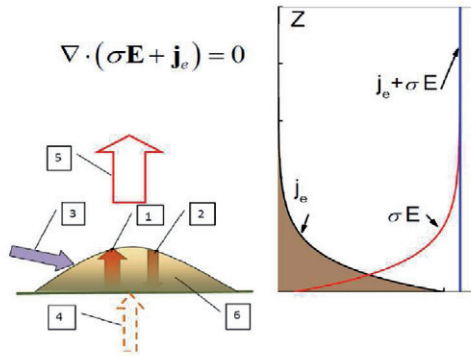


Рис.5. Схема формирования ЭДС в приземном слое. 1. Перенос заряженных аэрозолей под действием атмосферной конвекции и турбулентной диффузии. 2. Гравитационное оседание. 3. Атмосферная радиоактивность. 4. Почвенные газы. 5. Электрический ток проводимости. 6. Сторонний ток ЭДС

вверх и гравитационного оседания заряженных аэрозолей, инжектируемых в атмосферу почвенными газами при усилении сейсмической активности. Сторонний ток ЭДС с высотой убывает, в то время как ток проводимости возрастает. При этом полный ток в цепи с высотой не меняется. Значение тока проводимости у поверхности Земли может быть порядка тока хорошей погоды, а значение стороннего тока превышает его величину на четыре – пять порядков. Следовательно, величина плотности тока проводимости на ионосферных высотах будет порядка плотности стороннего тока у поверхности Земли. На Рис.6. приведена эквивалентная схема участка глобальной цепи, в которую включена ЭДС. Для него применим закон Ома для участка неоднородной цепи. Горизонтальной компоненте поля $E_1 \sim 10$ мВ/м в ионосфере соответствует ток проводимости плотностью $j \sim \sigma_1 E_1 \sim 10^{-8}$ А/м². Как показано в работе (Sorokin et al., 2001), протекая через атмосферу вблизи поверхности Земли, ток проводимости может иметь величину 10^{-12} А/м², а поле, соответственно, величину порядка 100 В/м (см. рис.5). Этот факт можно проиллюстрировать простой оценкой. Уравнение непрерывности полного тока в атмосфере имеет вид $\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_e) = 0$, где \mathbf{j}_e - сто-

ронный ток ЭДС. Оценка поля в ионосфере в одномерном случае дает $\sigma_0 E_0 + j_{e0} = \sigma_1 E_1$. Из этого равенства получаем $E_1 = E_0 (\sigma_0 / \sigma_1) (1 + j_{e0} / \sigma_0 E_0)$, где j_{e0} - плотность стороннего тока ЭДС вблизи поверхности Земли. Первое слагаемое в правой части равенства соответствует модели, используемой авторами работ (Pulinets et al., 2000, 2003; Denisenko et al., 2008; Ampferer et al., 2010). Если, для примера, предположить, что сторонний ток обусловлен движением аэрозолей с концентрацией N и зарядом Ze под действием вертикальной конвекции атмосферы со скоростью v , то его величину можно оценить по формуле $j_{e0} \approx ZeNv$. Заряд аэрозолей в атмосфере находится в пределах от 100 до 1000. Полагая $Z = 3 \times 10^2$, $N = 8 \times 10^9 m^{-3}$, $v = 0.3 m/s$, получим оценку величины поля в ионосфере $E_1 \approx 10^{-6} (1 + 10^4) V/m \approx 10 mV/m$. Даже из такой грубой оценки следует, что выбор

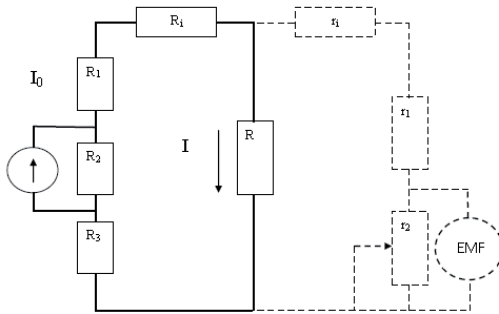


Рис.6. Эквивалентная схема формирования электрического поля в ионосфере над районом образования ЭДС в приземной атмосфере. Сплошной линией обозначена глобальная цепь, прерывистой линией обозначен участок цепи над районом образования ЭДС.

модели проникновения поля в ионосферу, генерируемого ЭДС, расположенной в литосфере или в атмосфере, ведет к потере четырех порядков величины поля в ионосфере. Высказанное в работе (Pulinets, 2012) замечание относительно обсуждаемой модели свидетельствует о непонимании автором не только самой модели, но и различия между током проводимости и сторонним током ЭДС. Даже приведенная выше простая оценка свидетельствует о реальности стороннего тока, т.к. его величина определяется наблюдаемыми параметрами.

5. Электрическое поле сейсмического происхождения в атмосфере – ионосферной электрической цепи

Механизм формирования стороннего тока ЭДС, обусловленной динамикой заряженных аэрозолей в приземных слоях атмосферы, рассмотрен в работах (Сорокин и Яценко, 1999; Сорокин и Яценко, 2000; Sorokin and Yaschenko, 2000). Возникновение ЭДС возможно в процессе интенсификации выброса заряженных почвенных аэрозолей из литосферы в атмосферу или изменения метеорологических условий при их стабильном высотном распределении (см. Рис.5). Квазистатическое высотное распределение аэрозолей может формироваться в результате их турбулентного переноса вверх и гравитационного оседания. Турбулентный перенос осуществляется благодаря вертикальному градиенту горизонтального ветра при передаче кинетической энергии ветра в энергию турбулентных пульсаций, а так же термической неустойчивости атмосферы в случае, когда отрицательный градиент температуры превышает ее адиабатический градиент. Турбулентные вихри переносят аэрозоли из области высот, где их концентрация велика, на высоты с низкой концентрацией. Равновесие достигается, когда вертикальный поток аэрозолей уравнивается их гравитационным оседанием.

В работе (Sorokin et al., 2001) получено уравнение функции распределения аэрозольных частиц по электрическому заряду и высоте. Эта функция имеет смысл вероятности того, что в момент времени t на высоте z частица имеет заряд Ze . Используя моменты функции распределения, получено уравнение для вертикальной компоненты плотности стороннего тока ЭДС j_c при заданной проводимости атмосферы σ , коэффициента турбулентной диффузии и скорости гравитационного оседания аэрозолей. Это уравнение позволяет определить высотное распределение стороннего тока. Принято, что заряд аэрозолей фиксирован и в атмосфере отсутствует радиоактивность. Из уравнения вытекает оценка величины стороннего тока $j_c(0,t)$ вблизи поверхности Земли:

$$j_c(0,t) = (e\sigma_0/\varepsilon_0)(Z_+N_+ - Z_-N_-)H_j$$

В равенстве обозначено e - элементарный заряд,

ε_0 - электрическая постоянная, σ_0 - проводимость приземной атмосферы, Z_{\pm} - количество положительных и отрицательных зарядов на аэрозолях, N_{\pm} - концентрация положительно и отрицательно заряженных аэрозолей, H_j - масштаб вертикального распределения стороннего тока. Пусть поверхность Земли пересекают положительно заряженные аэрозоли. Полагая $\sigma_0 \approx 2 \times 10^{-14}$ См/м, $Z_+ = 300$, $N_+ = (1 \div 5) \times 10^9$ 1/м³, $H_j = (2 \div 5) \times 10^3$ м, получим $j_s(0, t) \approx (10^{-6} \div 10^{-7})$ А/м². Полученная оценка величины стороннего тока ЭДС показала, что предлагаемый механизм позволяет получить наблюдаемую плотность тока в ионосфере $\sim 10^{-8}$ А/м², что соответствует данным наблюдения.

Во многих случаях инжекция почвенных аэрозолей в атмосферу происходит совместно с радиоактивными элементами, которые дополнительно ионизируют атмосферу. Ионизация увеличивает ее проводимость. Инжекция аэрозолей уменьшает проводимость в результате прилипания ионов к аэрозолям. Кроме того, взаимодействие ионов с заряженными аэрозолями изменяет на них заряд.

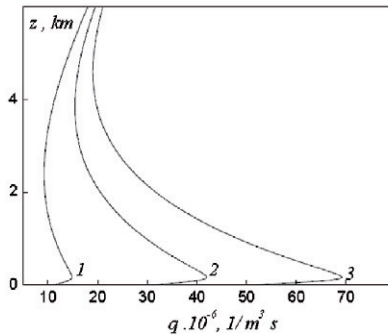


Рис.7. Высотная зависимость скорости образования ионов в эпицентре возмущенной области (Sorokin et al., 2007). 1. $A=0$, 2. $A=2$, 3. $A=4$.

Это приводит к изменению стороннего тока ЭДС, формируемого при инжекции аэрозолей в атмосферу. Эти процессы впервые теоретически изучены в работе (Sorokin et al., 2007). Найдено высотное распределение скорости образования ионов q , возникающих в результате поглощения в воздухе гамма излучения

и альфа частиц радиоактивного распада. На Рис.7 представлен пример расчета высотной зависимости $q = q(z)$. Параметр A означает показатель роста уровня радиоактивности у поверхности Земли. В этом примере скорость образования ионов под действием альфа частиц и гамма излучения равны друг другу. Выбраны значения скорости образования ионов в невозмущенном состоянии на поверхности Земли 10^7 $1/\text{м}^3\text{с}$ и 4×10^7 $1/\text{м}^3\text{с}$ на высоте максимума в стратосфере. Как следует из этих графиков, вертикальное распределение скорости образования ионов отличается от экспоненциальной высотной зависимости распределения атмосферной радиоактивности. Наблюдается значительное увеличение скорости образования ионов в максимуме.

Для расчета стационарного состава ионов в атмосфере использована система ионизационно – рекомбинационных процессов. В ней учитываются процессы ионизации и рекомбинации, перенос ионов под действием электрического поля и взаимодействие с заряженными аэрозолями. Эта система дополнена уравнением переноса заряженных аэрозолей. Аэрозоли переносятся вверх под действием атмосферной конвекции и в результате турбулентной диффузии. Аэрозоли уменьшают проводимость атмосферы за счет прилипания к ним ионов. В результате увеличивается время релаксации их заряда. Проведенные теоретические исследования показали, что концентрация заряженных аэрозолей, проводимость атмосферы, ЭДС и электрическое поле вблизи поверхности Земли взаимозависимы. Для этих величин в работе получена система нелинейных уравнений. На Рис.8 приведены результаты расчета высотной зависимости проводимости атмосферы. Для расчетов выбрано значение концентрации аэрозолей вблизи поверхности Земли равное 2×10^9 $1/\text{м}^3$. Из графиков следует, что быстрый рост проводимости наблюдается в приповерхностном слое в результате увеличения уровня радиоактивности. Расчеты показали, что рост концентрации аэрозолей в атмосфере ведет к уменьшению проводимости из-за потерь легких ионов вследствие их прилипания к аэрозолям.

В работах (Sorokin et al., 2005b; Sorokin et al., 2007) показано, что сторонний ток ЭДС зависит от проводимости и вертикальной компоненты генерируемого электрического поля на поверхности Земли. Наземные наблюдения не обнаруживают заметных одновременных изменений квазистатического электрического поля в сейсмически активных областях с горизонтальным масштабом в сотни – тысячи километров, существующих в течение нескольких

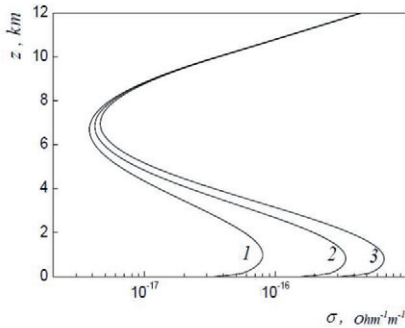


Рис.8. Высотное распределение проводимости атмосферы в центре возмущенной области (Sorokin et al., 2007). Выбраны значения: 1. $A=0$, 2. $A=2$, 3. $A=4$.

дней. Следовательно, возможные возмущения поля не должны превышать его фоновые значения порядка 100 В/м . Как показано в работе (Sorokin et al., 2005b), причина такого ограничения величины поля на поверхности Земли состоит в существовании механизма обратной связи между этим полем и сторонним током ЭДС, который генерирует электрическое поле. Обратная связь между ЭДС и электрическим полем возникает в результате формирования потенциального барьера на границе литосфера - атмосфера при пересечении ее движущимися вверх заряженными аэрозолями. Их движение вверх осуществляется благодаря вязкости выходящих в атмосферу почвенных газов. Если, например, положительно заряженная частица выходит из земли в атмосферу, то поверхность земли заряжается отрицательно и возникающее электрическое поле, направленное вниз, которое препятствует выходу частицы на поверхность. В тоже время, это поле стимулирует выход на поверхность отрицательно заря-

женных частиц. При наличии такой связи значение стороннего тока на поверхности Земли зависит от вертикальной компоненты электрического поля на ее поверхности. Когда направленное вниз поле по величине поле достигает критического значения, то оно «запирает» поток положительно заряженных частиц. Соответственно, положительно направленное поле «запирает» поток отрицательно заряженных частиц. Критическое поле по порядку величины определяется из баланса сил вязкости, гравитации и электростатической силы. Проведенное в работах (Sorokin et al., 2005b; 2007) исследование данного механизма ограничения поля показало, что величина вертикальной компоненты электрического поля для любых значений стороннего тока ЭДС тока не превышает определенного максимального значения. Его величина составляет примерно 90 В/м . В работе (Sorokin et al., 2007) впервые выведены самосогласованные уравнения стороннего тока и электрического поля. На Рис.9 представлены результаты расчета высотной зависимости

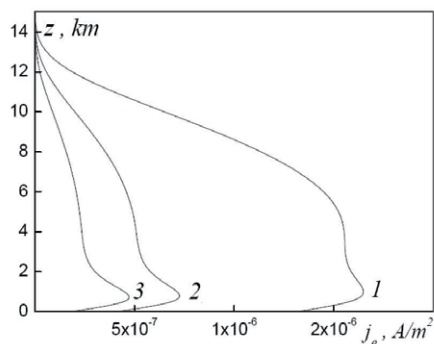


Рис.9. Высотная зависимость стороннего электрического тока в эпицентре возмущенной области при различных уровнях атмосферной радиоактивности: 1. $A=0$, 2. $A=2$, 3. $A=4$ (Sorokin et al., 2007).

стороннего электрического тока в эпицентре возмущенной зоны с учетом наличия его обратной связи с электрическим полем. Расчеты показали, что сторонний ток в основном сконцентрирован на высотах до 10 километров. Его значение вблизи Земли может составлять величину $(10^{-8} \div 10^{-6}) \text{ А/м}^2$. Величина тока

уменьшается с ростом уровня атмосферной радиоактивности. Такая зависимость определяется изменением проводимости ионизированной атмосферы.

В работах (Sorokin et al., 2001; 2005b,c; 2007; Sorokin and Chmyrev, 2010) развита теория генерации квазистатического электрического поля сейсмического происхождения, которая согласуется с прямыми и косвенными данными наблюдения поля в ионосфере, атмосфере и на поверхности Земли. Поле связано с возмущением электрического тока проводимости в глобальной атмосферно – ионосферной электрической цепи. Источником возмущения тока является ЭДС, включенная в глобальную цепь. Она возникает в результате инжекции заряженных аэрозолей в атмосферу, их вертикального переноса и гравитационного оседания. На Рис.10. приведена схема

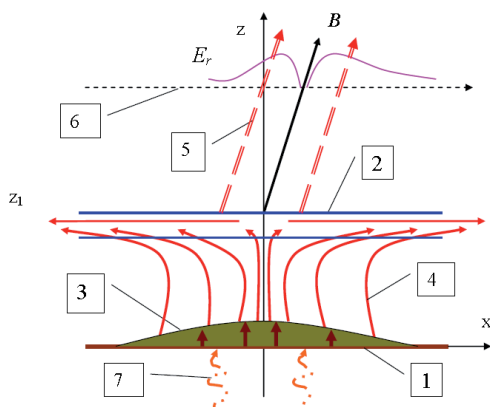


Рис.10. Схема формирования квазистатического электрического поля (Sorokin et al., 2005a). 1. Поверхность Земли. 2. Проводящая ионосфера. 3. Сторонний ток ЭДС в приземной атмосфере. 4. Ток проводимости в атмосферно – ионосферной цепи. 5. Продольный ток. 6. Траектория спутника. 7. Почвенные газы.

формирования электрического тока в глобальной цепи. Теория включает в себя самосогласованную систему нелинейных уравнений для расчета пространственного распределения стороннего тока, электрического поля, проводимости атмосферы, концентраций ионов и заряженных аэрозолей. Разработан метод расчета пространственного распределения электрического поля (Sorokin et al.,

2005с). На Рис.11 приведен пример расчета пространственного распределения поля в ионосфере и на поверхности Земли. Горизонтальное

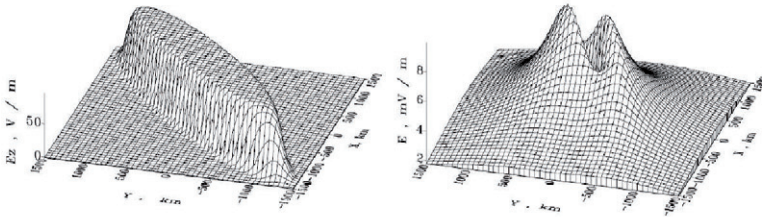


Рис.11. Пространственное распределение электрического поля, рассчитанное для угла $\beta = 45^\circ$ ориентации оси разлома относительно плоскости магнитного меридиана (Sorokin et al., 2006). Левая панель: Вертикальная компонента электрического поля на поверхности Земли. Правая панель: Горизонтальная компонента электрического поля в ионосфере. Угол наклона магнитного поля 20° .

распределение стороннего тока на поверхности Земли выбрано в виде эллипса, ось которого направлена под углом плоскости магнитного меридиана. Результаты расчета показывают, что горизонтальная компонента поля в ионосфере достигает величины порядка 10 мВ/м , в то время как величина вертикальной компоненты поля на поверхности Земли ограничена значением порядка 100 В/м . Из расчетов следует, что поле в ионосфере достигает максимального значения на расстоянии порядка размера области, охваченной сторонним током. Горизонтальный размер области, в которой усиливается вертикальная компонента электрического поля на поверхности Земли, в три раза превышает горизонтальный масштаб распределения сторонних токов. Внутри этой области поле практически не меняется в зависимости от расстояния.

В работах (Sorokin et al., 2011a,b; 2012) проведены теоретические исследования пространственного распределения квазистатического электрического поля в атмосфере. Основанные на результатах теории расчеты пространственного распределения отношения величины электрического поля к его пробойному значению показали, что в тропосфере при определенных условиях возможно возникновение областей, в которых поле достигает пробойного значения. На

Рис.12 приведен пример пространственного распределения электрического поля. Красным цветом обозначена область, в которой поле

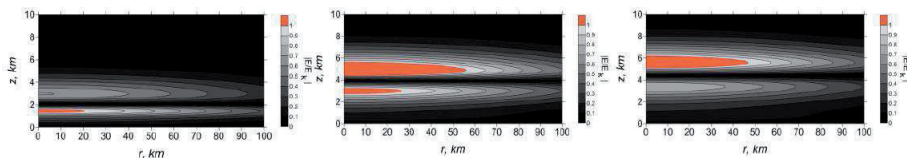


Рис.12. Пространственное распределение отношения величины вертикальной компоненты электрического поля к его пробойному значению.

достигает пробойного значения. Эта область представляет собой один или два слоя толщиной 1 – 2 километра, расположенных на высотах до 10 километров. Характеристики этих слоев определяются параметрами атмосферы и аэрозолей. С ростом скорости вертикальной конвекции атмосферы увеличивается высота области пробойного поля в нижней части тропосферы, затем выше появляется второй слой, высота которого достигает 10 километров. При этом, нижний слой исчезает. Подробное исследование пространственных характеристик области пробойного поля связано с решением системы нелинейных уравнений.

6. Ионосферные неоднородности, связанные с возмущением тока в атмосферно – ионосферной электрической цепи

Проведенные расчеты электрических полей свидетельствуют о том, что их величина в ионосфере может достигать значений в десятки мВ/м. Такие поля могут стимулировать развитие плазменных и электромагнитных эффектов, которые рассмотрены ниже. Рост электрического поля приводит к неустойчивости акустико-гравитационных волн (АГВ) в ионосфере (Sorokin et al., 1998; Сорокин и Чмырев, 1999). Эта неустойчивость связана с преобразованием выделяемого ионосферным током тепла в энергию волны. Предполагается наличие сильного теплового обмена в плазме, приводящего к тому, что температура электронов равна температуре ионов и молекул. Распространение АГВ в этой среде сопровождается возмущением проводимости и, следовательно, электрического тока. При определенных условиях выделяемое электрическим током

тепло приводит к росту амплитуды АГВ. Источником энергии данной неустойчивости является ЭДС внешнего электрического поля. Энергия поля переходит в энергию волн, не изменяя теплового баланса среды. Ее величина возрастает с увеличением амплитуды электрического поля. Величина критического поля определяется из равенства количества тепловой энергии возмущенного тока и количества энергии диссипации за счет магнитной вязкости. Если поле меньше критического, то начальное возмущение затухает, а если больше – то происходит раскачка волны. Оценка показывает, что величина критического поля составляет $(6 \div 10)$ мВ/м.

Анализ устойчивости АГВ в присутствии внешнего электрического поля произведен на основе уравнений движения, непрерывности, сохранения и состояния идеального газа в гравитационном поле и закона Ома для плотности тока в ионосферной плазме. Результаты расчета зависимости от частоты показателей преломления $n(\omega)$ и поглощения $\kappa(\omega)$ показали, что в окрестности частоты Бранта-Вяселя ω_g коэффициент преломления возрастает почти на порядок, а коэффициент поглощения становится отрицательным и достигает максимального значения по абсолютной величине. На Рис.13 приведены графики n, κ от частоты.

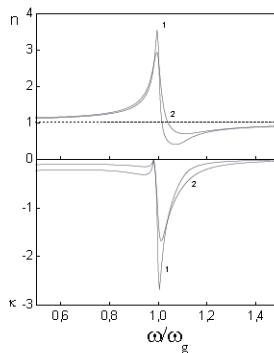


Рис.13. Зависимость от частоты показателей преломления и поглощения АГВ, распространяющейся горизонтально в ионосфере во внешнем электрическом поле (Sorokin et al., 1998). Кривые 1 и 2 соответствуют различному соотношению между относительным изменением плотности ионов и плотности газа в волне.

Это означает, что волны с частотой порядка ω_g экспоненциально нарастают при распространении и выделяются по амплитуде над фоном, образуя периодическую структуру с масштабом $l = \pi a / \omega_g n(\omega_g)$. На этих частотах показатель преломления достигает максимального значения $n(\omega_g)$. Его рост ведет к значительному уменьшению фазовой скорости волны $v_g = a/n(\omega_g) < a$ по сравнению со скоростью звука a . Экспоненциальный рост амплитуды АГВ в электрическом поле в ионосфере ограничивается процессом формирования вихря. Эта нелинейная стадия развития неустойчивости волны рассмотрена в работе (Chmyrev and Sorokin, 2010). В работе получены нелинейные уравнения для низкочастотной ветви АГВ. В нелинейной стадии распространения возмущения найдено стационарное решение уравнений, описывающее движение волны с постоянной скоростью v_g вдоль оси x . Полученная функция тока показывает, что неустойчивость в электрическом поле трансформирует АГВ в дипольный вихрь. Если величина электрического поля превышает пороговое значение, то происходит генерация уединенных дипольных вихревых структур в нижней ионосфере.

Одновременно с возмущением плазмы в вихре изменяется ее проводимость, что приводит к формированию в проводящем слое нижней ионосферы горизонтальных неоднородностей проводимости. Их появление сопровождается образованием плазменных неоднородностей в верхней ионосфере, вытянутых вдоль магнитного поля (Sorokin et al., 1998; Сорокин и Чмырев, 1999; Sorokin et al., 2000). Возникновение неоднородности проводимости в E -слое ионосферы в присутствии внешнего электрического поля приводит к появлению электрического поля поляризации. Высокая проводимость вдоль магнитных силовых линий обеспечивает распространение поля поляризации в верхние слои ионосферы и магнитосферу. Формируемая при этом электрическая цепь включает в себя продольные токи и замкнутые на них поперечные токи. Продольные токи переносят электрическое поле вверх вдоль магнитных силовых

линий. Поперечные токи возникают в ионосфере благодаря проводимости Педерсена. Так как продольные токи переносятся электронами, а носителями поперечных токов являются ионы, то распространение электрического поля вдоль магнитных силовых линий и появление токов замыкания сопровождается локальными изменениями концентрации плазмы. Эти плазменные неоднородности вытянуты вдоль магнитного поля (см. Рис.14).

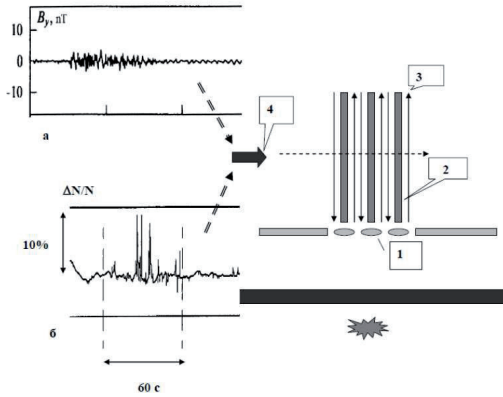


Рис.14. Схема формирования плазменных слоев и продольных токов в верхней ионосфере, вызванного поляризацией горизонтальных неоднородностей проводимости нижней ионосферы электрическим полем. 1) Неоднородности проводимости, 2) Плазменные слои, 3) Продольный ток, 4) Траектория спутника.

Если АГВ распространяется вдоль оси x , то неоднородности проводимости, связанные с образованием вихрей, вытянуты вдоль оси y . Горизонтальная скорость движения вихря с поперечным пространственным масштабом l вдоль оси x , совпадает со скоростью АГВ v_g . В работе (Sorokin et al., 1998) получена оценка величины относительного изменения концентрации плазмы в слое, вытянутом вдоль магнитного поля, $\Delta N/N_0 \approx (1.6 \div 16)\%$, и его поперечного пространственного масштаба $l \approx 4 \div 40 \text{ км}$. На Рис.14 приведена схема регистрации на спутнике флуктуаций плотности плазмы и УНЧ колебаний геомагнитного поля. При пересечении спутником со скоростью порядка 8 км/с плазменных неоднородностей с горизонтальным масштабом l регистрируются флуктуации плотности плазмы с периодом $\Delta t \approx (0.4 \div 4) \text{ с}$. Так как эти неоднородности обра-

зованы продольными токами, то при их пересечении спутником регистрируются поперечные колебания магнитного поля с тем же периодом. Их амплитуда b оценивается величиной $b \approx 5 \text{ нТл}$. Проведенные теоретические исследования позволили сформулировать механизм формирования горизонтальных периодических неоднородностей в нижней ионосфере и вытянутых вдоль магнитного поля плазменных слоев. При подготовке землетрясения в магнитной трубке, охватывающей своим основанием сейсмический регион, усиливается квазистатическое электрическое поле согласно описанному выше механизму. Когда его величина превышает некоторое критическое значение примерно 5-10 мВ/м, возникают горизонтальные периодические неоднородности в нижней ионосфере и вытянутые вдоль магнитного поля плазменные слои в верхней ионосфере.

Представленный выше механизм подтверждается прямыми спутниковыми измерениями электрического поля и плотности плазмы. В работе (Chmyrev et al., 1989) приведены результаты наблюдения УНЧ - колебаний геомагнитного поля в диапазоне частот 0,1 - 8 Гц (Рис.14а), полученные на спутнике «Интеркосмос - Болгария 1300» в 15 минутном интервале перед землетрясением, которое произошло 12.01.1982г. в 17.50.26 УТ. Рост электрического поля до величины 7 мВ/м и появление УНЧ - колебаний геомагнитного поля с амплитудой 3 нТл отмечен в двух зонах: над эпицентром и в магнитно - сопряженной области. Результаты наблюдения мелкомасштабных (порядка 10 км вдоль орбиты) неоднородностей плотности плазмы с относительной амплитудой $\Delta N/N \approx 8\%$, которые регистрировались при пересечении спутником «Космос-1809» возмущенной магнитной силовой трубки (Рис.14б), приведены в работе (Chmyrev et al., 1997). Результаты одновременного наблюдения роста электрического поля и возникновения плазменных неоднородностей в магнитной трубке, основание которой охватывает зону формирования тайфунов, опубликованы в работе (Sorokin et al., 2005а). Показано, что внутри возмущенной магнитной силовой трубки поле усиливается до 15 мВ/м и, при этом, воз-

никают плазменные неоднородности с поперечным пространственным масштабом 10 – 20 км. Подобные результаты повторяются для десятка событий. Несмотря на то, что источники генерации квазистатического поля в ионосфере различны, процессы образования неоднородностей подобны. Попытки объяснить возникновение в ионосфере мелкомасштабных периодических неоднородностей другими механизмами до сих пор оказывались несостоятельными.

Возмущение электрического тока в глобальной цепи при появлении в ней дополнительной ЭДС (см. Рис. 10) сопровождается модификацией ионосферы. Механизм возмущения концентрации электронов и ионов в D области ионосферы исследован в работе (Лаптухов и др., 2009). В рамках представленной в ней модели рассмотрено влияние переноса электронов и ионов под действием электрического поля и нагрева полем электронной компоненты плазмы на формирование возмущения в D слое. На высотах области D ионосферы при усилении электрического тока, протекающего через эту область, стационарное высотное распределение плотности плазмы значительно отличается от ее невозмущенного распределения. В спокойных условиях этому распределению соответствует величина плотности фонового электрического тока. Изменение электрического тока и, следовательно, электрического поля, в атмосферно – ионосферной цепи во время протекания интенсивных процессов в нижней атмосфере ведет к формированию возмущения пространственного распределения заряженных частиц в нижней ионосфере. Это возмущение в D области возникает как из-за переноса током электронов и ионов, так и из-за нагрева электронов. Электрическое поле протекающих токов приводит к переносу электронов и положительно и отрицательно заряженных ионов в D – слое ионосферы. В верхней части слоя существуют свободные электроны, а в нижней его части - отрицательно заряженные ионы, которые возникают в результате быстрого прилипания электронов к нейтральным молекулам. При протекании электрического тока из-за переноса и смены типа носителей заряда возникает слой повышенной концентрации электронов.

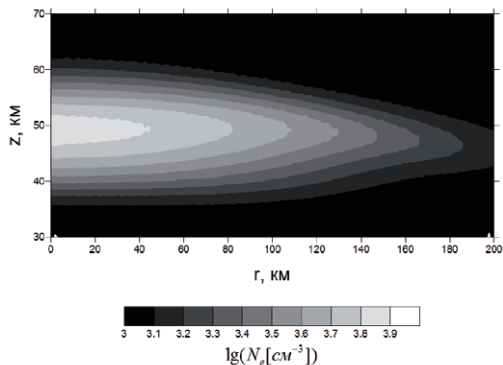


Рис.15. Пространственное распределение концентрации электронов в D области ионосферы, формируемое в результате возмущения электрического тока в глобальной цепи (Лаптухов и др., 2009).

На рис.15 приведены результаты расчета пространственного распределения концентрации электронов, полученные в работе (Лаптухов и др., 2009). Перенос электронов вниз приводит к росту плотности плазмы на высотах ниже 70 километров. Это происходит вследствие того, что все электроны не успевают прилипнуть к нейтральным молекулам на более низких высотах. Концентрация электронов и ионов на высотах (40÷50)км может возрасти на порядок величины. При этом перенос заряженных частиц электрическим полем играет более существенную роль в формировании возмущения по сравнению с нагревом электронов этим полем. Данная модель модификации D-области ионосферы над эпицентрами готовящихся землетрясений подтверждается результатами работ (Hayakawa et al., 2005; Ohta et al., 2006; Nickolaenko et al., 2006). В этих работах обнаружены аномальные эффекты при наблюдении Шумановских резонансов вблизи сейсмоактивных районов. Так как параметры Шумановских резонансов определяются свойствами волновода Земля-ионосфера, то этот эффект интерпретировался в них, как результат изменения степени ионизации плазмы в D-слое.

Возмущение электрического тока в участке глобальной цепи над сейсмическим регионом приводит к модификации E слоя, включая формирование спо-

радикального слоя. Теоретическая модель возмущения нижней ионосферы выше D слоя рассмотрена в работе (Sorokin et al., 2006). В этой работе разработан метод расчета пространственного распределения концентрации электронов в нижней ионосфере, возникающего в результате появления ЭДС в приземном слое атмосферы. Показано, что усиление электрического тока, протекающего между Землей и ионосферой, приводит к увеличению плотности плазмы в E слое. В квазистатическом приближении выведена система нелинейных уравнений для концентрации ионов и горизонтальной компоненты возникающего электрического поля при заданном стороннем токе ЭДС в атмосфере. Эти уравнения использованы для расчета пространственного

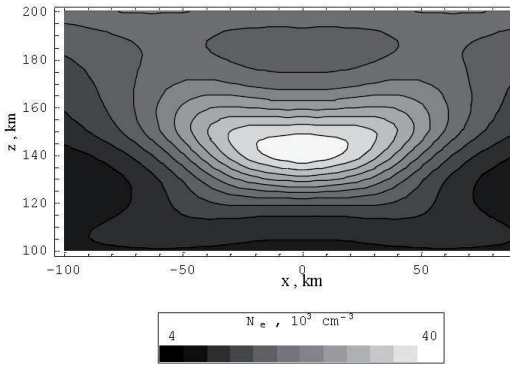


Рис.16. Пространственное распределение электронов в E слое ионосферы в области возмущения электрического тока глобальной цепи (Sorokin et al., 2006).

распределения концентрации электронов, пример которого приведен на рис.16. Кроме, того, расчеты показали, что горизонтальное электрическое поле тока проводимости в ионосфере формирует тонкий слой концентрации электронов в результате дрейфа долго живущих металлических ионов к центру возмущенной области. Получены уравнения, описывающие кинетику и динамику металлических и молекулярных ионов в электрическом поле, возникающем в ионосфере под действием ЭДС в нижней атмосфере. Расчеты показали, что толщина слоя составляет величину порядка 3 километров. Этот слой может регистрироваться,

как аномальный спорадический E слой. Следовательно, появление ЭДС в нижней атмосфере над районом подготовки землетрясения приводит к возмущению регулярного и формированию спорадического слоев в E области ионосферы. Усиление тока в глобальной цепи ведет к росту силы Ампера в нижней ионосфере и к специфическому механизму фильтрации фоновых ВГВ, распространяющихся из атмосферы в ионосферу во время подготовки землетрясения. Активизация сейсмического источника гравитационных волн и усиление их потока вверх сопровождается колебаниями нижней ионосферы. В результате в ионосфере возникает дискретный спектр колебаний, периоды максимумов которого увеличиваются примерно как числа натурального ряда. Рост силы Ампера приводит к появлению колебаний ионосферы, периоды которых значительно меньше по сравнению с периодами колебаний в спокойных

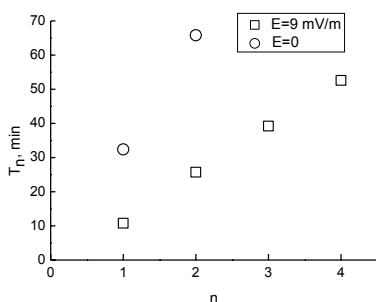


Рис.17. Значения периодов колебаний нижней ионосферы, соответствующие максимумам их спектра. На графике круги соответствуют спокойным условиям, а квадраты – возмущенному электрическому полю ~ 9 мВ/м (Sorokin and Pokhotelov, 2013).

условиях (Sorokin and Pokhotelov, 2013). Расчеты, результаты которых приведены на Рис.17, показали, что в дискретном спектре колебаний появляются два максимума, которым соответствуют периоды колебаний 10 минут и 20 минут.

Для изучения динамики ионосферы в течение длительного времени используются хорошо проверенные радиофизические методы зондирования. К ним относятся определение высотного профиля электронной концентрации с помощью зондирования снизу и сверху, доплеровское зондирование скорости

плазмы, определение полного электронного содержания с помощью сети GPS приемников и идентификация возмущений высоты верхней стенки волновода Земля – ионосфера с использованием наблюдений за амплитудой и фазой сигналов, распространяющихся в этом волноводе. Длительные наблюдения состояния ионосферы каждым из этих методов обнаруживают появление различных аномалий в наблюдаемых сигналах при активизации сейсмических процессов. Рассмотренный механизм формирования возмущения E слоя ионосферы подтверждается данными наблюдений. В ряде работ (см. например, Gokhberg et al., 1989; Гуфельд и др., 1992; Biagi et al., 2004; Rozhnoy et al., 2005; 2007; Hayakawa 2007) наблюдались специфические вариации амплитуды и фазы очень низкочастотных (ОНЧ) радиоволн, трассы распространения которых проходили вблизи эпицентров готовящихся землетрясений. Передатчики и приемники этих волн, распространяющихся в волноводе Земля – ионосфера в спектральном интервале (20 – 50) кГц, располагаются на поверхности Земли. Подобные аномалии характеристик радиоволн возникают перед землетрясениями с магнитудой больше 5 за 3-10 суток до землетрясения.

Рассмотрим результаты наблюдения воздействия сейсмических процессов на нижнюю ионосферу. Характер распространения ОНЧ/НЧ (ОНЧ, 3-30 кГц, НЧ, 30-300 кГц) сигнала в волноводе Земля – ионосфера определяется с одной стороны электрической проводимостью земной поверхности и с другой – проводимостью нижней ионосферы. Эффективная высота отражения сигнала обычно принимается равной 70 км днем и 90 км ночью. Проводимость земной поверхности менее подвержена изменениям и наблюдаемые вариации в сигнале главным образом зависят от высоты отражения, которая определяется величиной и градиентом электронной плотности около границы атмосфера-ионосфера. Дневная ионосфера подвержена воздействию солнечной и магнитосферной активности, поэтому наблюдение вариаций амплитуды и фазы при волноводном распространении сигналов в ночных условиях связано с меньшим числом помех. Впервые ночные возмущения в амплитуде и фазе сигнала перед несколькими сильными землетрясениями на длинных трассах были обнаруже-

ны в работах (Гохберг и др., 1987; Гуфельд и др., 1992). В дальнейшем помимо ночных возмущений было найдено изменение положения характерных минимумов в ежедневном ходе фазы и амплитуды сигнала во время восхода и захода солнца за несколько дней до сильных землетрясений в Японии (Hayakawa et al., 1996; Molchanov and Hayakawa, 1998). Основная сложность мониторинга сейсмической активности состоит в выделении предвестников на фоне глобальных возмущений в нижней ионосфере, вызванных магнитными бурями и суббурями, протонными вспышками и высыпаниями релятивистских электронов, а также циркуляцией атмосферы. Поэтому в первую очередь анализировались возмущения амплитуды и фазы сигналов несейсмического происхождения, которые позволили определить их характерные особенности. Эти данные использовались для выделения аномальных сигналов.

В работе (Biagi et al., 2004) приведены результаты измерения уровня сигналов в ОНЧ/НЧ диапазоне, распространяющихся по пяти трассам. Обнаружены явные уменьшения интенсивности сигнала накануне землетрясений, эпицентры которых располагались вблизи трассы распространения. В работе (Rozhnoi et al., 2005) анализировались сигналы передатчика (40 КГц), расположенного в Японии, в течение времени с 01.07.2004 по 24.01.2005. Приемник находился на Камчатке. Серия землетрясений произошла в течение этого интервала времени вблизи трассы распространения сигналов. Было показано, что в течение нескольких дней до землетрясений и во время каждой их серии наблюдались аномалии в виде уменьшения амплитуды и фазы сигнала. Были рассчитаны спектры возмущений. Как в спектрах спокойных, так и в спектрах аномальных дней основной максимум приходится на период 30-35 минут. Кроме того, во время сейсмической активности регистрировались максимумы спектра с периодами 20-25 минут и 10-12 минут. При анализе спектров вариаций амплитуды и фазы во время магнитных бурь подобного эффекта не обнаружено. В работе (Rozhnoi et al., 2007) представлены результаты наблюдения на Камчатке возмущений амплитуды и фазы ОНЧ/НЧ сигналов, распространяющихся по трем трассам в приземном волноводе, и на спутнике DEMETER в те-

чение двух периодов сейсмической активности в регионе Япония - Камчатка. Обнаружены явные аномалии в характеристиках сигналов, как на Земле, так и на спутнике, в рассматриваемый период сейсмической активности. Сделан вывод о том, что метод спутникового мониторинга сейсмического воздействия на ионосферу с использованием ОНЧ сигналов может быть эффективен при наличии достаточно качественных спутниковых данных. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о возможности использования мониторинга возмущений амплитуды и фазы сигналов наземных ОНЧ/НЧ передатчиков для краткосрочного прогноза сильных землетрясений. Данный метод был применен в работе (Rozhnoi et al., 2009) при изучении эффектов землетрясения 06.04.2009 в Аквиле (Италия). Анализ сигналов от одних и тех же передатчиков на пересекающихся трассах впервые дал возможность локализовать область подготовки землетрясения. Обзор результатов исследований воздействия сейсмических процессов на нижнюю ионосферу приведен в работе (Nayakawa, 2007). Приводятся доказательства существования ионосферных возмущений, связанных с землетрясениями, на основе статистических исследований и изучения отдельных событий. Подчеркивается необходимость объединения как можно большего числа убедительных результатов ОНЧ/НЧ радиозондирования с результатами других методов исследования для объяснения механизма литосферно – ионосферных связей. Как было показано выше, возмущение тока проводимости в глобальной цепи над сейсмическим регионом инициирует модификацию высотного профиля концентрации электронов, которая может служить причиной возникновения аномалий сигналов ОНЧ/НЧ диапазона. Подтверждением такой возможности служат данные, полученные в работе (Фукс и Шубова, 1995) во время чернобыльской аварии. Было показано, что интенсивные выбросы радиоактивных веществ в атмосферу сопровождались изменением фазы и амплитуды СДВ сигналов на трассе распространения, пересекающей район аварии. Расчеты, проведенные в работе (Martynenko et al., 1996) показали, что такие возмущения характеристик распространения СДВ сигналов могут

возникать в результате роста электрического поля в нижней ионосфере до величины ~ 1 В/м.

Ракетные наблюдения в среднеширотной ионосфере показали (Yokoyma et al., 2002), что концентрация электронов в спорадическом слое достигает величины $2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, а электрическое поле внутри слоя имеет значение порядка 10 мВ/м. Результаты наблюдения спорадических слоев перед сильными землетрясениями обсуждались в работах (Ondoh and Hayakawa, 2002; Ondoh, 2003). Отмечалось аномальное увеличение f_oE_s до 9 МГц. В этих работах сделана попытка объяснить появление спорадического слоя действием инжектируемого в атмосферу радона. Предполагалось, что радон переносится к вершине облака с низкой температурой и производит положительно заряженные кристаллы льда. Нижняя часть облака заряжается отрицательно. Предполагалось, что спорадический слой возникает в результате переноса ионов в нижнюю ионосферу, которые возникают в процессе электрических разрядов в облаке. В работах (Liperovsky et al., 1997; Meister et al., 2002) рассматривался механизм формирования спорадического слоя акустическими и внутренними гравитационными волнами.

Возмущение электрического тока в глобальной цепи над сейсмическим регионом приводит к значительной модификации F слоя ионосферы. В последнее время большое развитие получил метод измерения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с использованием GPS приемников. Ведутся исследования, посвященные анализу пространственного распределения ПЭС накануне землетрясений (см. например Liu et al., 2001; Zakharenkova et al., 2007, 2008). Однако, существуют проблемы выделения возмущений, связанных с подготовкой землетрясений. В работе (Afraimovich and Astafyeva, 2008) развит метод, основанный на расчете глобального и локального ПЭС в возмущенной области для того, чтобы отделить локальные изменения от глобальных. Показано, что в некоторых случаях изменения ПЭС в сейсмическом регионе могут быть следствием глобальных изменений ионизации ионосферы, возни-

кающих благодаря изменениям солнечной и геомагнитной активности. Сравнение значений локальных и глобальных ПЭС показали, что аномальные ПЭС, интерпретируемые, как эффекты подготовки будущих землетрясений, связаны с изменениями в глобальной ионизации в результате динамики УФ солнечной радиации и геомагнитной активности, а не являются результатом усиления сейсмической активности перед землетрясением. Сделан вывод о том, что для установления факта подготовки землетрясения не достаточно провести только статистический анализ ПЭС над сейсмической зоной. Необходимо выполнить анализ глобальных данных динамики солнечного УФ излучения и перестройки ионизации в течение геомагнитных возмущений, которые являются главными факторами, влияющими на формирование локальных ПЭС. В работе (Pulinets et al., 2007) утверждалось, что аномальные изменения ПЭС, наблюдавшиеся в зоне растущей сейсмической активности за две недели до землетрясения в Nestor Mine (Калифорния) 16.10.1999 ($M = 7.1$), связаны с подготовкой землетрясения. Авторы этой работы полагали, что подобное возмущение является предвестником и может быть использовано для предсказания землетрясений. Однако, в работе (Afraimovich et al., 2004) отмечено, что вариации ПЭС около эпицентра контролируются солнечной и геомагнитной активностью и не связаны с землетрясением. Для анализа этих противоречивых результатов в работе (Thomas et al., 2012) изучены временные ряды данных ПЭС большой длительности, полученные с помощью GPS станций, расположенных как вблизи, так и на больших расстояниях от эпицентра землетрясения. Рассматривались длительные интервалы времени до и после землетрясения. Были воспроизведены основные результаты работы (Pulinets et al., 2007) и показано, что те сигналы, которые считались в этой работе аномалиями, таковыми не являются. Эти аномальные сигналы являются частью естественных вариаций ПЭС глобального масштаба и не связаны с землетрясением 16.10.1999. Сделан вывод о том, что предложенный в работе (Pulinets et al., 2007) метод не может быть использован для прогноза землетрясений. В подобной ситуации еще большее значение при-

обретают теоретические исследования механизма формирования ПЭС процессами, связанными с подготовкой землетрясения.

Следует иметь в виду, что появление электрического поля в ионосфере сводится не только к дрейфу плазмы в F слое. Как показано в работе (Sorokin and Chmyrev, 1999), увеличение электрического поля и связанного с ним роста количества тепла, выделяющегося в E слое ионосферы в результате протекания в ней электрического тока, приводит к росту температуры F слоя. Это оказывает влияние на процессы, формирующие слой F. Тепловой поток q , излучаемый тонким проводящим слоем с интегральной проводимостью Σ в горизонтальном электрическом поле E , по порядку величины равен $q = \Sigma E^2$. Полагая значения $\Sigma = 3 \div 30 \text{ См/м}$, $E = 6 \text{ мВ/м}$, получим $q = (10^{-4} \div 10^{-3}) \text{ Вт/м}^2$. Одним из основных источников нагрева ионосферы является коротковолновое излучение Солнца ($\lambda < 1026 \text{ \AA}$). Приток тепла в результате поглощения этого излучения выше 100 км составляет примерно $q = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ и в зависимости от солнечного цикла может изменяться в несколько раз в ту или иную сторону. Из приведенных оценок следует, что тепло, выделенное электрическим током в ионосфере над зоной подготовки землетрясения, составляет значительную часть общего теплового баланса ионосферы. Следовательно, этот источник тепла решающим образом влияет на ее состояние. Нагрев токами ионосферы увеличивает масштабы высотного распределения ионосферных компонент и, следовательно, высотного профиля слоя F2. Так как источник тепла локализован в нижних слоях ионосферы (120-150 км), то разогрев верхних слоев ионосферы, расположенных над токовым слоем, осуществляется движением нагретого газа в вертикальном направлении. В работе (Ружин и др., 2014) найден механизм возмущения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы во время усиления сейсмической активности. Показано, что пространственное распределение возмущения ПЭС возникает в результате нагрева ионосферы электрическим током и дрейфа плазмы в электрическом поле этого тока. Пространственное распределение ПЭС формируется в результате совместного действия этих двух факторов и его

характер зависит от соотношения между ними. Ток возникает в глобальной атмосферно – ионосферной цепи при появлении в приземных слоях атмосферы ЭДС, которая связана с динамикой инжектируемых в атмосферу заряженных аэрозолей. Развитая модель позволяет рассчитывать пространственное распределение ПЭС в ионосфере при заданном горизонтальном распределении концентрации заряженных аэрозолей на поверхности Земли. На Рис.18 приведен пример расчета пространственного распределения ПЭС. Оценки показали, что нагрев ионосферы при появлении в ней

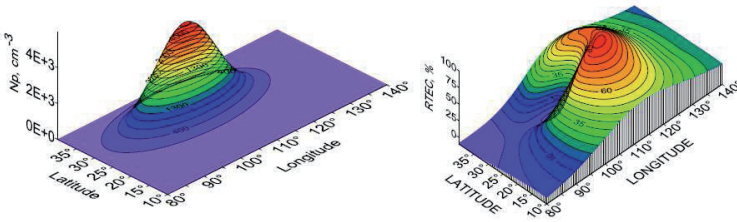


Рис.18. Результаты расчета пространственного распределения ПЭС (Ружин и др., 2014). Пространственное распределение концентрации положительно заряженных аэрозолей на поверхности Земли (левая панель). Горизонтальное распределение относительного возмущения ПЭС (правая панель).

электрического поля величиной $E = 6$ мВ/м приводит к относительному изменению ПЭС в десятки процентов. Следовательно, нагрев ионосферы приводит к изменению ПЭС на такую же величину, что и дрейф плазмы в этом поле. Пространственное распределение ПЭС возникает в результате действия этих двух факторов и его характер зависит от соотношения между ними.

7. Электромагнитные эффекты, сопровождающие возмущение тока в атмосферно – ионосферной электрической цепи

Возмущение электрического тока в глобальной цепи над сейсмическим регионом сопровождается образованием в тропосфере слоев, в которых электрическое поле может достигать пробойных значений. Результаты расчета про-

пространственного распределения электрического поля, величина которого достигает этих значений, приведены на Рис.12.

В работах (Sorokin et al., 2011a,b; 2012) развита теория генерации электромагнитных возмущений, возникающих в результате появления случайных электрических разрядов в области тропосферы, в которой электрическое поле нарастает до пробойного значения.

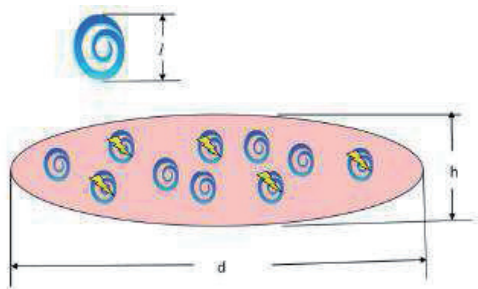


Рис.19. Схема формирования случайных электрических разрядов в результате турбулентности тропосферы в электрическом поле, достигающем пробойного значения.

На Рис.19 приведена схема генерации разрядов в результате тропосферной турбулентности. Так как величина поля электрического пробоя в атмосфере зависит от ее плотности, а в каждом турбулентном вихре происходит флуктуация плотности, то в тех вихрях, в которых величина внешнего электрического поля сравнивается с его пробойным значением, возникает электрический разряд. Таким образом, в результате турбулентности возникают случайные электрические разряды, размер которых порядка пространственного масштаба турбулентного вихря. В результате теоретических исследований были получены уравнения для поля излучения, генерируемого областью тропосферы, охваченной случайными электрическими разрядами. Найдено выражение для спектра мощности этого излучения и развит метод его расчета. На Рис.20 приведен график зависимости спектра мощности излучения от частоты на расстоянии

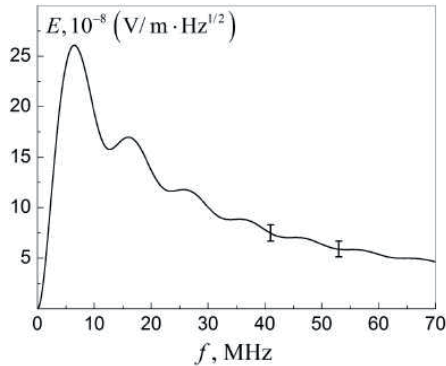


Рис.20. Спектр электромагнитного излучения случайных разрядов на расстоянии 300 километров от эпицентра сейсмической области (Sorokin et al., 2011a).

300 километров от эпицентра возмущенной области, рассчитанный этим методом. На графике вертикальными отрезками отложены измеренные амплитуды поля за горизонтом от эпицентра землетрясения (Ruzhin and Nomicos, 2007). Расчеты показали, что спектр электромагнитного излучения случайных разрядов охватывает интервал УКВ примерно от 10 до 100 МГц. Амплитуда поля на расстоянии 300 километров от эпицентра сейсмической области составляет примерно 6 мкВ/м. Величина максимума спектра зависит от частоты появления разрядов, а его форма определяется временем нарастания и спада волны тока в разряде. Область формирования случайных разрядов рассеивает радиоволны в УКВ диапазоне, так как каждый разряд представляет собой проводник с высокой электропроводностью (Sorokin et al., 2014). Развита теория рассеяния электромагнитного излучения на случайных разрядах в тропосфере над эпицентром готовящегося землетрясения. Проведен расчет интенсивности излучения за горизонтом относительно передатчика в том случае, когда эпицентр расположен в окрестности трассы распространения волны. Поле за горизонтом формируется в результате дифракции волны передатчика за горизонт и волны, рассеянной на

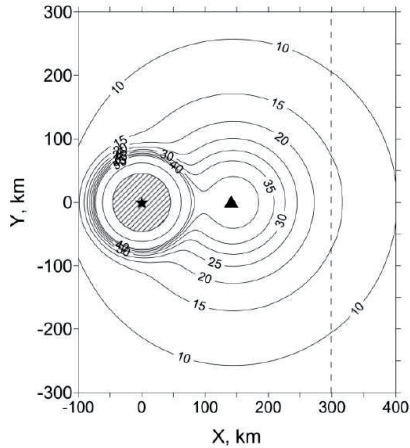


Рис.21. Результаты расчета пространственного распределения электрического поля сигнала УКВ передатчика, рассеянного на электрических разрядах в аксиально симметричной области тропосферы с радиусом 50 км.

разрядах в тропосфере. На Рис.21 приведены результаты расчета пространственного распределения интенсивности излучения за горизонтом относительно передатчика в случае возникновения случайных разрядов в тропосфере и в случае их отсутствия. Расчеты показали, что поле рассеянной разрядами волны УКВ передатчика за горизонтом значительно превышает поле волны дифракции. Например, поле рассеянной разрядами волны УКВ передатчика с частотой 100 МГц и мощностью порядка 10 – 100 кВт может достигать величины порядка 10 - 50 мкВ/м на расстоянии более 100 километров от возмущенной области.

Появление в тропосфере области формирования случайных разрядов приводит к ряду электромагнитных и оптических явлений (Sorokin et al., 2012). Рассмотрим некоторые из них. Электрические разряды в тропосфере формируют оптическое излучение в видимом диапазоне спектра. В результате достаточно большой частоты их появления можно ожидать усредненное стационарное свечение возмущенной области. Предварительные оценки показали, что интенсивность излучения области тропосферы, в которой возникают случайные разряды, может достигать $\sim 9 kR$. Для оценки светимости выбрана энергия кванта

$4 \cdot 10^{-19}$ Дж, излучаемого разрядной областью, которая соответствует середине спектра видимого света. Появление квазистатического электрического поля в достаточно тонком слое тропосферы приводит к ее нагреву. Предварительные оценки показали, что на высоте 10 километров плотность выделения тепловой энергии составляет $0.001-0.01 \text{ Вт/м}^3$. Если толщина возмущенной области составляет порядка 1 километра, то поверхностная плотность выделяемого тепла составляет $1-10 \text{ Вт/м}^2$. Такое выделение тепла приводит к нагреву этого слоя атмосферы на $1-3 \text{ К}$ в день. Появление разрядов приводит к росту концентрации озона и формированию уходящего вверх ИК излучения. Рассмотренные выше электромагнитные и оптические явления, сопровождающие появление электрических разрядов в тропосфере, могут наблюдаться на спутниках и служить источником информации о развитии сейсмических процессов. На Рис.22 приведена схема процессов, сопровождающих возникновение случайных электрических разрядов в слое тропосферы, в котором электрическое поле достигает пробойного значения.

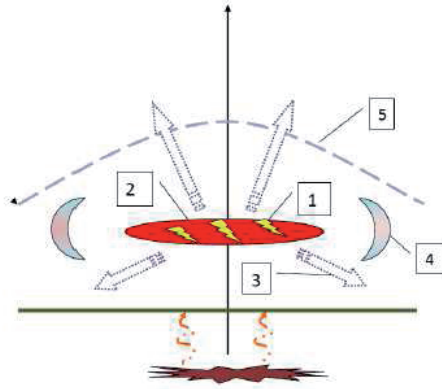


Рис.22. Явления, сопровождающие случайные электрические разряды в нижней атмосфере. 1. Случайные электрические разряды. 2. Нагрев атмосферы в области разрядов и генерация уходящего микроволнового излучения. 3. Широкополосное УКВ радиоизлучение, наблюдаемое на Земле и в космосе. 4. Свечение в видимой области спектра. 5. Рефракция и рассеяние УКВ радиоволн в тропосфере, приводящее к приему сигналов передатчиков за горизонтом на поверхности Земли и на спутнике.

Результаты рассмотренных выше теоретических исследований находят свое подтверждение в наблюдениях эффектов воздействия литосферных процессов на атмосферу и ионосферу. Основываясь на данных радиолокатора, Воинов и др. (1992) предположили появление в атмосфере распределенных электрических зарядов над будущим эпицентром за 1 – 3 дня до Спитакского землетрясения. Область распределения зарядов отличалась от ситуации во время гроз. Свечение неба на расстоянии 100 – 200 км от эпицентра накануне сильного землетрясения ($M=7.3$) в Китае наблюдалось ночью (Zhao and Qian, 1997). Далее, Williams (1989) отметил, что связанное с сейсмикой свечение неба может достигнуть высот более 1 – 2 км на расстоянии 140 км от эпицентра. Регулярные наблюдения за аномалиями в сигналах передатчиков УКВ диапазона накануне землетрясений проводились на острове Крит в течение трех лет, начиная с 1992 г (Nomicos et al., 1995; Vallianatos and Nomicos, 1998). Использовались приемники с двумя узкополосными фильтрами с частотами 41 и 53 МГц, которые располагались на четырех станциях. Были обнаружены аномальные излучения в УКВ диапазоне накануне землетрясений, эпицентры которых были расположены как на суше, так и под морским дном. Сигналы наблюдались на поверхности Земли за линией горизонта на расстоянии порядка 300 км от эпицентра. Их регистрация возможна только в случае, если источник излучения расположен в атмосфере выше земной поверхности. На основе полученных данных в работах (Ruzhin et al., 1999; Ruzhin and Nomicos, 2007) показано, что связанный с подготовкой землетрясений источник излучений в УКВ диапазоне располагался в нижней атмосфере на высотах от 1 до 10 километров над эпицентром будущего землетрясения. Данные наблюдения согласуются с результатами расчета. Электромагнитные предвестники землетрясений в УКВ диапазоне активно исследовались в работах (Hayakawa et al., 2006; Yonaiguchi et al., 2007a,b; Yasuda et al., 2009). Регулярная регистрация сигналов радиовещательных УКВ радиостанций показала, что в течение нескольких дней перед землетрясением наблюдается аномальное распространение радиосигнала за горизонт в том случае, если трасса его распространения проходит над сейсмиче-

ской областью (Fukumoto et al., 2001; Yasuda et al., 2009; Moriya et al., 2010). Можно полагать, что за горизонтом наблюдается рассеянная на разрядах УКВ радиоволна. Примерно в тех же интервалах времени перед землетрясениями наблюдается рост концентрации озона в атмосфере (Tertyshnikov, 1996). Достаточно надежно регистрируется на спутниках уходящее ИК излучение, связанное с подготовкой землетрясения (Tronin, 2002, 2006; Ouzounov et al., 2007), которое может возникать либо в результате излучения озона (Kratz and Cess, 1988), либо в результате нагрева слоя тропосферы, в котором поле достигает пробойного значения.

Формирование горизонтальных неоднородностей проводимости в нижней ионосфере, обусловленных возмущением тока в глобальной цепи в районе подготовки землетрясения, сопровождается усилением электромагнитного излучения в КНЧ диапазоне, регистрируемого на спутнике. Возможная связь электромагнитных эмиссий с приближающимися землетрясениями впервые была отмечена в работе (Gokhberg et al., 1982). Позднее было показано, что мелко-масштабные (4 - 10 км) неоднородности плотности плазмы с относительной амплитудой до 10-30 % и коррелированные с ними электромагнитные КНЧ (крайне низкочастотные)

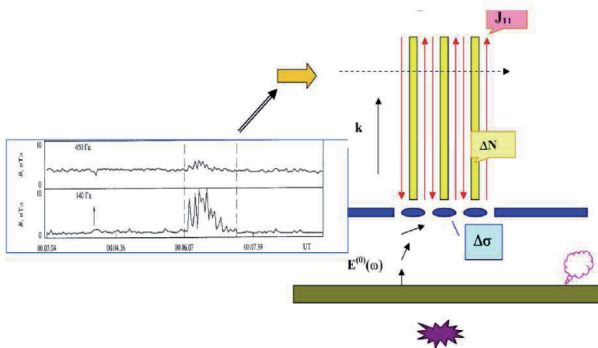


Рис.23. Схема излучения в ионосферу импульсных КНЧ шумов (Borisov et al., 1999).

излучения с амплитудами 3-10 пТ на частотах ~ 450 Гц и ~ 140 Гц соответственно (см. Рис.23) возбуждаются в магнитных силовых трубках толщиной 3-4 градуса по широте, связанных с эпицентром землетрясения, за несколько дней до начала землетрясения (Serebryakova et al., 1992; Chmyrev et al., 1997). Подобные УНЧ/КНЧ электрические поля и плазменные возмущения были зарегистрированы на спутнике ДЕМЕТЕР в связи с землетрясением в Чили с магнитудой $M > 6.0$ (Zhang et al., 2011). В работах (Blecki et al., 2010, 2011) наблюдались интенсивные КНЧ излучения в ионосфере за 1 - 6 дней до начала нескольких землетрясений большой магнитуды. Было показано, что эти излучения очень хорошо коррелировали во времени и пространстве с тепловыми аномалиями, наблюдавшимися со спутника NOAA 18 накануне сильного землетрясения 2008 г. в Сычуане. Некоторые механизмы генерации таких сигналов обсуждались в течение последних нескольких лет (см., например, работы: Липеровский и др., 1992; Molchanov et al., 1993). Рассмотренные в этих работах механизмы генерации в спектральном интервале порядка сотен Гц приводят к эффектам, значительно меньшим, чем наблюдаются на эксперименте.

В работе (Borisov et al., 1999) представлен новый механизм, связанный с излучением в верхней ионосфере волн свистовой моды, генерируемых в результате трансформации импульсных КНЧ шумов на мелкомасштабных неоднородностях проводимости в нижней ионосфере (см. Рис.23). Электромагнитные импульсы в КНЧ диапазоне возбуждаются грозowymi разрядами и распространяются в субионосферном волноводе со слабым поглощением. Низшая собственная мода субионосферного волновода (так называемая ТМ мода) имеет наименьшее поглощение на частотах ниже 1 кГц и, следовательно, может распространяться на большие расстояния. В результате высокой проводимости Земли вблизи поверхности электрическое поле этой моды направлено вертикально. С увеличением высоты появляется горизонтальная компонента электрического поля. Ее величина приближается к амплитуде вертикальной компоненты в спектральном интервале 100 - 1000 Гц на высотах 115 - 120 км, на которых проводимость ионосферы максимальна. Горизонтальная компонента

электрического поля возбуждает поляризационные токи на неоднородностях проводимости, зависящие от частоты волны. Эти токи действуют, как источники КНЧ волн, распространяющихся в свистовой моде в верхнюю ионосферу и магнитосферу вдоль магнитных силовых линий. На Рис.23 приведена схема излучения волн в верхнюю ионосферу. В работе (Borisov et al., 1999) найдена спектральная интенсивность электрического и магнитного полей КНЧ излучения в верхней ионосфере.

Согласно данным, приведенным в ряде работ (Fraser-Smith et al., 1990; Hayakawa et al., 1996; Korytenko et al., 1993), в зоне вблизи эпицентра готовящегося землетрясения может наблюдаться возрастание электромагнитных осцилляций шумового характера в УНЧ диапазоне ($f=0.01-10$ Гц). В работах (Molchanov, 1999; Surkov and Pilipenko, 1999; Sorokin and Pokhotelov, 2010) рассмотрено формирование литосферными источниками УНЧ излучения на поверхности Земли и возможность его проникновения в ионосферу (Molchanov et al., 1995). Многочисленные исследования были посвящены выявлению механизмов атмосферно - ионосферного взаимодействия. Например, в работах (Fitterman, 1979; Molchanov et al., 1995; Pilipenko et al., 1999; Sorokin and Pokhotelov, 2010) рассматривались физические процессы формирования токов в литосфере и распространение их излучения в ионосферу. В работах (Sorokin et al., 2003; Сорокин и др., 2001б) предложен механизм генерации УНЧ осцилляций, возникающих в результате возмущения электрического тока в глобальной цепи. Этот механизм основан на генерации гиротропных волн (ГВ) в нижней ионосфере шумовым электромагнитным полем в присутствии горизонтальных неоднородностей проводимости, связанных с неустойчивостью АГВ в результате роста электрического поля. Эти волны, обнаруженные в работе (Сорокин и Федорович, 1982а), распространяются в тонком слое нижней ионосферы вдоль поверхности Земли в низких и средних широтах со слабым затуханием и фазовыми скоростями в десятки – сотни км/с. Некоторые геофизические эффекты, связанные с генерацией и распространением ГВ в горизонтально однородной ионосфере рассмотрены в работах (Сорокин, 1988; Сорокин и Яценко, 1988).

Развитие теории этих волн в среднеширотной ионосфере проведено в работе (Sorokin and Pokhotelov, 2005). На Рис.24

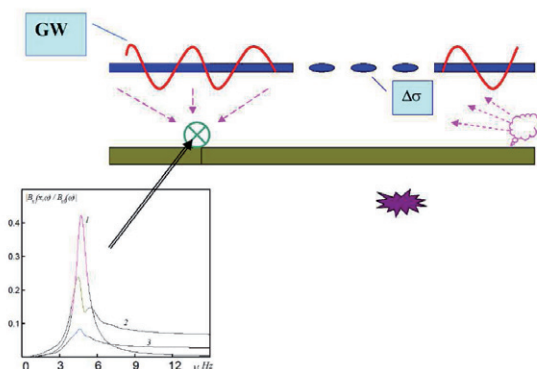


Рис.24. Схема генерации УНЧ колебаний геомагнитного поля (Sorokin et al., 2003).

показана схема генерации УНЧ колебаний магнитного поля, связанных с распространением ГВ в проводящем слое ионосферы. Различные источники электромагнитного излучения генерируют электромагнитный шум в диапазоне УНЧ и геомагнитных пульсаций. Под действием этого шума в областях горизонтальных неоднородностей ионосферной проводимости возникают поляризационные токи, которые являются источниками ГВ. Появление таких источников с горизонтальным пространственным масштабом порядка 10 км приводит к формированию узкополосного электромагнитного излучения на поверхности Земли с характерной частотой в интервале 1 – 10 Гц. Результаты расчета спектра геомагнитного возмущения на различных расстояниях от эпицентра приведены на Рис.24. Из него следует, что относительное возмущение максимально в УНЧ диапазоне, а его величина в эпицентре достигает 20 - 40 % от невозмущенного значения. При удалении от эпицентра амплитуда возмущения в максимуме убывает, что связано с эффектом затухания ГВ. С ростом горизонтального масштаба частота максимума спектра возмущения монотонно убывает.

В работе (Sorokin and Hayakawa, 2008) рассмотрен механизм формирования линейчатого спектра геомагнитных пульсаций в результате взаимодействия

фонового электромагнитного шума с периодическими неоднородностями ионосферной проводимости. Возникающие в результате такого взаимодействия токи являются когерентными источниками ГВ, распространяющихся в проводящем слое ионосферы конечной толщины. Дисперсионные характеристики этих волн рассмотрены в работе (Sorokin et al., 2009). Развита теория генерации таких волн и создан метод расчета их спектра. На Рис.25 приведены результаты расчета

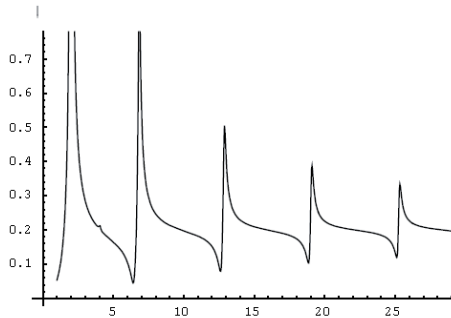


Рис.25. Пример расчета частотного спектра (в относительных единицах) электромагнитных колебаний в УНЧ диапазоне (Sorokin and Hayakawa, 2008). По горизонтальной оси отложена частота в Герцах.

спектра геомагнитных колебаний, связанных с распространением этих волн в УНЧ диапазоне (Sorokin and Hayakawa, 2008). Спектр колебаний представляет собой узкополосные линии в интервале частот от 1 Гц до 30 Гц. Характеристики линейчатого спектра электромагнитных возмущений определяются как параметрами ионосферных неоднородностей, так и электрофизическими характеристиками ионосферы. В основном, амплитуда колебаний определяется амплитудой ионосферных неоднородностей, их пространственной структурой и поглощением волны. Частоты максимумов спектральных линий определяются толщиной слоя проводимости ионосферы и широтой. С уменьшением широты фазовая скорость ГВ возрастает, что приводит к росту частот максимумов. Ширина спектральных линий определяется шириной пространственного спектра

ионосферных неоднородностей и соотношением между проводимостью Педерсена и Холла ионосферы.

Рассмотренные механизмы генерации электромагнитных эмиссий подтверждаются экспериментальными данными. Результаты КНЧ/ОНЧ измерений на борту КОСМОС - 1809 в районе Спитака показали (Chmyrev et al., 1997), что интенсивные КНЧ излучения генерировались в зоне $\leq 6^{\circ}$ по долготе и 2° - 4° по широте относительно эпицентра землетрясения. Результаты измерений приведены на рис.20. В этой же зоне наблюдались мелкомасштабные (4-10 км вдоль орбиты) неоднородности плотности плазмы с относительной амплитудой $\Delta N/N = 3 - 8 \%$. В работе (Rauscher and Van Bise, 1999) приведены результаты длительных измерений электромагнитных колебаний в УНЧ/КНЧ диапазоне, проводимых на сети электромагнитных обсерваторий в США. Зарегистрированы линейчатые узкополосные спектры электромагнитных колебаний во время подготовки землетрясений и извержений вулканов. Значения частот максимумов спектральных линий измеренных в работе (Rauscher and Van Bise, 1999) и рассчитанных в работе (Sorokin and Hayakawa, 2008) близки по величине.

8. Деформации земной поверхности

В последнее время широкое применение получили методы наблюдения за деформациями поверхности при землетрясениях. Деформации имеют место на всех этапах сейсмического цикла, часто видны невооружённым глазом и легко фиксируются как наземными, так и дистанционными методами. Применяются следующие спутниковые методы изучения сейсмических деформаций: структурные (оптические и радиолокационные), радарная интерферометрия, методы определения смещений с помощью систем глобального позиционирования и гравитационные измерения. Структурные методы основываются на прямой интерпретации разрывных нарушений на данных дистанционного зондирования как оптического, так и радиоволнового диапазонов. Эти методы начали применяться раньше других для изучения землетрясений (Трифонов и

др., 1988). В настоящее время их используют для быстрой оценки территорий, пострадавших от землетрясений.

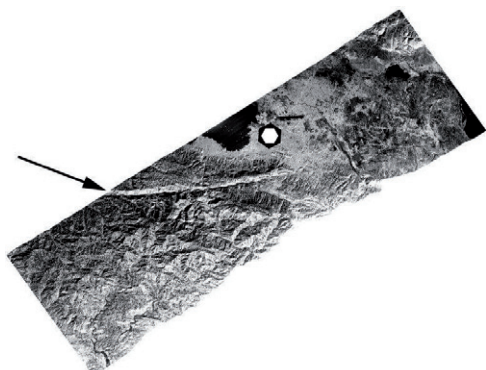


Рис.26. Радиолокационная съёмка сейсмоактивного разлома Enriquillo-Plantain, вызвавшего землетрясение на Гаити 12 января 2010, $M = 7.0$ (<http://uavsar.jpl.nasa.gov/>). Стрелка показывает разлом, многоугольник – г. Порт-о-Пренс.

На Рис.26 показаны результаты радиолокационной съёмки сейсмоактивного разлома, вызвавшего разрушительное землетрясение на Гаити 12 января 2010, $M=7.0$. Съёмка была выполнена аппаратурой UAVSAR – радаром с синтезированной апертурой L-диапазона, предназначенной для беспилотных носителей.

Радарная интерферометрия основана на измерении амплитуды и фазы радиолокационного сигнала, отражённого от земной поверхности. Съёмка проводится с двух и более параллельных орбит, что позволяет с высокой точностью восстановить рельеф поверхности. Проведя такие же измерения, например через год, можно получить тонкие изменения рельефа поверхности, то есть его деформации. Современные системы способны фиксировать смещения с точностью до нескольких миллиметров на дальности в сотни километров. Впервые эти исследования были выполнены для землетрясения Ландерс в Калифорнии (28 июня 1992, $M=7.3$), для российских землетрясений были построены карты деформаций Нефтегорского землетрясения на Сахалине (28 мая 1985 г., $M=7.6$) (Tobita et al., 1998) и Алтайского землетрясений (27 сентября 2003, $M=7.3$) (Nissen et al., 2007). В качестве примера (Рис. 27) одного из последних применений технологии спутниковой интерферометрии можно привести

В настоящее время стоят задачи измерения деформаций до события и прогноза землетрясений. Решение этих задач пока неоднозначно: по одним сведениям перед землетрясениями не фиксировалось заметных деформаций поверхности, по другим – такие изменения существуют и спутниковая радиолокационная интерферометрия их фиксирует. Так, например, в Японии,

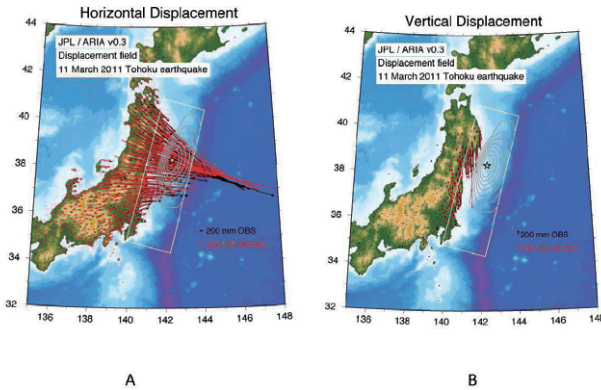


Рис. 28. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) косейсмические деформации, определённые методами глобального позиционирования при землетрясении Тохоку, Япония 11 марта 2011, $M=9.0$. (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/japan/031111_M9.0prelim_geodetic_slip.php)

в районе Токай, на контакте трёх литосферных плит уже 20 лет наблюдается опускание одного из густонаселённых участков со скоростью более 5 мм/год. Здесь ожидается разрушительное землетрясение с магнитудой более 8. Последнее землетрясение произошло здесь в 1854 г., его магнитуда составила 8.4. Периодичность землетрясений в этом районе составляет 100-150 лет, поэтому любые исследования по прогнозу землетрясений здесь весьма актуальны. Параллельно развивается другая спутниковая технология измерения смещений – система глобального позиционирования GPS. Сети высокоточных GPS приёмников покрывают крупные сейсмоактивные регионы и целые страны. В той же Японии национальная сеть насчитывает в настоящее время более 1200 станций, расположенных на расстоянии 20-50 км и проводящих измерения каждые 30 секунд (<http://mekira.gsi.go.jp/ENGLISH/index.html>). Такая густая сеть позво-

ляет следить за деформациями земной поверхности крупных регионов в режиме реального времени и проверять данные спутниковой интерферометрии. В настоящее время в Институте Физики Земли РАН совместно с Научным центром аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос» созданы новые технологии по прогнозу сейсмичности на интервале времени порядка недели-месяца с использованием спутниковых данных GPS, космических снимков и разломной тектоники на основе построенных геомеханических моделей (Бондур и др., 2010). В течение трех лет технологии успешно проверяются на территории Южной Калифорнии, где имеется наиболее плотная сеть станций GPS и наилучший в мире каталог текущей сейсмичности при хорошо известной разломной тектонике. Создана трехмерная модель литосферы Южной Калифорнии, включающая в себя горный рельеф и основные структурные границы. В модели на основе обработки космических снимков учтено распределение разломов, как зон распределения поврежденности. Нагружение земной коры Южной Калифорнии происходит под действием сил собственного веса и в результате горизонтального движения плит. Модель позволяет вычислять изменения напряженного состояния земной коры, связанные с развитием сейсмического процесса. Входными данными в модель является текущая сейсмичность, когда каждое землетрясение рассматривается, как новый дефект земной коры, приводящий к перераспределению деформаций, плотности упругой энергии и пределов прочности земной коры. Рассчитываемое каждые две недели трехмерное распределение нового параметра – близости участков земной коры к пределу прочности, указывают практически на места, где будут происходить землетрясения с удовлетворительной сходимостью на данном интервале времени. На примере крупнейшего за последнее время землетрясения в Южной Калифорнии «Гектор Майн» с $M \sim 7,5$ продемонстрированы возможности новой технологии при непосредственном введении в модель спутниковых данных сети GPS по вариациям смещения земной поверхности, которые являются реальным отражением текущей сейсмичности. Таким образом, комплексное моделирование влияния сейсмического процесса на изменения характеристик напряженно-

деформированного состояния (инвариантов тензоров напряжений и деформаций, параметра близости к пределу прочности земной коры) позволяет прогнозировать развитие сейсмичности на ближайшие две недели. Реализованная методика дает возможность вести наблюдения за напряжениями и деформациями земной коры по данным сети GPS. Подобная методика может быть реализована для любой сейсмически опасной территории.

Деформации и смещения приводят к изменению рельефа, и, как следствие, к изменению массы горных пород, а это создаёт основу для применения спутниковой гравиметрии. После разрушительного Суматранского землетрясения в Индонезии 26 декабря 2004 года, (магнитуда 9.0), вызвавшего чудовищное цунами, впервые по спутниковым данным были зафиксированы изменения гравитационного поля Земли (Рис.29) в эпицентральной области

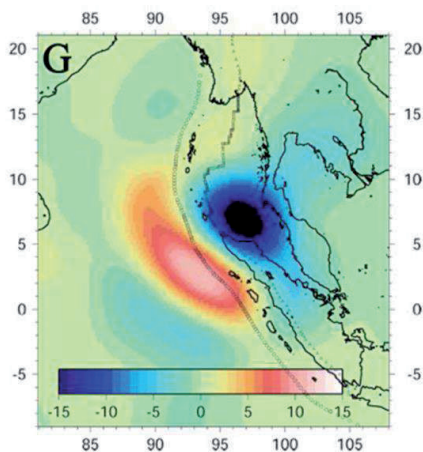


Рис.29. Косейсмические изменения гравитационного поля Земли по данным спутника GRACE при Суматранском землетрясении, Индонезия, 26 декабря 2004 года, $M=9.0$. (Han et al., 2006).

(Han et al., 2006). По всей видимости, они были вызваны огромным смещением литосферных плит. Вертикальное поднятие с амплитудой в несколько метров охватило площадь около 30 квадратных километров и вызвало цунами, тогда как горизонтальное смещение сегмента плиты составило до 10 метров на участке 1200×150 квадратных километров. После разрушительного землетрясения в

Японии 11 марта 2011 года, (магнитуда 9.0), вызвавшего сильное цунами, были зафиксированы изменения гравитационного поля Земли на площади в сотни тысяч квадратных километров (Wang et al., 2012). По всей видимости, они были вызваны смещением литосферных плит, как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

9. Тепловые эффекты

Современные спутниковые системы в тепловом ИК диапазоне позволяют проводить мониторинг земной поверхности с разрешением на местности 1–5 км и чувствительностью 0.12–0.5 °С. Периодичность съёмки составляет от 30 мин для геостационарных космических аппаратов до 12 часов для спутников с полярными орбитами. Системы природоресурсных спутников, таких как POES (NOAA; AVHRR) и EOS (Terra, Aqua; MODIS) обеспечивают съёмку любого участка Земли с интервалом не хуже, чем 6 часов. Имеются общедоступные архивы ежедневных данных за последние 15-20 лет. Многочисленные тепловые эффекты, наблюдавшиеся в сейсмическом процессе, стимулировали развитие геотермальных методов изучения землетрясений. Было предложено использовать космическую тепловую съёмку для исследования землетрясений, как дистанционный вариант геотермии. Планомерные исследования начались в 1986 г. во ВНИИ Космоаэрогеологических методов Мингео СССР по инициативе и в тесном сотрудничестве с Институтом физики Земли РАН (Е.А.Любимова, А.О.Глико).

Исторически изучение тепловых аномалий в связи с землетрясениями началось со Средней Азии (Горый и др., 1988, Tronin, 1996). Затем, подобные исследования были проведены в Китае (Quang, 1991; 2001; Ma and Wu, 2012), Японии (Tronin et al., 2002, Zoran, 2012), Индии (Saraf, 2003, Singh, 2003, Blackett et al., 2011), Италии (Tramutoli et al., 2001, Piroddi and Ranieri, 2011), Испании и Турции (Regular update..., 2000), США (Ouzounov and Freund, 2003) и других странах. Спутниковые наблюдения показали существенные изменения

температуры земной поверхности и приземных слоёв атмосферы в связи с сейсмической активностью. Тепловые аномалии были зафиксированы на земной и водной поверхностях, а также в атмосфере. На заре исследования тепловых аномалий были доступны только тепловые снимки в виде фотоотпечатков (Горный и др., 1988, Tronin, 1996). На отпечатках можно было различить 8-10 градаций температур на земной поверхности, а разрешение на местности было не лучше 8 км. При таких исходных данных можно было рассчитывать обнаружить только наиболее крупные тепловые аномалии в самых благоприятных условиях. Один из примеров применения материалов космической тепловой съёмки демонстрирует измерение температуры в зонах разломов по данным спутника AQUA системы EOS. Землетрясение произошло в Забалхашье, Казахстан, его магнитуда была $M=5.1$ (02.09.2007, 44.58 с.ш., 78.34 в.д., $h=25$ км). Для обработки данных были использованы материалы высокого уровня обработки, которые уже имели геометрическую, радиометрическую и атмосферную коррекции. Это позволило получить корректные оценки изменения температуры тепловых аномалий в связи с землетрясением. На Рис.30 показано

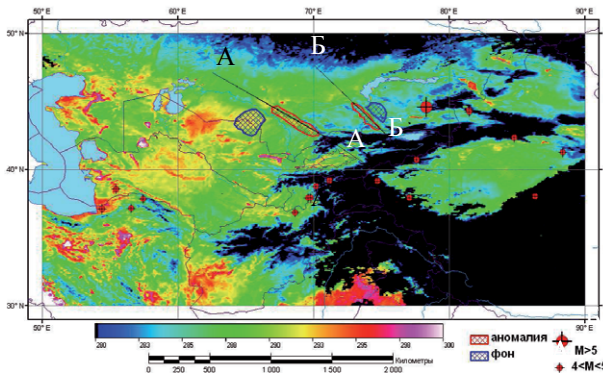


Рис.30. Космический тепловой снимок Средней Азии 13.08.2007, фоновое состояние. Красной штриховкой показаны тепловые аномалии в зонах разломов. Синей штриховкой – фоновые участки. Разломы: А-А – Талассо-Ферганский Б-Б – Джалаир-Найманский (Tronin, 2010).

распределение температур земной поверхности за три недели до толчка. По участкам тепловых аномалий в зонах Талассо-Ферганского и Джалаир-

Найманского разломов был выполнен анализ температур земной поверхности. Вычислялась средняя температура тепловой аномалии, средняя температура и стандартное отклонение фоновых участков (Рис.30), а затем определялась разница температур аномалии и фона. Анализ данных показывает, что оба параметра, температура тепловой аномалии и её горизонтальное распределение, важны при исследовании тепловых эффектов землетрясений. При этом температуру тепловой аномалии можно разделить на две части: так называемую «стационарную» составляющую – аномалию в зоне разлома, и «нестационарную» составляющую, выходящую за границы разлома. При этом понятие площади относится, собственно, к «нестационарной» составляющей. Для таких разломов, как Талассо-Ферганский и Джалаир-Найманский, характерно наличие как «стационарной», так и «нестационарной» составляющих, тогда, как для разломов другого типа, например, Предкопетдагского, установлено наличие только «стационарной» составляющей. По-видимому, отличия объясняются различной тектонической позицией разломов. В результате исследований в Средней Азии было показано, что нестационарные аномалии развиваются в наиболее ослабленных участках - узлах пересечения нескольких разломов. Длительность развития аномалий составляет 2-3 недели до события и 1-2 дня после него. Наблюдается цикличность в развитии аномалий с периодом 7-9 дней. Интенсивность аномалий составляет 3-4 градуса над фоном. Размер аномалий в общем случае зависит от магнитуды события и достигает 10^5 км².

Большой интерес для наземных измерений представляет Камчатка, которая отличается высокой сейсмичностью, вулканической активностью, наличием геотермических полей, гейзеров, горным рельефом и сложными погодными условиями для наблюдений. Наземный пункт наблюдений располагается в Карымшино, недалеко от Петропавловска-Камчатского (52.94 с.ш., 158.25 в.д.). В Карымшино расположена комплексная лаборатория для наблюдений за гидрогеологическими, электромагнитными, акустическими и другими явлениями (Тропин и др., 2004). Гидрогеологические наблюдения проводятся в трёх скважинах и на одном горячем источнике. Для совместного анализа спутниковых и

наземных данных выбиралась одна из скважин или источник. В результате исследований была выявлена реакция тепловых аномалий на три землетрясения из четырёх. Развитие тепловых аномалий началось 15 июня 1996. За пять дней до толчка, 17 июня 1996, появились крупные тепловые аномалии на восточном берегу Камчатки и в центре полуострова, в бассейне р. Камчатки. Непосредственно перед толчком температура аномалии несколько снизилась. Немедленно сразу после толчка 22 июня 1996 аномалия большой площади и интенсивности появилась в бассейне р. Камчатки, который известен, как крупный артезианский бассейн с многочисленными горячими источниками, расположенными на "термальных линиях" (Макаренко, 1963). Температура воды в источнике начала подниматься 8 июня 1996, а с 17 июня зафиксирован наиболее значительный рост. Максимум значения температура воды достигла 20 июня 1996, за день до толчка, когда аномалия составила 0.8 °С. Дебит источника незначительно вырос с 12 по 18 июня 1996, а сразу после толчка вырос в 2 раза. В результате исследований тепловых аномалий на Камчатке можно сделать следующие выводы:

- 1) аномалии появляются за 4-7 дней до землетрясения и продолжаются несколько дней после него (пост-сейсмический эффект для землетрясений Средней Азии и Китая составляет одну-две недели);
- 2) тепловые аномалии реагируют на коровые землетрясения с магнитудой более 6 и на расстоянии до 500 км;
- 3) размер аномалии составляет 180 км в длину и 75 км в ширину;
- 4) амплитуда аномалии составляет от 2 до 10 °С;
- 5) тепловая аномалия и гидрогеологические параметры скважин сходным образом реагируют на землетрясения;
- 6) можно рекомендовать проведение прогностических гидрогеологических исследований в бассейне реки Камчатки.

Разрушительное землетрясение с магнитудой $M=6.6$ в г. Бам (Иран) произошло 26 декабря 2003. Регион отличают выгодные условия для проведения тепловой съёмки, поэтому были исследованы изменения температуры земной

поверхности, как на ночных, так и на дневных снимках (Saraf et al., 2008). Анализ дневных тепловых снимков показал наличие интенсивных (7–10 °C) аномалий 23 и 24 декабря к северо-востоку от эпицентра. Этот один из редких случаев применения дневных тепловых снимков - для изучения землетрясений, как правило, используются ночные снимки. Изучение тепловых аномалий проводилось в различных регионах земного шара. Выбор регионов ограничивался доступностью спутниковых данных. Не для всех регионов доступны данные высокого разрешения. Космические тепловые снимки для Забайкалья доступны только за последние 10 лет. Наиболее многочисленные исследования тепловых аномалий, сопровождающих землетрясения, были выполнены в Китае (Quang et al., 1991, Tronin, 2000, Wu and Liu, 2009, Wei et al., 2009) и Японии (Tronin et al., 2002). Получены данные об изменении температуры поверхности при следующих землетрясениях: Колима, Мексика $M = 7.8$, 21 января 2003 (Ouzounov et al., 2006); Бхудж (Гуджарат), Индия, $M = 7.7$, 26 января 2001 (Saraf and Choudhury, 2005); в Кашмире, $M=7.6$, 8 октября 2005 (Panda et al., 2007) и многих других.

В последнее время выполнены исследования по измерению влажности почвы по космическим данным после Гуджаратского землетрясения в Индии 26 января 2001 (Pinty et al., 2003). Были использованы данные радиометра MISR, установленного на борту спутника Terra. Dey and Singh (2003) опубликовали работу об изменении испарения с поверхности, связанного с тем же землетрясением. Тепловой поток, затраченный на испарение с поверхности, регистрировался с помощью космической тепловой съёмки и наземных данных.

Кроме Среднеазиатского и Камчатского сейсмоопасных регионов были предприняты попытки исследовать тепловые аномалии на Кавказе. Кавказский регион отличается высокой сейсмичностью, сложным рельефом и погодными условиями. Устойчивые тепловые аномалии обнаружить на Кавказе в 80-е годы не удалось. Погодные условия и низкое пространственное разрешение не позволили наблюдать тепловые аномалии, связанные со Спитакским землетрясением. В Дагестане ранее проводились исследования по связи теплового

поля поверхности с землетрясениями (Дагестанское, 1980). В настоящее время в этом регионе развернулись работы по анализу тепловых снимков для изучения сейсмичности (Ponomareva et al., 2002, Булаева и др., 2004).

Для территории США и Мексики был проведён ряд исследований по обнаружению тепловых аномалий, связанных с землетрясениями (Pulinets et al., 2006; Ouzounov et al., 2007). Новые материалы по тепловым аномалиям, сопровождающим землетрясения, были получены на примере землетрясения Гектор Майн в Калифорнии (16 Октября 1999, $M=7.1$, $h=5$ км). Анализ данных ночной съёмки со спутника Landsat показал наличие тепловой аномалии в зоне разлома за 1 день до толчка (рис.31). Новизна в данном случае заключается в использовании нового средства для

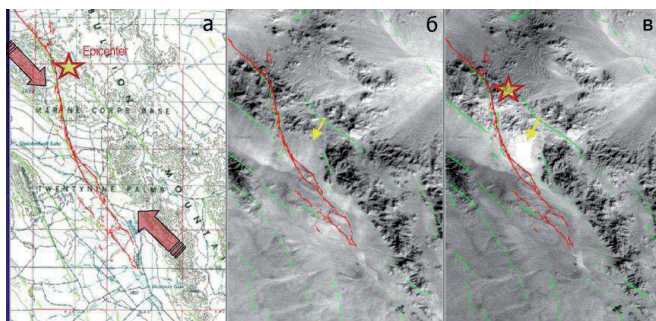


Рис.31. Тепловая аномалия при землетрясении Гектор Майн в Калифорнии (16 октября 1999, $M=7.1$, $h=5$ км), а – тектоническая схема, б – тепловой снимок от 20 октября 1999 г., в – тепловой снимок от 15 октября 1999 г. Стрелки указывают на Тепловую аномалию, звёздочка – на эпицентр землетрясения (Ouzounov et al., 2007).

регистрации тепловых аномалий – радиометра ЕТМ, имеющего разрешение на местности 90 м, в отличие от 1 км у систем NOAA и EOS. Таким образом, открывается возможность перехода на новый уровень детальности изучения тепловых аномалий. Наличие тепловых аномалий на земной поверхности, связанных с землетрясениями, продемонстрировано на большом количестве примеров в различных географических, геологических и сейсмических условиях в Средней Азии, Китае, Индии, Японии, Камчатке, Турции, Италии, Испании и других странах и регионах.

Поверхность моря представляет собой более сложный объект для наблюдений тепловых аномалий, связанных с сейсмической активностью. Температура водной поверхности сильно зависит от метеорологических условий, в первую очередь, от скорости ветра и от морских течений. Из-за высокой тепловой инерции воды процессы нагревания и охлаждения идут гораздо медленнее, чем на суше. Значительную роль, в отличие от суши, играет массоперенос. Один из примеров изменения температуры поверхности моря в связи с сейсмической активностью приведён для землетрясения Бумердес в Алжире 21 мая 2003, $M=6.8$ (Ouzounov et al., 2006). Был выполнен статистический анализ изменений температуры поверхности моря для периода 90 дней. Уменьшение температуры поверхности воды на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в районе эпицентра было зафиксировано за день до толчка, 20 мая. За весь период наблюдений не наблюдалось аналогичных резких колебаний температуры в этом районе. Другие примеры изменения температуры морской поверхности при землетрясениях приведены в работе Ouzounov and Freund (2004). Кроме изменений температуры водной поверхности было обнаружено изменение цвета морской воды при землетрясении Бхудж (Гуджарат), Индия, $M = 7.7$, 26 января 2001 с использованием данных индийского спутника IRS (Singh et al., 2002). Многочисленные исследования изменений характеристик водной поверхности были проведены после разрушительного Суматранского землетрясения 26 декабря 2004 г., $M=9.0$: от измерений теплового потока, затраченного на испарение с водной поверхности, до вариаций хлорофилла в воде (Saraf et al., 2006, Singh et al., 2007).

По результатам спутниковых измерений озона с сейсмоопасных зонах отмечены незначительные снижения концентрации этого газа в эпицентральной зоне (Tronin, 2002). Эти данные подтверждаются результатами наземных озонметрических наблюдений (Тертышников, 1994, 1995). Изменения концентраций озона были отмечены для двух сильнейших событий: Спитакского (7.12.1988) и Рачинского (29.04.1991) землетрясений. Концентрация стратосферного озона над эпицентрами Спитакского и Рачинского землетрясений показана на Рис.32. Отмечено, что к моментам землетрясений приурочены мини-

мумы концентраций озона. Анализ пространственной структуры концентраций озона был выполнен для двух событий: Спитакского землетрясения 07.12.88 и Гуджаратского землетрясения в Индии 26.01.01.

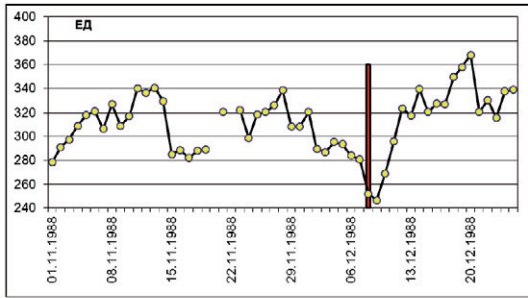


Рис.32. Общее содержание озона в столбе атмосферы при Спитакском землетрясении (7.12.1988, 40.99N, 44.19E, h=5, M=7.0). ЕД – единицы Добсона, 1 ЕД=0.01 мм слоя озона при 760 мм рт. ст. и температуре 0°C (Tronin, 2002).

Отмечено образование полярных структур (минимум-максимум) в день землетрясения. При этом эпицентр находился на оси между минимумом и максимумом. Линейные размеры аномалии составляют первые сотни километров.

В последнее время выполнены исследования по измерению влажности почвы по космическим данным после Гуджаратского землетрясения в Индии 26 января 2001 (Pintu и др., 2003). Были использованы данные радиометра MISR, установленного на борту спутника Terra. Dey and Singh (2003) опубликовали работу об изменении испарения с поверхности, связанное с тем же землетрясением. Тепловой поток, затраченный на испарение с поверхности, регистрировался с помощью космической тепловой съёмки и наземных данных. Dey et al., (2004) сделали сообщение об изменении содержания водяного пара в столбе атмосферы также после Гуджаратского землетрясения. Содержание пара измерялось по данным микроволнового радиометра SSM/I на борту спутника Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Okada et al., (2004) отметили также изменение концентраций аэрозоля над океаном после Гуджаратского

землетрясения по данным спутника SeaWiFS. Singh et al., (2002) исследовали изменения цвета океана и поверхности суши в районе того же Гуджаратского землетрясения на базе данных индийского спутника IRS.

Так как температура приземного слоя воздуха тесно связана с температурой подстилающей поверхности, был выполнен анализ температуры воздуха для тех землетрясений, для которых изучались тепловые космические снимки. На примере землетрясения Кобэ, 17 января 1995 (по местному времени), $M=6.9$ была проведена наземная проверка данных спутниковой тепловой съемки по метеорологическим данным. Анализ метеорологических данных показал наличие аномалии температуры воздуха. Как и на тепловых снимках 9 января, за 7 дней до толчка, отмечена аномалия максимальных температур воздуха в Кобэ. После землетрясения – 22 января также отмечается максимум температур воздуха. Минимальные температуры воздуха имеют значительно сглаженный максимум до толчка и весьма контрастный после него. Другие метеорологические параметры (давление, влажность, скорость ветра, видимость) были в пределах нормы. Высокие температуры воздуха не были компенсированы соответствующим падением давления, что привело к уменьшению плотности воздуха.

Длинный ряд наблюдений относительных значений дебита воды и температуры воздуха на Камчатке в связи с землетрясением 21 июня 1996 показан на Рис.33. Следует отметить синхронное изменение температуры воздуха и дебита источника. При этом приблизительно за 40 дней до толчка увеличился дебит источника s_1 , а за 20 дней – резко возросла температура воздуха у скважины w_2 . Аномалии приземной температуры и влажности воздуха, а также теплового потока, затраченного на испарение с поверхности отмечены при землетрясении Сычуань, Китай, 2008 (Ma and Wu, 2012), Гаити, 2010, (Singh et al., 2010), Тохоку, Япония, 2011 (Ouzounov et al., 2011).

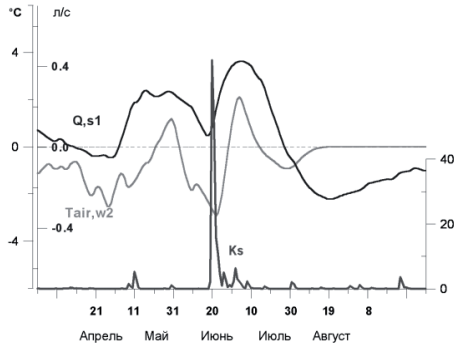


Рис.33. Изменение температуры воздуха у скважины №2 ($T_{air}, w2$) и дебита источника ($Q, s1$) при землетрясении 21 июня 1996. Внизу показан индекс сейсмической активности K_s (Molchanov et al., 2003), его пик соответствует событию 21 июня 1996 г.

Космическая тепловая съёмка в инфракрасном диапазоне имеет существенный недостаток – облачность является для неё препятствием. Морозовой (1996, 1997) были выполнены работы по исследованию необычных облаков, сопровождающих землетрясения. Люшвин (2009) исследовал спектральные свойства необычных облаков, сопровождающих землетрясения. Дода и др., (2009) опубликовали работу по использованию данных дистанционного зондирования для изучения облачных предвестников землетрясений. Исследование облаков, как предвестников землетрясений, получило широкое распространение в Китае (Gur and Xie, 2007; Guo and Wang, 2008). В настоящее время в интернете отмечается высокая активность появления ресурсов, использующих облака для прогноза землетрясений

(<http://www.earthquakesignals.com/zhonghao296/index.html>,

http://www.terraresearch.net/articles/earthquakeclouds_article1_file.html).

Автоматизированный анализ основан на измерении всё того же инфракрасного теплового излучения от Земли, но в отличие от вышеупомянутой космической тепловой съёмки, в данном варианте измеряется радиация от всех объектов – а основной объект на Земле при взгляде на неё из космоса – это облака (Ouzounov et al., 2007). Было предложено использовать уходящее длинноволновое излучение Земли (OLR) для изучения и прогноза землетрясений. Под

уходящим длинноволновым излучением Земли в настоящее время понимают радиацию Земли, измеренную в диапазоне 8-12 мкм и отнесённую к верхней границе атмосферы. Вклад излучения земной поверхности в OLR составляет менее 10%, остальное – излучение атмосферы: газов и облаков (жидкость - капли и твёрдые тела - лёд). По сути дела, поток OLR определяется наличием и характером облачности

(<http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/olr.php>). Измерение OLR проводится стандартной аппаратурой дистанционного зондирования в ИК тепловом диапазоне сканером AVHRR системы POES, либо специализированным прибором CERES системы EOS. Данные находятся на сайтах:

http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.interp_OLR.html

http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.uninterp_OLR.html

и представляют собой ежесуточные данные по всей поверхности Земли с пространственным разрешением 2.5 градуса. Методика выделения аномалий заимствована у Tramutoli (1998, 2001) и основана на анализе разности текущего значения OLR и среднего многолетнего для

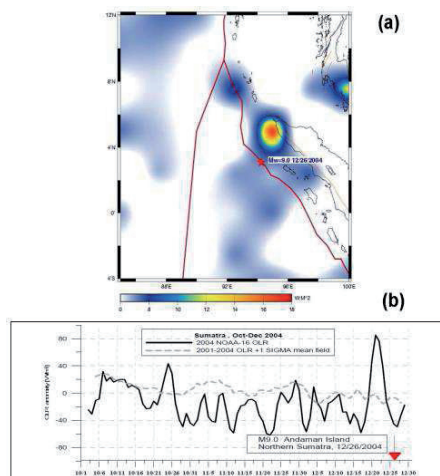


Рис.34. Аномалия уходящего длинноволнового излучения (OLR) для землетрясения на Суматре, Индонезия ($M = 9.0$, 26 декабря 2004). (а) Карта вариаций OLR на ноябрь 2004 г., за месяц до толчка. (б) Изменение OLR с 1 октября 2004 по 31 декабря 2004 в эпицентральной зоне (Ouzounov et al., 2007).

данной точки значения, нормированного на стандартное отклонение. Аномалии уходящего длинноволнового излучения Земли были обнаружены для множества крупных землетрясений. Одним из первых примеров применения OLR стало землетрясение на Суматре (Рис.34). Другой пример показывает синхронные измерения OLR и концентрации электронов в ионосфере по данным спутника DEMETER (Рис.35). Практически для всех сильных землетрясений последнего времени была выполнена подобная комплексная обработка. Наиболее полные данные были представлены для землетрясения Тохоку в Японии, 2011 г. Обнаружено, что за 2-7 дней в эпицентральной области наблюдалась положительная аномалия уходящего инфракрасного излучения Земли, площадь аномалии достигала тысяч квадратных километров.

Уже давно высказывались различные гипотезы о механизмах лито-атмосферных процессов при землетрясениях. Важнейшей частью всех гипотез является увеличение температуры поверхности. Для объяснения природы тепловых аномалий были предложены несколько механизмов (Горный и др. 1988, Tronin, 1996), связанных с высоким конвективным потоком, парниковым эффектом, увеличением влажности почвы, выделением радона и электрическими процессами при напряжении горных пород. Температура поверхности может увеличиться из-за высокого конвективного потока в зонах тектонических разломов. При этом носителями конвективного потока являются вода и газ, то есть речь идёт о выбросе горячей воды и газа на поверхность. Парниковый эффект возникает в приземном слое атмосферы при выносе на земную поверхность оптически активных газов, таких, как CH_4 , CO_2 и паров воды. Образующееся газовое облако поглощает часть уходящего длинноволнового инфракрасного излучения земной поверхности, что приводит к росту температуры воздуха и поверхности. Увеличение дебита, рост уровня воды приводит к увеличению влажности почвы. При увеличении влажности почвы растёт её тепловая инерция, приводящая, в свою очередь, к увеличению температуры в ночное время.

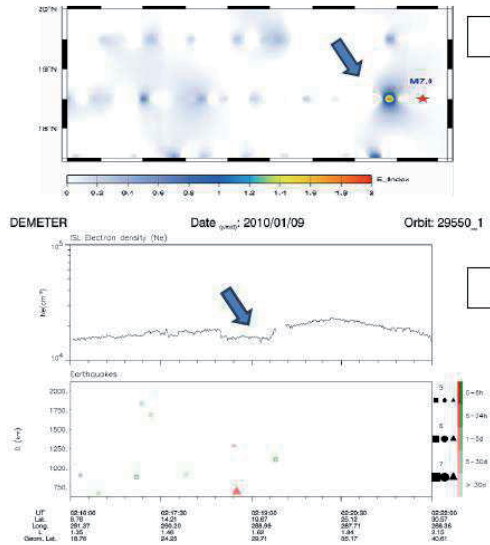


Рис.35. Аномалия уходящего длинноволнового излучения (OLR) для землетрясения на Гаити ($M = 7.0$, 12 января 2010). (а) Широтно-временная карта вариаций ночной OLR. (б) Изменение концентрации электронов в ионосфере по данным спутника DEMETER (Ouzounov et al., 2011).

Рассмотрим возможные механизмы образования тепловых аномалий и литосферно-атмосферных связей с двух сторон: модель процессов в приземном слое атмосферы и экспериментальные данные. Для выяснения возможных причин образования тепловых аномалий на земной поверхности построена модель приземного слоя атмосферы. Целью построения модели является определение стабильности приземного слоя атмосферы, что является важным условием формирования тепловой аномалии на земной поверхности. Определение условий стабильности атмосферы выполнено на примере одной метеостанции - Татено, к северу от Токио. Потенциальная температура является определяющим параметром для стабильности атмосферы. Стабильность атмосферы определяется знаком вертикального градиента потенциальной температуры.

1) Атмосфера в целом является стабильной, сбалансированной системой, практически на всем её протяжении градиент потенциальной температуры положительный.

2) Днем у земной поверхности наблюдается зона нестабильности высотой до 500-600 м. В этой области происходит активное перемешивание воздуха с генерацией конвективных ячеек. Причина возникновения такой зоны - солнечный нагрев земной поверхности.

3) В ночное время атмосфера вновь становится стабильной, перемешивания нет. Чем сильнее остывает земная поверхность до восхода Солнца, тем более стабильной, стратифицированной становится атмосфера. Такие условия благоприятствуют возникновению тумана, смога, когда в приземном слое атмосферы накапливаются все вещества, выделенные на земной поверхности. Концентрация газов, выделяемых из земли, таких как CH_4 и CO_2 также растёт ночью (Бирюлин и др., 1984). Потенциальная температура зависит от температуры, давления и теплопроводности газа. Вычисления показывают, что стабильность ночной атмосферы нарушится, если воздух нагреется более чем на 2 градуса, давление воздуха упадет более чем на 22 гПа и плотность понизится более чем на 0.007 кг/м^3 . Вычисления, выполненные для условий ночной приземной сухой атмосферы, показывают, что увеличение концентрации H_2 и He до 1%, CH_4 до 2%, а N_2 до 82% разрушит стабильность атмосферы и вызовет конвекцию.

Можно также отметить случаи самопроизвольного возгорания газа при его просачивании на земную поверхность (Зорькин, Суббота, Стадник, 1986). Это означает, что концентрация метана в приземном слое воздуха в этих случаях достигала нескольких процентов. Также имеются свидетельства об обожженных кустах и траве при землетрясениях (Борисов и Рогожин, 1989).

Оптически активные газы, такие, как CH_4 , CO_2 и пары воды, поглощают часть инфракрасной тепловой радиации, излучаемой земной поверхностью. Количество поглощаемой радиации описывается простыми эмпирическими формулами Говарда-Берча-Вильямса (Радиационные..., 1969). Были выполнены расчёты для различных содержаний газов и температур поверхности. Так, например, для CO_2 (линии поглощения 4.29 и 14.8 мкм) и температуры поверхности 30 °С поглощенная радиация составит 20-80 Вт/м² для концентраций газа от 0.1 до 10% в слое 1 м. Это реальные значения концентраций газов в призем-

ном слое атмосферы. Полагая, что вся поглощённая радиация идёт на нагрев газа, можно оценить повышение температуры воздуха в приземном слое на 3-5 °С. Нагретый воздух отдаёт тепло земной поверхности, увеличивая восходящую ИК радиацию почвы. Таким образом, локальный парниковый эффект – это система с положительной обратной связью. Процесс продолжается до разрушения стабильности атмосферы, после чего начинается конвекция, которая ограничивает развитие процесса.

Для выявления природы тепловых аномалий были проведены экспериментальные полевые исследования на Предкопетдагском разломе, на Ашхабадском сейсмологическом полигоне, в районе пос. Берзенги (Tronin, 1996). В районе Ашхабада проходит тепловая аномалия, связанная с Предкопетдагским разломом. Эта аномалия связана с термальными водами разлома и описана Никшичем (1926), как "Термальная линия" вод Копетдага. Наблюдения проводились вкрест простиранию одной из ветвей разлома. Был выполнен комплекс тепловой автомобильной съёмки, отбор проб грунта для измерения влажности почвы и определения газового состава почвенного воздуха. Температура поверхности над зоной разлома превышает фоновую температуру в ночное время на 4 °С. В дневное время температура почвы на разломе и за его пределами выравнивается. Причина этого, по-видимому, кроется в повышенной влажности почвы над разломом. В зоне разлома отмечаются повышенные содержания метана и радона, а также повышенные температуры грунта на глубине 1.5 м. Для определения природы тепловых аномалий проведён спутниковый эксперимент на тепловой аномалии в Средней Азии. По метеорологическим условиям была выбрана тепловая аномалия, сопровождавшая землетрясение 23 августа 1985, 39.4N, 75.2E, h=6 км, M=7.5. За день до толчка в регионе наблюдалась безоблачная погода, позволившая провести эксперимент по расчету тепловых потоков на земной поверхности. Методика расчета тепловых потоков изложена в работе Gornu et al. (1997). Она заключается в многократной тепловой съёмке участка земной поверхности в течение суток. Суммируя результаты наземного и спутникового эксперимента можно сделать вывод о том, что основным меха-

низмом формирования тепловых аномалий является изменение влажности почвы из-за эволюций гидрогеодеформационного поля (Вартанян и Куликов, 1982) в процессе подготовки и реализации землетрясения. При этом нельзя исключить, что и другие механизмы, такие, как парниковый эффект, имеют место.

10. Модели литосферно-атмосферных связей в сейсмических процессах

Как уже отмечалось, во многих моделях землетрясений участвует флюид. Предположим, что в процессе подготовки землетрясения имеет место выход на земную поверхность флюида. Под флюидом здесь будем понимать конвективный поток воды, газа и тепла в земной коре. При этом основными путями движения флюидов являются разломы. Скорость движения газа и воды в разломах превышает скорость движения газа и воды в окружающих участках на порядки (Кропоткин, 1980). Так, Wakita с коллегами (1978) показал, что конвективный поток гелия по разломам превосходит на несколько порядков диффузионный поток. Состав газов крупнейших газовыделений в зонах разломов на Северном Кавказе приведён в Таблице 6 (Фридман и др., 1985).

Таблица 6. Концентрации газов в зоне разломов на Северном Кавказе (%).

	CO_2	H_2	CH_4	He
На глубине, в теле разлома	до 83	до 4×10^{-2}	до 10	до 0.2
В почве над разломом	до 6	до 1×10^{-2}	до 18×10^{-4}	-

Газоёмкость пластовых вод до глубины 4 км варьируется от 0 до $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$. С глубиной насыщенность вод газами возрастает, особенно в зонах аномально высокого пластового давления. Например, в Батон-Руж (Луизиана, США) эта

величина достигает $92 \text{ м}^3/\text{м}^3$, в Керчи $19\text{-}45 \text{ м}^3/\text{м}^3$, в Предкарпатье до $\sim 100 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Особенно велика газоёмкость по сероводороду и углекислоте (Зорькин, 1985).

Моисеенко и Смыслов (1986) отмечают, что для геодинамически активных систем характерен режим разогрева, который возникает благодаря резкому увеличению конвективного привноса глубинного (мантийного) тепла по зонам раздвигов или другим проницаемым структурам. Работы (Голубев, 1986, Дучков и др., 1999) на Байкале продемонстрировали наличие зон разломов длиной в 100 км и конвективного потока горячей воды по всей зоне разлома с температурой более 70 градусов.

Таким образом, можно предположить следующую схему литосферно-атмосферных связей:

1) На земную поверхность выбрасываются газы, имеющие плотность меньше воздуха (N_2 , CH_4 , He , H_2), падает давление, стабильность атмосферы также падает, начинается конвекция.

2) Выделяются "тяжёлые" газы (CO_2 , O_2)– стабильность атмосферы растёт.

3) Нагревается приземный слой воздуха за счет парникового эффекта, вызванного присутствием аномальных концентраций CH_4 , CO_2 , паров воды, образуется тепловая аномалия, стабильность атмосферы также падает.

4) Растёт уровень грунтовых вод, увеличивается тепловая инерция почвы за счет увеличения влажности, влажная земная поверхность остывает медленнее более сухих участков, образуется тепловая аномалия, воздух также остывает медленнее, возникает участок более теплого воздуха над влажным и тёплым участком, стабильность атмосферы также падает.

5) Из земли на поверхность поступают горячий газ и вода, образуется тепловая аномалия, стабильность атмосферы также падает.

6) Изменение химического состава вод и газа, дебита и уровня колодцев, источников и грунтовых вод, выбросы газа и воды приводят к образованию тепловых аномалий в ночное время. Эти воздействия разрушают стабильность атмосферы, что ведёт к конвекции в атмосфере, изменению её вертикального профиля. Тепловые аномалии и конвективные ячейки генерируют гравитаци-

онные волны, которые, распространяясь вверх, приводят к изменениям в ионосфере (Гохберг и др., 1996, Molchanov et al., 2001).

7) Среди газов, зафиксированных в эпицентре землетрясений, встречаются метан и водород (Осика, 1981, Войтов и др., 1995). Эти газы разрушают озоновый слой. Сывороткин (1993, 1994) высказал гипотезу о связи глобальных озоновых аномалий с тектоническим строением и дегазацией Земли.

8) Инжекция в атмосферу заряженных аэрозолей почвенными газами и дальнейший перенос аэрозолей в конвективной атмосфере приводит к формированию ЭДС вблизи поверхности Земли и возмущению электрического тока в глобальной цепи (Sorokin et al., 2001; Сорокин и Чмырев, 2002; Sorokin et al., 2005; Сорокин, 2007; Sorokin et al., 2007; Sorokin and Chmyrev, 2010; Sorokin and Hayakawa, 2013).

Многие рассмотренные выше процессы ведут к образованию тепловых аномалий и практически все к уменьшению и разрушению стабильности атмосферы. Только выделение чистого кислорода воздействует в другую сторону. Кислород является крайне редким компонентом подземной атмосферы, не говоря уже об эндогенных газах (Соколов, 1971, Осика, 1981). Поэтому в выходах газа на земную поверхность кислорода обычно нет. Углекислый газ является типичным представителем эндогенных газов, и, как правило, всегда присутствует в подземной атмосфере. При этом CO_2 - оптически активный газ, создающий парниковый эффект. Как было показано выше, парниковый эффект ведет к падению стабильности атмосферы.

Отметим также, что всё изложенное имеет смысл главным образом для ночных условий, когда атмосфера стабильна. В дневных условиях солнечного нагрева и активного перемешивания воздуха уменьшение стабильности атмосферы не окажет никакого существенного воздействия на процессы в приземном слое. Плотность потока солнечного излучения на поверхности Земли составляет $\sim 100 \text{ Вт/м}^2$, тогда как обсуждаемые плотности потоков составляют $\sim 10 \text{ Вт/м}^2$. Единственным исключением будет увеличение испаряемости с поверхности (за счёт высокой влажности почвы) – в этом случае потоки достигают

~ 100 Вт/м² и температурные аномалии могут быть значительными. Наблюдения изменений влажности почвы и температуры в аридной зоне показали, что влажность играет существенную роль ночью и утром. Затем солнечное излучение высушивает верхние несколько сантиметров почвы и далее в течение дня температура "влажного" участка не отличается от "сухого".

Суммируя все сказанное о модели литосферно-атмосферных связей можно предложить следующий механизм. В процессе подготовки землетрясения в эпицентральной зоне и окружающих тектонических разломах начинают выделяться флюиды. В зависимости от геологической ситуации, глубины и магнитуды готовящегося землетрясения на поверхности образуется мозаичная картина предвестников: изменение химического состава вод и газа, дебита и уровня колодцев, источников и грунтовых вод, выбросы газа и воды. Многие из этих явлений ведут к образованию тепловых аномалий в ночное время и практически все разрушают стабильность атмосферы, что ведёт к конвекции в атмосфере, изменению её вертикального профиля. Тепловые аномалии и конвективные ячейки генерируют гравитационные волны, которые, распространяясь вверх, приводят к изменениям в ионосфере. Инжекция почвенными газами в атмосферу заряженных аэрозолей и их вертикальный перенос атмосферной конвекцией формирует ЭДС и генерирует возмущение электрического тока в глобальной цепи, которое сопровождается плазменными и электромагнитными эффектами.

Для понимания природы многочисленных ионосферных и электромагнитных предвестников землетрясений необходимо изучение физических явлений и построение модели воздействия сейсмических процессов на ионосферную плазму. В настоящее время считается, что это воздействие осуществляется, в основном, внутренними гравитационными волнами (ВГВ) и электрическим полем. В работе (Гохберг и Шалимов, 2000) анализируются существующие экспериментальные данные, полученные на заключительной стадии подготовки землетрясений. Рассматриваются ионосферные возмущения, которые проявляются в виде ионосферных неоднородностей за несколько дней до сильных землетрясений. Авторы полагают, что возникновение этих неоднородностей обу-

словлено распространением через ионосферу ВГВ. Их источником могут служить длинноволновые колебания Земли, локальный парниковый эффект и нестационарный приток массы литосферных газов. Наиболее эффективным механизмом является усиления выхода в атмосферу литосферных газов. Авторы полагают, что генерацию ВГВ следует рассматривать в качестве механизма литосферно – ионосферных связей в виду того, что стратификация атмосферы способствует усилению ее возмущения при распространении волны вверх. Далее авторы обсуждают различные возможные сценарии развития сопутствующих процессов в ионосфере. В работе (Molchanov et al., 2004) представлена концепция механизмов генерации явлений в атмосфере и ионосфере. Авторы полагают, что миграция пузырей глубинного текучего вещества может вытеснять горячую воду и газ вверх к поверхности грунта и быть причиной землетрясений в области их подготовки. Моменты времени появления пузырей и их координаты имеют случайные значения, поэтому сами землетрясения, их геохимические аномалии и форшоки являются случайными событиями. Возмущения температуры и плотности атмосферы возникают в результате подъема горячей воды и газа накануне землетрясения. Это приводит к генерации атмосферных гравитационных волн в интервале характерных периодов 6 – 60 минут. Распространение ВГВ вверх приводит к модификации ионосферной турбулентности, загоризонтному распространению радиоволн в атмосфере, аномалиям в распространении НЧ радиоволн в результате возмущения нижней ионосферы и депрессии наблюдаемых на Земле УНЧ пульсаций магнитосферного происхождения. Однако, при интерпретации результатов наблюдения предвестников землетрясений на основе модели распространения ВГВ возникает ряд трудностей. Эти волны распространяются под углом к поверхности Земли. Чем больше период, тем меньше этот угол. Высот ионосферы ВГВ достигают на расстоянии примерно 1000 километров от эпицентра. Вместе с тем, существуют плазменные и электромагнитные возмущения, локализованные в окрестности эпицентра. Определенные трудности возникают и при объяснении возникновения квазистатического электрического поля в ионосфере, мелко-

масштабных плазменных неоднородностей и продольных токов в возмущенной магнитной силовой трубке над эпицентром землетрясения, источников УКВ радиоизлучения в тропосфере и других явлений. Найденные в работе (Rozhnoi et al., 2005) характерные периоды (10-12 и 20-25 минут) для максимумов спектра возмущения амплитуды и фазы сигнала передатчика с частотой 40 КГц, по-видимому, можно объяснить специфическим механизмом фильтрации ВГВ ионосферным ветром, обнаруженным в работе (Sorokin and Pokhotelov, 2010).

Рассмотрим механизм воздействия на ионосферу электрического поля сейсмического происхождения. В работе (Pulinets et al., 2000) была предпринята попытка создания модели литосферно – ионосферных связей. Работа состоит из двух не связанных друг с другом частей. В первой части рассмотрен механизм формирования электрического поля вблизи поверхности Земли при появлении металлических аэрозолей и источника ионизации в атмосфере. Рассмотрен процесс образования тяжелых ионов в результате прилипания полярных молекул воды к элементарным положительно и отрицательно заряженным ионам, возникающим под действием источника ионизации. Проведен расчет высотного распределения электрического поля, возникающего в результате диффузии и переноса электрическим полем ионов и аэрозолей, гравитационного выпадения крупных частиц и подъема мелких частиц в вертикальном конвективном движении атмосферы. Учитывается взаимодействие между ионами разных знаков и их прилипание к аэрозолям. Проведенные расчеты высотной зависимости ионов разных знаков и электрического поля показали, что через 50 с после включения источника ионизации на высотах до 30 см возникает электродный слой, в котором существует различие в концентрации ионов разных знаков, а электрическое поле убывает в полтора раза. Выше этого слоя электрическое поле возрастает в три раза. Как показали авторы, этот механизм можно применять для объяснения изменения электрического поля у поверхности земли при появлении тумана. Далее авторы приводят решение задачи о переносе электрического поля в ионосферу через атмосферу с экспоненциально растущей вверх проводимостью. При этом, в качестве граничного условия задается горизон-

тальное распределение вертикальной компоненты электрического поля на поверхности Земли в виде функции Гаусса. В результате приводятся графики зависимости отношения максимального значения горизонтальной компоненты поля на высоте 90 км к ее значению на поверхности Земли от горизонтального масштаба заданного распределения вертикальной компоненты. Очевидно, что в ночных условиях проводимость ионосферы меньше, следовательно, величина поля будет больше. В работе показано, что даже если радиус возмущенной области составляет 200 км, а электрическое поле на поверхности Земли порядка 100 В/м, то в ионосфере оно не превышает 0.07 мВ/м. Это поле значительно меньше фонового значения в ионосфере и не может оказывать на нее никакого влияния. Далее авторы заключают, что если поле на Земле будет 1000 В/м, то тогда влияние его на ионосферу будет возможно. Однако, таких полей на сейсмической территории с радиусом в 200 км не существует, поэтому данная работа никак не может служить основой модели литосферно – ионосферных связей.

В работе (Pulinets, 2009) сделана попытка объяснить возможную модификацию ионосферы под действием ионизации воздуха в результате инъекции радона в атмосферу в окрестности активных разломов. Обсуждается процесс локальной модификации глобальной электрической цепи и соответствующей изменчивости ионосферы во время тектонической активности. Автор полагает, что появление дополнительного источника ионизации оказывает двойственное влияние на проводимость ионосферы. Появление дополнительных ионов увеличивает проводимость атмосферы и, в тоже время, образование тяжелых кластерных ионов ведет к ее уменьшению. Расчет результирующей величины проводимости не приводится. Далее автор полагает, что аномалия проводимости атмосферы приводит к изменению тока в локальном участке цепи и, следовательно, к появлению горизонтального электрического поля в ионосфере. Расчет величины этого поля также не приводится. Данную концепцию автор применяет для интерпретации возможного возмущения ПЭС в экваториальной области. Так как в области экваториальной аномалии ионосферное поле направлено на

восток, то поле возмущенного тока усиливает его в восточном направлении от эпицентра, а в западном направлении соответственно уменьшает. Следовательно, ПЭС должна возрастать на восток от эпицентра и уменьшаться на запад от него. Следует заметить, что существуют теоретические исследования модификации проводимости ионосферы под действием источника ионизации. В приложении к сейсмическим процессам в работе (Sorokin et al., 2007) подробно изучены процессы формирования проводимости под действием источников гамма и альфа распада на основе решения системы самосогласованных нелинейных уравнений для электрического поля, концентрации ионов и аэрозолей с учетом их взаимодействия и проводимости атмосферы. Как известно, для тока хорошей погоды $\sim 10^{-12} \text{ A/m}^2$ и проводимости атмосферы $\sim 10^{-14} \text{ См/м}$ поле на поверхности Земли имеет значение $\sim 100 \text{ В/м}$, а в ионосфере с проводимостью $\sim 10^{-6} \text{ См/м}$ для тока с той же плотностью поле составляет величину $\sim 10^{-3} \text{ мВ/м}$. Изменение проводимости у поверхности Земли в результате ионизации в два раза приведет к изменению плотности тока в локальном участке цепи на величину того же порядка. Следовательно, дополнительное электрическое поле будет на три – четыре порядка меньше ионосферного поля и его влияние на изменение состояние ионосферы и экваториальную аномалию пренебрежимо мало. Поэтому предлагаемая в работе (Pulinets, 2009) гипотеза является физически не состоятельной и не может служить основой для создания модели литосферно – ионосферных связей. По той же причине изложенное в этой работе предположение находится в противоречии с результатами работы (Klimenko et al., 2012). Авторы этой работы с помощью численного моделирования показали, что наблюдаемые возмущения ПЭС возникают в случае, если предположить, что в ионосфере возникает электрическое поле сейсмического происхождения величиной, достигающей 3 – 9 мВ/м. Тем не менее, в противоречие с полученными результатами, для интерпретации данных авторы привлекают работу (Pulinets, 2009), которая дает электрическое поле в ионосфере величиной на три – четыре порядка меньше необходимого для объяснения результатов численного моде-

лирования. В работе (Pulinets, 2012) автор повторяет обсуждение возможного механизма формирования возмущения ПЭС в низкоширотной ионосфере, приведенного в работе (Klimenko et al., 2012). Основой этого механизма является модель генерации электрического поля, которая противоречит экспериментальным данным. При обсуждении других возможных объяснений экспериментальных данных, автор показывает непонимание различия между электрическим током проводимости и сторонним током ЭДС. Величина плотности тока хорошей погоды составляет $\sim 10^{-12} \text{ A/m}^2$, в то время как величина стороннего тока может значительно превышать это значение, так как сторонний ток связан с полем сил неэлектрической природы. Он выражается через хорошо известные измеряемые характеристики атмосферы. Кроме того, постоянным по высоте является не ток проводимости, а полный ток, равный сумме тока проводимости и стороннего тока. По-видимому, это непонимание и приводит автора к физически неадекватной модели проникновения поля в ионосферу. Таким образом, в приведенных выше работах остается без ответа вопрос, каким образом процессы в литосфере приводят к возмущению ПЭС.

Этот же несостоятельный механизм проникновения поля в ионосферу используется авторами при построении других схем воздействия сейсмических процессов на ионосферу. В работе (Pulinets et al., 2002) обсуждается концепция модели литосферно – ионосферного взаимодействия. Эта концепция включает в себя такие пункты, как появление источника ионизации при инъекции радона, образование ионных кластеров молекулами воды и возникновение сильного электрического поля в приземной атмосфере при эманации металлических аэрозолей. Следующим шагом развития модели является проникновение атмосферного электрического поля в ионосферу. Делается попытка описать механизм, создающий эффекты модификации ионосферы над областью источника вертикального электрического поля. При обсуждении приземных процессов авторы рассматривают образование кластерных ионов с помощью молекул воды и показывают, что их вращательные переходы соответствуют излучению в диапазоне 10 – 100 МГц. На этом основании они полагают, что данный факт можно

использовать для интерпретации данных регистрации УКВ радиоизлучения тропосферы и загоризонтного распространения радиоволн УКВ передатчиков в результате тропосферной рефракции и их рассеяния. Однако, непосредственная интерпретация экспериментальных данных отсутствует. Чтобы говорить о возможности использования подобного механизма, необходимо ответить на вопрос, почему источник УКВ радиоизлучения расположен в тропосфере над эпицентром, каким образом осуществляется загоризонтное распространение, и сопоставить рассчитанную и измеренную интенсивности радиоизлучения. Авторы пытаются также объяснить аномалии в волноводном распространении радиоволн ОНЧ диапазона. Утверждается, что эти аномалии связаны с переносом на высоты 68 – 80 километров ионов металлов, инжестируемых в атмосферу сейсмической активностью. Для доказательства этого утверждения авторы приводят оценку времени переноса металлического иона, обладающего определенной подвижностью, с высоты 15 километров в ионосферу под действием электрического поля грозового облака. Не понятно, почему выбрана начальная высота 15 километров, на которой концентрация ионов металлов неизвестна, вместо поверхности Земли, вблизи которой в атмосферу инжестируются ионы. В атмосфере они подчиняются распределению Больцмана и, поэтому, масштаб их высотного распределения в спокойной атмосфере составляет порядка 2 километра. Сколько их переносится в реальную тропосферу, да еще во время грозы, остается неизвестным. Грозовые облака локализованы в пространстве. Среднее время усиления электрического поля, связанного с накоплением заряда в облаке, составляет примерно 20 минут. Следовательно, электрические поля грозовых облаков горизонтально неоднородны и нестационарны. Кроме того, над сейсмическим регионом может и не быть грозы. Один ион никак не повлияет на ионосферу. Доказательством влияния ионов металлов на аномалии ОНЧ радиоволн может служить только расчет пространственного распределения концентрации электронов и изменения высоты отражения верхней стенки волновода. Приведенная оценка времени переноса иона ничего не доказывает и, в значительной мере, бесполезна. Далее авторы пытаются интерпретировать воз-

никновение в ионосфере мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей над сейсмическим регионом. Мелкомасштабные неоднородности в возмущенной магнитной трубке над сейсмическим регионом впервые были обнаружены благодаря спутниковым данным в работе (Chmyrev et al., 1997). Их горизонтальный масштаб составляет порядка 10 километров. Попытка авторов объяснить их появление распространением акустико-гравитационных волн, горизонтальная длина волны которых значительно превышает пространственный масштаб неоднородностей, представляется непродуктивной. Появление крупномасштабных неоднородностей в ионосфере авторы объясняют проникновением в ионосферу аномального электрического поля. В противоречие самим себе авторы ссылаются на работу (Pulinets et al., 2000), в которой как раз и показано отсутствие проникновения такого поля в ионосферу. Как отмечалось выше, этот результат подтверждает ряд других работ. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что представленный в работе (Pulinets et al., 2002) материал не может служить ни концепцией, ни моделью литосферно – ионосферных связей.

Обсуждение последних достижений в научном понимании проблем сейсмо – ионосферного взаимодействия декларируется в работе (Pulinets, 2004). Автор сфокусировался на трех темах: физический механизм, главные феноменологические особенности ионосферных вариаций и их статистические свойства. Что касается физического механизма, то, в отличие от намерения, автор только повторяет утверждения, приведенные в других своих работах. Ничего нового или полезного для понимания физического механизма сейсмо – ионосферного взаимодействия в данной работе нет. Приведены ошибочные или противоречащие эксперименту утверждения о механизме проникновения электрического поля в ионосферу, источнике этого поля и об ионосферных возмущениях, инициируемых несуществующим полем. Эти утверждения были проанализированы выше. Как и в других своих работах, автор, в основном, пренебрегает расчетами и сопоставлением количественных результатов модели с экспериментом, ограничиваясь иллюстративными схемами и общими рассуждениями, что делает его ра-

боты по модели сейсмо – ионосферного взаимодействия в значительной мере бесполезными, которые могут вводить читателей в заблуждение.

Принципиально иная физическая идея лежит в основе электродинамической модели плазменных и электромагнитных возмущений, сопровождающих процессы подготовки землетрясений (см. схему на Рис.36), которая развита в работах (Sorokin et al., 2001; Сорокин и Чмырев, 2002; Sorokin et al., 2005; Sorokin et al., 2007; Сорокин, 2007; Sorokin and Chmyrev, 2010; Sorokin and Naayakawa, 2013). Впервые эта модель позволила объяснить результаты наблюдения квазистатических электрических полей в ионосфере и на поверхности Земли в сейсмическом регионе, что не удалось сделать с использованием других моделей. В рамках этой модели найден механизм усиления с высотой электрического тока проводимости, протекающего в слое Земля – ионосфера, и механизм ограничения вертикальной компоненты поля на поверхности Земли. Механизм усиления обусловлен убыванием с высотой стороннего тока ЭДС, формируемой в нижней атмосфере, при условии сохранения полного тока, равного сумме стороннего тока и тока проводимости (см. Рис.5). В этом случае, даже в результате роста с высотой проводимости, поле в ионосфере может достигать величины порядка 10 мВ/м. Ток проводимости возникает в результате включения в глобальную цепь дополнительной ЭДС. Она формируется в нижней атмосфере во время инъекции в нее заряженных аэрозолей литосферными газами и их переноса в конвективной атмосфере. Ограничение поля на поверхности Земли обусловлено обратной связью между сторонним током и генерируемым электрическим полем. Расчеты показали, что величина возмущения поля не превышает его фонового значения. В некотором смысле, данная модель подобна модели воздействия на ионосферу ВГВ. Действительно, амплитуда ВГВ возрастает с высотой благодаря убыванию плотности атмосферы. Аналогично, величина тока проводимости возрастает с высотой благодаря убыванию величины стороннего тока. Это означает, что воздействующие факторы усиливаются в ионосфере. Кроме того, ВГВ трудно выделить над фоном вблизи поверхности Земли. Аналогично, возмущение тока проводимости у Земли не пре-

вышает его фонового значения, равного току хорошей погоды. Оба эти воздействующих фактора имеют единый источник. Это инжектируемые в атмосферу литосферные газы. Можно полагать, что как ВГВ, так и электрический ток могут воздействовать на ионосферу одновременно. Последствия такого воздействия могут различаться. При интерпретации экспериментальных данных, по-видимому, следует учитывать возможность такого комплексного воздействия.

Согласно электродинамической модели рост электрического поля в ионосфере обусловлен формированием ЭДС и изменением электрофизических характеристик нижней атмосферы в результате интенсивных выбросов почвенных газов, аэрозолей и радиоактивных веществ из очага землетрясения на стадии его подготовки. В рамках модели развита теория генерации квазистатического электрического поля в системе атмосфера – ионосфера, разработаны методы расчета его пространственного распределения и проведены теоретические исследования механизмов формирования ЭДС в нижней атмосфере (Sorokin et al., 2001; 2005b,c,d; 2006; 2007; Sorokin and Chmyrev, 2010). Расчеты показали, что квазистатическое поле в ионосфере достигает значений порядка 10мВ/м, в то время как на поверхности Земли оно составляет порядка 100 В/м. Кроме того, на высотах тропосферы примерно 5 – 10 километров в слое толщиной 1 – 2 километра поле может достигать пробойных значений (Sorokin et al., 2011a,b; 2012). Величина стороннего тока ЭДС у поверхности Земли может иметь значения примерно $10^{-8} \div 10^{-6} \text{ А/м}^2$. В рамках модели проведены теоретические исследования плазменных и электромагнитных эффектов, сопровождающих генерацию тока проводимости в глобальной цепи. Из проведенных расчетов следует, что появление ЭДС в глобальной цепи приводит к стимулированию ряда наблюдаемых плазменных и электромагнитных эффектов. Рост электрического поля приводит к неустойчивости акустико-гравитационной волны (АГВ) в ионосфере (Sorokin et al., 1998; Сорокин и Чмырев, 1999). Экспоненциальный рост амплитуды АГВ в электрическом поле в ионосфере ограничивается процессом формирования вихрей (Chmyrev and So-

rokin, 2010). В результате в E слое ионосферы возникают горизонтальные неоднородности ионосферной проводимости. Этот процесс сопровождается образованием плазменных неоднородностей в верхней ионосфере, вытянутых вдоль магнитного поля, и продольных токов (Sorokin et al., 1998; Сорокин и Чмырев, 1999; Sorokin et al., 2000). Появление плазменных неоднородностей и продольных токов приводит к УНЧ колебаниям (Sorokin et al., 1998) и уширению спектра ОНЧ сигналов передатчиков (Chmyrev et al., 2008), регистрируемых на спутнике. Рассеяние импульсного электромагнитного излучения, связанного с грозовой активностью, на горизонтальных неоднородностях проводимости в нижней ионосфере над очагом землетрясения сопровождается усилением электромагнитного излучения в КНЧ диапазоне, регистрируемого на спутнике (Borisov et al., 1999) и генерацией гиротропных волн, распространяющихся вдоль E слоя ионосферы. Их распространение формирует линейчатый спектр электромагнитных колебаний в УНЧ диапазоне (Sorokin et al., 2003; Сорокин и др., 2001б; Sorokin et al., 2009; Sorokin and Hayakawa, 2008) и изменение частоты максимума шумановского резонанса (Hayakawa et al., 2011).

Кроме того, появление неоднородностей в ночной ионосфере ведет к депрессии геомагнитных пульсаций в УНЧ диапазоне, которые возникают в результате падения сверху на нее направляемых альвеновских волн магнитосферных источников (Sorokin et al., 2004). Возрастание электрического поля до пробойного значения в тропосфере приводит к появлению случайных электрических разрядов, УКВ радиоизлучению, генерируемому в тропосфере над эпицентром (Sorokin et al., 2011a,b; 2012) и загоризонтному распространению сигналов УКВ передатчиков (Sorokin et al., 2014). Генерация электрического тока проводимости в глобальной цепи сопровождается модификацией ионосферы. Возмущение в D области возникает как из-за переноса током электронов и ионов, так и из-за нагрева электронов (Лаптухов и др., 2009). В верхней части D слоя существуют свободные электроны, а в нижней его части - отрицательно заряженные ионы, которые возникают в результате быстрого прилипания элек-

тронов к нейтральным молекулам. При протекании электрического тока из-за переноса и смены типа носителей заряда возникает слой повышенной концентрации электронов. Усиление электрического тока, протекающего между Землей и ионосферой, приводит к увеличению плотности плазмы в E слое и образованию спорадического E слоя (Sorokin et al., 2006). Возрастание количества тепла, выделившегося в E слое ионосферы в результате протекания в ней электрического тока, приводит к модификации F слоя и росту концентрации легких ионов в результате резонансной перезарядки (Sorokin and Chmyrev, 1999). Теоретические исследования перечисленных выше явлений в цитируемых работах сопровождаются расчетами наблюдаемых параметров и сопоставлением с данными наблюдения. Электродинамическая модель воздействия процессов

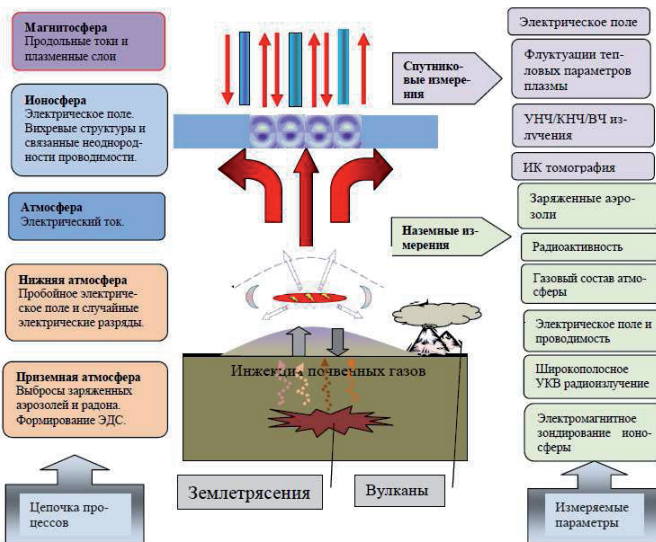


Рис. 36. Схема процессов, составляющих электродинамическую модель атмосферно-ионосферных связей.

формирования тайфуна на космическую плазму может служить основой исследований, направленных на поиск предвестников катастрофической фазы развития тайфунов. Она позволяет связать между собой спутниковые данные электромагнитных и плазменных измерений с электрофизическими и

метеорологических характеристиками нижней атмосферы на стадии зарождения тайфуна. Модель сводит многочисленные эффекты в космической плазме к одной причине - изменению тока проводимости, протекающего в атмосферно – ионосферной цепи. На начальной стадии его образования (до катастрофической фазы) происходит конденсация пара над поверхностью океана с перераспределением носителей заряда и изменением их подвижности, что совместно с вертикальной конвекцией приводит к описанному выше эффекту в электрической цепи ионосфера - Земля. Ионосфера, стратосфера и тропосфера представляют собой единую среду, физические явления в которой связаны друг с другом. Согласно приведенной модели интенсивные процессы в нижней атмосфере и литосфере оказывают электродинамическое воздействие на ионосферную плазму. К числу таких явлений относятся процессы подготовки землетрясений, извержений вулканов, тайфунов, грозовая активность, техногенные катастрофы. На Рис.36 приведена схема процессов и регистрируемых величин, составляющих электродинамическую модель литосферно – ионосферных связей. Из-за ограничения изменений поля на Земле, которые могут быть меньше фоновых возмущений, спутниковые методы регистрации поля, связанного с сейсмической активностью, имеют преимущество по сравнению с наземными методами. Кроме того, усиление поля в ионосфере может контролироваться по регистрации плазменных и электромагнитных эффектов, обусловленных ее реакцией на такое усиление. Можно заключить, что в результате усиления электрического поля сейсмического происхождения, ионосфера может служить его индикатором лучше, чем наземные средства измерения.

11. Основные мировые тенденции в сфере исследований предвестников землетрясений

В то время, как технологии наблюдения Земли из космоса развиваются очень быстро и широко применяются для сбора многочисленных практически используемых данных о состоянии земной поверхности, атмосферы и океана,

применение космических аппаратов для прогнозирования землетрясений все еще остается на стадии научных исследований. Был осуществлен только один целевой космический проект ДЕМЕТЕР, предназначенный для изучения отклика ионосферы на процессы подготовки землетрясений. На следующее десятилетие в разных странах планируется несколько не связанных между собой спутниковых программ по исследованию ионосферных возмущений, обусловленных сейсмической активностью. Только по одному из них, китайскому проекту CSES, в случае успешной реализации декларируется намерение продолжить исследования и разработки с целью создания практических методов и средств детектирования предвестников землетрясений из космоса.

Можно предполагать, что дальнейшее развитие космической группировки DMC, построенной компанией SSTL, будет осуществляться с учетом востребованности мониторинга землетрясений.

Ожидается, что будущие технологии обнаружения приближающихся землетрясений будут включать использование интерферометрических радаров с синтезированной апертурой, обладающих высоким пространственным разрешением, радиоволновой техники GPS/ГЛОНАСС и инфракрасных (8-12 микрон) наблюдений, как важной составной части многопараметрической спутниковой системы для мониторинга землетрясений и вулканической активности. Дальнейшее развитие техники дистанционного зондирования сделает возможным мониторинг высотного распределения некоторых компонент атмосферного газа и аэрозолей, чувствительных к сейсмическому воздействию на атмосферу.

В краткосрочной перспективе целесообразно проведение исследований по следующим направлениям:

- Разработка специализированных космических платформ класса микро и нано спутников с целевой полезной нагрузкой, запуск и испытания на орбите, доказательство эффективности их применения в качестве прототипа элементов будущей космической группировки для мониторинга катастроф и других применений.

- Разработка и экспериментальная отработка технологии раннего обнаружения и мониторинга предвестников землетрясений с использованием космических, воздушных и наземных измерительных платформ. Формирование базы экспериментальных данных, разработка на ее основе теории генерации предвестников и всесторонней модели литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия, полагаемых в основу теории краткосрочного прогнозирования землетрясений.
- Разработка практических методов краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений.
- Разработка концепции, структуры и способа построения Системы Раннего Обнаружения и Мониторинга Предвестников Землетрясений, как основного элемента будущей глобальной системы предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с землетрясениями большой магнитуды.

В настоящее время для краткосрочного прогнозирования используются в основном сейсмические данные и информация по деформациям земной поверхности, получаемая с помощью сигналов навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. В экспериментальном порядке предпринимаются попытки выдачи краткосрочных прогнозов землетрясений путем обработки данных тепловой (ИК) съемки с некоторых спутников дистанционного зондирования Земли и ионосферных возмущений по сигналам GPS/ГЛОНАСС и наземных ОНЧ передатчиков.

Наиболее полная программа экспериментальных и теоретических исследований предвестников землетрясений на ближайшую перспективу была разработана в рамках проекта «ТвинСат» Инновационного Центра СКОЛКОВО – «Применение микро и нано спутников для обнаружения и мониторинга предвестников землетрясений (Российско-британский космический проект)» (Chmyrev et al., 2013). Ниже представлено краткое описание этой программы.

Программа ТвинСат-1 базируется на достижениях в экспериментальных исследованиях предвестников землетрясений и наиболее свежих результатах в

области теоретического моделирования этих явлений. Основная часть программы предусматривает анализ корреляции космических и наземных наблюдений с целью надежного отделения сигналов – предвестников землетрясений от других типов сигналов, имеющих антропогенное, магнитосферное и иное несейсмическое происхождение.

Для предполагаемой солнечно-синхронной орбиты прохождение спутников над выделенной областью будет происходить примерно 5 раз в течение двух дней. Ожидаемое число землетрясений с магнитудой от 6 до 6,9 по шкале Рихтера, для которых будут собраны бортовые данные в течение 3 лет, составляет ~400.

Космический сегмент состоит из двух платформ типа мать/дочь – микро спутника ТвинСат-1М и нано спутника ТвинСат-1Н, работающих при управляемом расстоянии между ними (см. Рис.37). Канал радиосвязи между спутниками обеспечивает передачу научной информации с ТвинСат-1Н на ТвинСат-1М, где она хранится в бортовой памяти большой емкости для последующей доставки полного объема данных с двух аппаратов на подходящую наземную телеметрическую станцию.

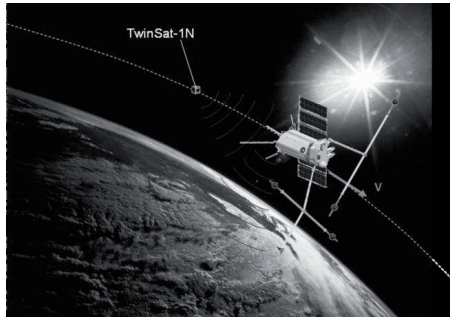


Рис. 37. 2-х спутниковая орбитальная группировка ТВИНСАТ (Chmyrev et al., 2013)

После выведения на орбиту ТвинСат-1Н будет отделен от ТвинСат-1М с относительной скоростью ~3 см/с. Из-за различия баллистических коэффициен-

тов двух спутников ТвинСат-1Н будет быстрее терять высоту (и, следовательно, ускоряться), поэтому необходим контроль положения на орбите для поддержания заданного диапазона расстояний между двумя космическими аппаратами. Такой контроль будет обеспечен использованием корректирующей двигательной установки (КДУ) на борту микро спутника ТвинСат-1М. Как показали баллистические расчёты, при отделении нано спутника со скоростью 3 см/с в направлении орбитального движения расстояние между двумя КА в состоянии свободного полета будет оставаться в пределах 400 км в течение примерно 8 месяцев (240 суток). Использование корректирующей двигательной установки на борту TwinSat-1М обеспечит нахождение микро и нано спутников в зоне взаимной радиовидимости на расстоянии, приемлемом для обеспечения связи между двумя бортами и требований эксперимента, в течение всего срока активного существования на орбите.

Характеристики ТвинСат-1М:

Размеры спутника (без штанг)	Ø46 x 53 см
Масса (включая полезную нагрузку)	~50 кг
Мощность Средняя Максимальная	90 Вт 140 Вт
Скорость отделения ТвинСат-1Н Линейная Угловая	~3 см/с < 6 град/с (подлежит уточнению)
Ориентация	3-х осная, точность стабилизации ~8 угловых минут
Орбита	солнечно-синхронная, высота 700-800 км, период обращения ~100 минут

Телеметрия	
Быстрый канал (X диапазон)	>50 Мбит/с
Медленный канал (145/435 МГц)	20 Кбит/с
Бортовая память	> 50 Гбайт
Частота канала связи между спутниками	2-3 ГГц (подлежит уточнению)
Время активного существования	>3 лет

Характеристики ТвинСат-1Н:

Размеры	10 x 10 x 22.7 см
Масса (включая полезную нагрузку)	2.5 кг
Мощность	
Средняя	2.2 Вт
Максимальная	4.0 Вт
Ориентация	3-х осная, точность стабилизации $\sim 1^0$
Телеметрия на ТвинСат-1М	>64 Кбит/с
Телеметрия на Землю (145/435 МГц)	4.8 Кбит/с
Время активного существования	>3 лет

Основные параметры, измеряемые КА ТвинСат-1М:

- Вектор квазипостоянного электрического поля;
- Спектральные и волновые характеристики 6 компонент электромагнитного поля в УНЧ/КНЧ (0.5 – 500 Гц) диапазоне;

- Спектр и выборочные волновые формы колебаний электрического поля в ОНЧ/НЧ (0.5-300 КГц) диапазоне; вариации амплитуды и фазы сигналов наземных ОНЧ/НЧ передатчиков;
- Спектр и выборочные волновые формы электромагнитных полей в ОВЧ диапазоне (22 – 48 МГц);
- Вариации параметров тепловой и сверх тепловой плазмы (0.3 - 20 эВ);
- Энергетическое распределение потоков электронов и ионов в диапазоне 0,3-300 эВ для двух направлений;
- Молниевая активность в подспутниковых зонах (оптические измерения). Эти измерения нужны для отделения полезных сигналов от событий, связанных с молниями. Структура оптических наблюдений, включая измерение интенсивности уходящего длинноволнового (8-12 мкм) излучения, будет определена дополнительно. Тепловая съемка и измерения ночной светимости от молниевой активности могут быть выполнены мультиспектральным сканирующим радиометром среднего разрешения при обеспечении достаточных весовых и энергетических характеристик платформы. Планируется использование сканера в 3-х спектральных каналах: 0.5-1.0, 10-11 и 11-12 мкм с разрешением на местности 200-300 м.

Основные параметры, измеряемые КА ТвинСат-1Н:

- Вариации параметров тепловой и сверх тепловой плазмы (0.3 - 20 эВ)*;
- Энергетическое распределение потоков электронов и ионов в диапазоне 0,3-300 эВ для двух направлений*;
- Волновые формы УНЧ/КНЧ (0,5 – 500 Гц) колебаний магнитного поля для одной или двух компонент;

* Приборы для спутников ТвинСат-1М и ТвинСат-1Н будут иметь одинаковую конструкцию.

* Дополнительно рассматривается вопрос об измерении на двух КА вариаций плотности нейтрального газа в ионосфере.

Данные с других спутников

Для усиления научной отдачи в рамках программы ТвинСат-1 параллельно планируется использование данных с других космических аппаратов, включая:

- Данные по интенсивности уходящего длинноволнового излучения Земли и температуре земной поверхности сейсмически активных зон с систем EOS (Terra и Aqua) и NPOESS;
- Мониторинг космической погоды для учета магнитосферных эффектов;
- Данные по пространственному распределению деформаций в потенциальных зонах землетрясений, полученные по технологии InSAR (интерферометрические радары с синтезированной апертурой).

Эти данные могут быть обеспечены существующими и планируемыми к запуску космическими аппаратами.

Наземные станции

Наземный сегмент состоит из сети геофизических станций, расположенных в нескольких зонах высокой активности землетрясений и вулканов. Два спутника будут работать в скоростном режиме сбора данных при пролете над этими зонами, в которых будут выполняться синхронные наземные наблюдения требуемых параметров электромагнитных полей и атмосферы. Сравнение наземных и спутниковых измерений с сейсмическими данными позволит установить наличие (или отсутствие) корреляции между измеренными параметрами и причинно-следственных связей с сейсмической активностью.

Параметры, измеряемые наземными станциями:

- Состав атмосферного газа;
- Характеристики эмиссии радона и вариации радиоактивности;
- Динамика инъекции аэрозолей;
- Вариации квазипостоянных электрических полей и токов в атмосфере;
- Спектральные и волновые характеристики УНЧ/КНЧ/ОВЧ электромагнитных излучений, включая направления прихода волн и локализацию источников;

- Возмущения ионосферы, определяемые путем регистрации вариаций амплитуды и фазы сигналов наземных ОНЧ/НЧ передатчиков на подходящих трассах распространения и сигналов навигационных систем GPS/ГЛОНАСС;
- Деформации земной поверхности с использованием сигналов GPS/ГЛОНАСС;
- Дебит, температура и химический состав подземных вод источников, скважин;
- Температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра;
- Сейсмические и магнитные колебания.

Предполагается развертывание многопараметрической наземной сети в Камчатско-Курильском регионе, который характеризуется наиболее высокой в мире активностью землетрясений и вулканов. 29 камчатских вулканов ежегодно производят 3-4 извержения взрывного типа. С учетом высокой частоты извержений в выбранном регионе мы рассчитываем на формирование уникальной базы данных по сигналам – предвестникам, полученных от координированных наземных и 2-х спутниковых наблюдений.

Воздушная платформа оборудуется специальной аппаратурой для мониторинга возмущений, возбуждаемых в атмосфере над сейсмически активными зонами накануне землетрясений, включая возмущения химического состава атмосферы и распределения аэрозолей, квазипостоянных электрических полей и токов, УНЧ/КНЧ/ОНЧ/НЧ и ОВЧ/УВЧ электромагнитных излучений и атмосферных эмиссий. В состав бортовой аппаратуры входит авиационный аналог спутникового мультиспектрального сканирующего радиометра для определения температуры земной поверхности и грозовой активности. Наилучшим решением при выборе исследовательской воздушной платформы является использование стратосферного самолета М55 ГЕОФИЗИКА. Преимуществом его является высота полета до 21 км, недоступная другим пилотируемым воздушным судам. Однако, стоимость его эксплуатации довольно высока и может со-

здать ограничения в возможности применения для регулярных наблюдений. Использование обычных (тропосферных) самолетов рассматривается, как возможная альтернатива. Интенсивные разработки тропосферного самолета-лаборатории, оснащенного широким комплексом аппаратуры для геофизического мониторинга, ведутся в настоящее время по программе Росгидромета. В качестве альтернативных (или дополнительных) платформ рассматриваются привязные аэростаты, работающие на высотах до 5 км в зонах расположения наземных геофизических станций, более экономичные и простые в эксплуатации. Выбор этих платформ для проведения экспериментов наиболее вероятен.

Следует отметить инновационность проекта «ТвинСат», определяемую двумя важными факторами:

- Использование двух космических аппаратов с управляемым расстоянием и информационным обменом между ними обеспечит получение данных о пространственной структуре и динамических характеристиках изучаемых явлений, что позволит существенно улучшить распознавание и надежность выделения сигналов, связанных с землетрясениями, из множества других природных и техногенных сигналов в ионосфере.
- Многопараметрический анализ широкого спектра сигналов – предвестников, получаемых путем синхронных наблюдений в трех средах (в космической плазме, в атмосфере и на поверхности Земли) различными методами значительно повысит точность и надежность прогноза землетрясений по сравнению с современными методами, использующими лишь несколько наблюдательных параметров для выработки прогноза.

Современные спутниковые методы измерений

Предварительный анализ применения спутниковых методов для изучения сейсмических процессов дан выше. В настоящее время можно регистрировать спутниковыми методами следующие параметры: 1) температуру земной поверхности с помощью ИК тепловой съемки; 2) концентрацию озона и аэрозоля в атмосфере; 3) вертикальный профиль атмосферы по температуре и влажно-

сти; 4) деформации земной поверхности; 5) электромагнитные явления в ионосфере; 6) свечение кислорода в *E* слое ионосферы, облачный покров. Анализ современной ситуации со спутниковыми методами наблюдения за землетрясениями, преимущества и недостатки существующих систем отражены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7. Характеристика спутниковых методов мониторинга сейсмической активности

<i>Параметр</i>	<i>Спутник</i>	<i>Разрешение на местности, м</i>	<i>Чувствительность</i>	<i>Периодичность, дни</i>
Деформация земной поверхности	ERS, ALOS	~10	см	27-44
Температура поверхности	NOAA, EOS, геостационарные спутники	~100 -5000	0.1 -0.5 К	½ часа - 2 дня
Газовый состав атмосферы (озон) и аэрозоль	EOS, TOMS	~10000	в зависимости от компонента	1-2
Электромагнитные эффекты в ионосфере	DEMETER	~100000	в зависимости от эффекта	20-30

Таблица 8. Преимущества и недостатки современных спутниковых методов мониторинга сейсмической активности

<i>Метод</i>	<i>Параметр</i>	<i>Преимущества</i>	<i>Недостатки</i>
Спутниковая радиолокационная интерферометрия	Деформация земной поверхности	не зависит от погодных условий, высокое разрешение на местности	большой период наблюдений недостаточная чувствительность
Космическая тепловая съёмка	Температура поверхности	высокая периодичность и чувствительность	зависит от погоды
Газовая спутниковая съёмка	Газовый состав атмосферы и аэрозоль	высокая периодичность	зависит от погоды, низкое разрешение на местности и чувствительность к приповерхностным концентрациям
Ионосферные исследования	Электромагнитные плазменные эффекты в ионосфере	не зависит от погодных условий	Сложность выполнения площадной съёмки

Потребности пользователей и требования к перспективным спутниковым системам

Представляется целесообразным проведение исследований на трёх уровнях: наземном, атмосферном и космическом. Пользователей информации можно разделить на четыре категории: 1) конечные пользователи (в России -

МинЧС, региональные органы власти), 2) научные пользователи, 3) инженерные и строительные компании, 4) страховые компании, 5) космические агентства. Им необходима различная информация о землетрясениях. Тем не менее, можно сформулировать некоторые общие требования пользователей к спутниковой информации: 1) методики съёмки, не зависящие от погодных условий (облачности), 2) временные интервалы съёмки - от нескольких месяцев до толчка до одной недели после события с периодичностью в сутки, 3) быстрая и круглосуточная автоматизированная обработка данных и их доставка пользователям, низкая стоимость данных.

Необходимо также учитывать проблемы стандартизации методов обработки и форматов данных, увязки с существующими геологическими и геофизическими наблюдениями, анализа исторических данных. Требуется проводить образовательные мероприятия по использованию спутниковых данных среди пользователей.

Исходя из современного состояния спутниковых наблюдений, потребностей пользователей и технических возможностей в ближайшее десятилетие сформулированы требования к перспективным спутниковым наблюдениям (Таб. 9).

Таблица 9. Технические требования к спутниковым методам наблюдения за землетрясениями

<i>Параметр</i>	<i>Разрешение на местности, м</i>	<i>Чувствительность</i>	<i>Периодичность, дни</i>
Деформация земной поверхности	~(10 – 100)	мм-см	1
Температура поверхности	~(100 - 1000)	0.1 К	1

Газовый состав атмосферы (озон) и аэрозоль	~1000	в зависимости от компонента	1
Электромагнитные и плазменные эффекты в ионосфере	~10000	в зависимости от эффекта	1

Интеграция с наземными и воздушными наблюдениями

Наземные и воздушные наблюдения рассматриваются здесь в контексте интеграции со спутниковыми наблюдениями. Главная цель интеграции наземных, воздушных и спутниковых наблюдений – совместить достоинства всех уровней наблюдений. Возможности интеграции наземных, воздушных и спутниковых наблюдений отражены в Таб. 10.

Таблица 10. Интеграция наземных, воздушных и спутниковых наблюдений при мониторинге землетрясений

<i>Спутниковые наблюдения</i>	<i>Воздушные наблюдения</i>	<i>Наземные наблюдения</i>
Деформация земной поверхности до толчка		Наклон, напряжения, GPS и VLBI наблюдения, уровень воды
Температура поверхности (в любых погодных условиях)	Температура поверхности, температура и влажность воздуха	Метеорологические наблюдения: температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, температура поверхности.
Параметры ионосферной плазмы		Радиозондирование ионосферы, оптические и магнитные наблюдения
Концентрация газов	Концентрация га-	Концентрация газов (O ₃ ,

(O ₃ , CH ₄ , CO ₂ , CO, H ₂ S, SO ₂ , HCl)	зОВ (O ₃ , CH ₄ , CO, H ₂ S, SO ₂)	CH ₄ , CO ₂ , CO, Rn, H ₂ S, SO ₂ , HCl, He, H ₂)
Свечение кислорода в слое Е (85-110 км) на 5577А и 6300А	Свечение кислорода в слое Е (85-110 км) на 5577А и 6300А	Свечение кислорода в слое Е (85-110 км) на 5577А и 6300А
Вертикальный профиль температуры, давления и влажности	Метеорологические наблюдения	Метеорологические наблюдения
Аэрозоль	Аэрозоль	Аэрозоль
Электрическое поле, УНЧ/КНЧ/ОНЧ/НЧ/О ВЧ электромагнитные волны	Электрическое поле, УНЧ/КНЧ/ОНЧ/НЧ/ОВЧ электромагнитные волны	Электрическое поле, УНЧ/КНЧ/ОНЧ/НЧ/ОВЧ электромагнитные волны

В качестве платформ воздушного уровня наблюдений могут использоваться самолёты и аэростаты. Эти платформы могут нести значительные объёмы оборудования для метеорологических и радиационных измерений (энергетический баланс – нисходящая и уходящая радиация), определения концентрации аэрозоля и отдельных газов, измерения температуры земной поверхности, электрического поля и электромагнитных излучений в различных диапазонах частот. В качестве примера успешной интеграции различных методов и платформ следует отметить совместное использование данных по деформации поверхности, полученных с помощью спутниковой дифференциальной интерферометрии и наземных станций GSP (Kuzuoka и Mizuno, 2004).

Рекомендации по применению спутниковых методов для мониторинга землетрясений

Рекомендации по применению спутниковых методов для мониторинга землетрясений сделаны в результате анализа состояния и перспектив спутниковых и наземных исследований землетрясений, анализа планов космических агентств в области изучения Земли, результатов работ нескольких международных групп: ЮНЭСКО (IGOS theme report, 2004), ООН (<http://www.ungiwg.org>), Евросоюза (<http://www.disasterscharter.org>).

Предлагается создать или дополнить исследования на нескольких полигонах в сейсмоопасных районах, например, на Северном Кавказе, Забайкалье, Сахалине и Камчатке. По данным радиолокационной съёмки построить рельеф поверхности на территорию полигонов и начать мониторинг смещений земной поверхности, при необходимости расположить на них пассивные или активные отражатели. Установить наземные станции GPS для мониторинга смещений земной поверхности и измерения содержания электронов в ионосфере. По результатам тепловой съёмки рассчитать тепловые потоки на территории полигона и начать мониторинг тепловых аномалий. Установить оборудования для измерения газового состава и концентрации аэрозоля в атмосфере. Выполнять комплекс электромагнитных наблюдений для сопряжения со спутниковыми наблюдениями.

Можно сделать также несколько рекомендаций космическим агентствам:

- 1) Необходимо создание спутниковых радарных систем с длиной волны диапазона L и 1-2 дневным периодом повторения съёмки. При этом разрешение на местности может быть понижено до сотен метров.
- 2) Необходима разработка микроволновых всепогодных систем для измерения температуры поверхности.
- 3) Создать системы для анализа газов и аэрозоля в приземном слое атмосферы.
- 4) Продолжить работы по электромагнитным и плазменным исследованиям ионосферы и создать оборудование для изучения свечения ионосферы.

Заключение.

Анализ современного состояния применения дистанционных методов для изучения землетрясений показал следующее:

- 1) В ближайшем будущем наиболее перспективным направлением являются тепловые, электромагнитные и плазменные методы изучения землетрясений из космоса. По ним накоплен статистически достоверный материал, разработаны физические модели, реально создание аппаратуры для микроспутников.
- 2) Следующим по перспективности является направление по изучению деформаций земной поверхности и мониторингу газового состава атмосферы. Это направление требует значительных затрат на наземные исследования и средств на разработку спутникового оборудования.
- 3) Представляется целесообразным проведение исследований на трёх уровнях: воздушном, наземном и спутниковом.

Актуальные направления теоретических исследований:

Проведение теоретических исследований процессов, протекающих в приземных слоях атмосферы, которые формируют дополнительную ЭДС в глобальной электрической цепи во время подготовки землетрясений.

Разработка численных методов для построения трехмерного пространственного распределения электрического поля возмущения тока в глобальной цепи при включении в нее ЭДС, связанную с процессами подготовки землетрясения.

Развитие моделей формирования возмущений в D -, E - и F - слоях ионосферы, связанных с включением ЭДС в глобальную цепь. Создание методов расчета пространственного распределения концентрации электронов с учетом их дрейфа, диффузии, нагрева и взаимодействия с ионами и молекулами.

- Развитие теории неустойчивости АГВ в ионосфере под действием внешнего электрического поля с учетом относительного движения ионизированной и нейтральной компонент плазмы и наклона магнитного поля.
- Развитие теории формирования нелинейных вихревых структур в ионосфере, возникающих под действием электрического поля и других факторов, связанных с ростом сейсмической активности
- Исследование механизмов формирования продольных токов и плазменных слоев, генерируемых неоднородностями проводимости ионосферы в присутствии электрического поля, а также механизмов расщепления крупномасштабных токов и плазменных слоев в мелкомасштабные нитевидные структуры.
- Исследование механизмов проникновения в ионосферу электромагнитных эмиссий естественных и искусственных источников излучения и сопровождающих эффектов
- Анализ механизмов генерации электрических разрядов в атмосфере под действием электрического поля, величина которого достигает пробойного значения. Исследование пробоя под действием убегающих электронов и связанных с этим эффектов в атмосфере и ионосфере.
- Развитие моделей электромагнитного и оптического излучения в различных диапазонах спектра, нагрева атмосферы и рассеяния радиоволн в зоне разрядов нижней атмосферы.
- Интерпретация данных, получаемых в процессе экспериментальных исследований. Проведение численных расчетов согласно существующим моделям и сопоставление их результатов с данными экспериментов.
- Определение неизвестных параметров моделей на основе сопоставления результатов расчета измеряемых величин и их регистрации. Корректировки моделей. Внесение дополнений в программу экспериментальных исследо-

ваний на основе скорректированных моделей предвестников землетрясений.

Развитие самосогласованной электродинамической модели предвестников землетрясений и ее применения для улучшения качества и надежности кратковременного прогноза землетрясений.

Литература

- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. 2010. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии. Доклады РАН, т.430, № 3, с. 400 – 404
- Булаева Н.М., Кобзаренко Д.Н., Османов Р.Ш., Аскеров С.Я. 2004. Исследование связи приповерхностного температурного поля с сейсмической активностью центральной части дагестанского клина на основе спутниковых данных NOAA. Вестник Дагестанского научного центра. № 16. с. 29.
- Бучаченко А.Л., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Страхов В.Н., Сорокин В.М., Чмырев В.М. 1996. Ионосферные предвестники землетрясений // УФН. Т.166. № 9. С.1023-1029.
- Войнов В.В., Гуфельд Ю.Л., Кругликов В.В. и др. 1992. Эффекты в ионосфере и атмосфере перед спитакским землетрясением. Известия АН СССР, Физика Земли, №3, С.96-101.
- Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. 1988. Уходящее инфракрасное излучение Земли - индикатор сейсмической активности. Доклады АН СССР. Т. 301. № 1. с. 67-69.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф., Пономарев Е.А., Рожной А.А. 1987. Ямпольский В.С. Исследование возмущений естественных и искусственных электромагнитных полей источниками сейсмического происхождения // Изв. АН СССР, Физика Земли. № 2. С. 17-24.

- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. 1988. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука, 174 с.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И. Л., Липеровский В.А. 1989. Современные исследования электромагнитных предвестников землетрясений. М.: Наука. 92с.
- Гохберг М.Б., Шалимов Л.С. 2000. Литосферно – ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле. Т.2, №2, С.95-108.
- Гуфельд И. Л., Рожной А. А., Тюменцев С. Н., Шерстюк С.В., Ямпольский В.С. 1992. Возмущения радиоволновых полей перед Рудбарским и Рачинским землетрясениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. Т.3. С.102-107.
- Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г., 1980. Сейсмология, геология, геофизика. Под. ред. Амирханова Х.И., М., Наука, 220 с.
- Дода Л.Н., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А. 2009. Космический мониторинг предвестников землетрясений. Наука в России, №6, с. 30-37
- Ивлев Л.С., 2000. Экспериментальные наблюдения аэрозольных предвестников землетрясений и вулканических извержений. В кн.: Методы обнаружения краткосрочных предвестников землетрясений и спорадических естественных и антропогенных выбросов в атмосферу (АЭС). СПб Университет, СПб. С.11.
- Каталог термических предвестников землетрясений, 1991. М, ИФЗ, 35 с.
- Киссин И.Г. 1982. Землетрясения и подземные воды. М., Наука, 176 с.
- Лаптухов А.И., Сорокин В.М., Яценко А.К., 2009. Возмущение D-области ионосферы электрическим током атмосферно – ионосферной электрической цепи. Геомагнетизм и аэрономия. Т.49. №6. С.805-811.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. 1992. Ионосферные предвестники землетрясений, Мрсква, Наука, , 304 с.
- Люшвин П.В. Спектральные характеристики сейсмогенных облаков. 2009. Исследование Земли из космоса, № 2. С. 19-27.
- Макаренко Ф.А. 1963. Термальные воды СССР и вопросы их теплоэнергетического использования. М.: Изд. Академии наук СССР, 292 с.

- Михайлов В.О., А.Н. Назарян, В.Б. Смирнов, М. Диаман, Н. Шапиро, Е.А. Киселева, С.А. Тихоцкий, С.А. Поляков, Е.И. Смольянинова, Е.П. Тимошкина. 2010. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003. Изв. РАН, «Физика Земли». №2. с. 3-16
- Морозова Л.И. 1996. Особенности проявления лито-атмосферных связей в периоды сильных землетрясений Азии. Известия РАН, Физика Земли, №5, с. 63-68.
- Ружин Ю.Я., Сорокин В.М., Яценко А.К. 2014. О физическом механизме формирования возмущения полного электронного содержания ионосферы в сейсмическом регионе // Геомагнетизм и аэрономия. Т.54. №3. С. 365-374.
- Сальман А.Г., Тронин А.А. 1989. Космическая тепловая съемка - новый метод дистанционного изучения сейсмоактивных регионов. Советская Геология. № 10. с. 90-93.
- Сальман А.Г., Тронин А.А. 1990. Вариации потока уходящего ИК излучения Земли в сейсмоактивных районах Средней Азии. Известия АН СССР, Физика земли, № 7. с. 67-69.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н., Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Брагин В.Д., Сычева Н.А., Кузиков С.И. 2010. Динамика взаимодействия полей сейсмичности и деформаций земной поверхности (Бишкекский геодинاميческий полигон). Физика Земли, № 10, с. 15–37.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. 1982а. Распространение короткопериодных волн в ионосфере // Известия ВУЗов, Радиофизика, Т.25. С.495 - 507.
- Сорокин В. М., Яценко А. К. 1988. Распространение пульсаций P_{i2} в нижней ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. С. 655 - 660.
- Сорокин В.М. 1988. Волновые процессы в ионосфере, связанные с геомагнитным полем // Известия ВУЗов, Радиофизика. Т.31. №10. С.1169 – 1179.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М. 1999. О неустойчивости акустогравитационных волн в ионосфере под действием электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т.39. №5. С.38 – 45.

- Сорокин В.М., Яценко А.К. 1999. Возмущение проводимости и электрического поля в слое Земля-ионосфера над очагом готовящегося землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. Т.39. №2. С.100 - 106.
- Сорокин В.М., Яценко А.К. 2000. Возмущение квазистационарного электрического поля в атмосфере над сейсмоактивными районами // Химическая физика. Т.19. № 6. С.71.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М., Яценко А.К. 2001а. Возмущение электрического поля в слое Земля – ионосфера при инъекции заряженных аэрозолей // Геомагнетизм и аэрономия. Т.41. №2. С.187-196.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М., Яценко А.К. 2001б. Ультранизкочастотные колебания магнитного поля на поверхности Земли, генерируемые горизонтальными неоднородностями ионосферной проводимости // Геомагнетизм и аэрономия. Т.41. №3. С.327-331.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М. 2002. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрономия. Т.42. №6. С.821-827.
- Сорокин В.М. 2007. Плазменные и электромагнитные эффекты в ионосфере, связанные с динамикой заряженных аэрозолей в нижней атмосфере // Химическая физика, Т.26, №4, С.45-80.
- Тертышников А.В. 1994. Сейсмоозонные эффекты Закавказья. Известия РАН, Физика Земли, № 5, с. 53-61.
- Тертышников А.В. 1995. Эффекты сейсмоозонных связей над очагами сильных землетрясений. Известия РАН, Физика Земли, № 9, с. 66-71.
- Трифонов В.Г., Макаров В.И., Кожухин А.И., Скобелев С.Ф., Шульц С.С. (мл.). 1988. Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М.: Наука, 133 с.
- Тронин А.А. 2011. Каталог термальных и атмосферных явлений при землетрясениях. СПб, «Стратегия будущего», 260 с.
- Фишкова Л. М., Торшелидзе Т. И. 1989. Отображение сейсмической активности в вариациях свечения ночного неба. Полярные сияния и свечение ночного неба, № 33. с. 17-23.

- Фукс И.М., Шубова Р.С. 1995. Аномалии СДВ сигналов как отклик на процессы в приземной атмосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т.34. № 2. С.130 -134.
- Afraimovich, E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. 2004. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California // *Russian J. Earth Sci.*, **6**(5), 339–354.
- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I. 2008. TEC anomalies—Local TEC changes prior to earthquakes or TEC response to solar and geomagnetic activity changes? *Earth Planets Space*, **60**, 961–966.
- Albert-Beltrán, J. 1979. El mapa español de flujos caloríficos. Intento de correlación entre anomalías geotérmicas y estructura cortical. *Bol. Geol. y Min.* T. XC-I, p. 36-48.
- Alekseev, V.A., Alekseeva, N.G. 1992. Investigation of metal transfer in the biosphere during gaseous emission in zones of tectonic activity using methods of nuclear physics. *Nucl. Geophys.* **6**, 99-105.
- Ampferer, M., Denisenko, V.V., Hausleitner, W., Krauss, S., Stangl, G., Boudjada, M.Y., Biernat, H.K. 2010. Decrease of the electric field penetration into the ionosphere due to low conductivity at the near ground atmospheric layer, *Annales Geophysicae*, Vol.28, 779–787.
- Armijo, R., B. Meyer, A. Hubert, and A. Barka. 1999. Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean : Timing and kinematics, *Geology*, v. 27(3), p. 267-270.
- Biagi P. F., Piccolo R., Castellana L., Maggipinto T., Ermini A., Martellucci S., Bellecci C., Perna G., Capozzi V., Molchanov O.A., Hayakawa M., Ohta K. 2004. VLF-LF radio signals collected at Bari (South Italy): a preliminary analysis on signal anomalies associated with earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. V.4. P.685-689.
- Blackett, M., Wooster M. J., and Malamud B. D. Exploring land surface temperature earthquake precursors: A focus on the Gujarat (India) earthquake of 2001, *Geophys. Res. Lett.*, 2011, **38**, L15303, doi:10.1029/2011GL048282.

- Blecki J., Parrot M., Wronovski 2010. Studies of electromagnetic field variations in ELF range registered by DEMETER over the Sichuan region prior to the 12 May 2008 earthquake// *International Journal of Remote Sensing* 31, 3615-3629.
- Blecki J., Parrot M., Wronovski 2011. Plasma turbulence in the ionosphere prior to earthquakes, some remarks on the DEMETER registrations// *J. Asian Earth Sciences*, 41 (4-5), 450-458, doi: 10.1016/j.jseaeas.2010.05.016.
- Bondur V. 2006. Seismoionospheric variations during the earthquake in Pakistan (September 2005) as potential precursor of seismic events. *International Conference on Advances in Space Technologies (ICAST 2006): Space Technologies for Disaster Management and Rehabilitation / V. Bondur, V. Smirnov. Islamabad-Pakistan, 2-3 September 2006. P.AST06-108. p.11-15.*
- Borisov N., Chmyrev V., and Rybachek S. 2001. A new ionospheric mechanism of electromagnetic ELF precursors to earthquakes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 63. 3-10.
- Boyarchuk, K. A. 1997. Kinetics of Elementary Ions in the Lower Atmosphere Acted Upon by Ionizing Radiation, *Proceed. of Russ. Acad. Sci., Atmos. Ocean. Phys.* 33 (2), 236.
- Cermak V. 1976. Geothermal model of the Bohemian massif and the western Carpathians (Alpine) and their mutual relation. *Tectonophysics*, 41, p. 127-137.
- Cermak V. 1977. Preliminary heat flow map of Europe 1:5.000.000. *AISPEI/AIVCEI Assembly Durham*. 58 p.
- Cervone, G.; Maekawa, S.; Singh, R.; Hayakawa, M.; Kafatos, M.; Shavets, A. 2006. Surface Latent Heat Flux and Nighttime LF Anomalies prior to the Mw = 8.3 Tokachi-Oki Earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 109-114.
- Chini, M.; Bignami, C.; Stramondo, S.; Pierdicca, N. 2008. Uplift and subsidence due to the 26 December 2004 Indonesian earthquake detected by SAR data. *Int. J. Remote Sens.*, 29, 3891-3910.
- Chmyrev, V.M., Isaev, N.V., Bilichenko, S.V. and Stanev, G.A. 1989. Observation by space - borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over on earthquake center // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 57. P. 110-114.

- Chmyrev, V.M., Isaev, N.V., Serebryakova, O.N., Sorokin, V.M. and Sobolev, Ya.P. 1997. Small - scale plasma inhomogeneities and correlated ELF emissions in the ionosphere over an earthquake region // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V.59. P. 967-973.
- Chmyrev V.M., Sorokin V.M., Shklyar D.R., 2008. VLF transmitter signals as a possible tool for detection of seismic effects on the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* V.70. P.2053-2060
- Chmyrev V.M., Sorokin V.M. 2010. Generation of internal gravity vortices in the high-latitude ionosphere. *Journal of Atmosphere and Solar – Terrestrial Physics.* V.72., P.992-996.
- Chmyrev V., Smith A., Kataria D., Nesterov B., Owen C., Sammonds P., Sorokin V., Vallianatos F. 2013. Detection and monitoring of earthquake precursors: TwinSat, a Russia–UK satellite project. *Advances in Space Research* 52, 1135–1145.
- Cohen, M. B. and Marshall R. A. 2012. ELF/VLF recordings during the 11 March 2011 Japanese Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L11804, doi:10.1029/2012GL052123.
- Denisenko V.V., Boudjada M.Y., Horn M., Pomozov E.V., Biernat H.K., Schwingenschuh K., Lammer H., Prattes G., Cristea E. 2008. Ionospheric conductivity effects on electrostatic field penetration into the ionosphere // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 1009–1017.
- Dey, S.; Singh, R.P. 2003. Surface Latent Heat Flux as an Earthquake Precursor. *Nat. Hazards Earth Syst.*, 3, 749-755.
- Dey, S.; Sarkar, S.; Singh, R.P. 2004. Anomalous changes in column water vapor after Gujarat earthquake. *Adv. Space Res.*, 33, 274-278.
- Fitterman, D.V. 1979. Theory of electrokinetic - magnetic anomalies in a faulted half - space // *J. Geophys. Res.*, V.84. P.6031 - 6040.
- Freund F.T., Takeuchi A., Lau B. 2006. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions // *Physics and Chemistry of the Earth* 31, 389–396.

- Freund F.T., Kulahci I.G., Cyr G., Ling J., Winnick M., Tregloan-Reed J., Freund M.M. 2009. Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 71, no. 17-18, pp. 1824–1834.
- Freund F. Toward a unified solid state theory for preearthquake signals // *Acta Geophysica*, vol. 58, no. 5, pp. 719–766, 2010.
- Fukumoto Y., Hayakawa M., Yasuda H. 2001. Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences* 1: 107–112.
- Goldberg R.A. 1984. Middle atmospheric electrodynamics: status and future // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Phys.* V.46, P.1083-1101.
- Gokhberg, M. B., Morgunov, V. A., Yoshino, T., Tomizawa, I. 1982. Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan// *J. Geophys. Res.* 87, 7824-7828.
- Gorny, V.I.; Salman, A.G.; Tronin, A.A.; Shilin, B.V. 1988. The earth's outgoing IR radiation as an indicator of seismic activity. *Proc. Acad. Sci. USSR*, 301, 67-69.
- Gousheva M., Glavcheva R., Danov D., Angelov P., Hristov P., Kirov B., Georgieva K. 2006. Satellite monitoring of anomalous effects in the ionosphere probably related to strong earthquakes. // *Advances in Space Research* V.37. P.660–665.
- Gousheva M., Danov D., Hristov P., Matova M. 2008b. Quasi-static electric fields phenomena in the ionosphere associated with pre- and post earthquake effects. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* V.8. P.101-107.
- Gousheva M., Danov D., Hristov P., Matova M. 2009. Ionospheric quasi-static electric field anomalies during seismic activity August-September 1981. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* V.9. P.3-15.
- Grimalsky V.V., Hayakawa M. Ivchenko V.N., Rapoport Yu.G., Zadorozhnyi V.I. 2003. Penetration of an electrostatic field from the lithosphere into the ionosphere and its effect on the D-region before earthquakes // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 65, 391–407.
- Guo, G.; Wang, B. 2008. Cloud anomaly before Iran earthquake. *Int. J. Remote Sens.*, 29, 1921-1928.

- Gup, G.; Xie, G. 2007. Earthquake cloud over Japan detected by satellite. *Int. J. Remote Sens.*, 28, 5375 – 5376.
- Han, S.-C.; Shum, C.K.; Bevis, M.; Ji, C; Kuo, C.-Y. 2006. Crustal Dilatation Observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. *Science*, 313, 5787, 658-662.
- Hao, J., T. Tang, and D. Li, 2000: Progress in the research of atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes. *J. Earthquake Pred. Res.*, 8, 241-255.
- Harrison R.G., Aplin K.L., Rycroft M.J. 2010. Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 72, 376–381.
- Hashimoto, M.; Choosakul, N.; Hashizume, M.; Takemoto, S.; Takiguchi, H.; Fukuda, Y.; Fujimori, K. 2006. Crustal deformations associated with the great Sumatra-Andaman earthquake deduced from continuous GPS observation. *Earth Planets Space*, 58, 127-139.
- Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O. A. and Yumoto K. 1996. Results Of Ultra-Low-Frequency Magnetic Field Measurements During The Guam Earthquake Of August 1993 // *Geophys. Res. Lett.* V. 23. P. 241.
- Hayakawa M., Molchanov O. A., Ondoh T., and Kawai E. 1996. Precursory Signature of the Kobe Earthquake on VLF Subionospheric Signal // *J. Atmos. Electr.* V.16, No. 3. P. 247-257.
- Hayakawa, M. 1999. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. Terra Sci. Pub. Co.: Tokyo, Japan, 996 p.
- Hayakawa, M.; Molchanov, O.A. 2002. Eds. Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling; Terra Sci. Pub. Co.: Tokyo, Japan, 477 p.
- Hayakawa, M. Ohta K., Horie T., Maekawa S. 2005. Precursory electromagnetic phenomena of Sumatra earthquake, as based on the measurements in Japan. *Papers of Technical Meeting on Electromagnetic Compatibility, IEE Japan, VOL.EMC-05;NO.46-55, pp.41-46*

- Hayakawa M., Ohta K., Nickolaenko A. P., Ando Y. 2005. Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-chi earthquake in Taiwan // *Ann. Geophys.* V.23. P.1335-1346.
- Hayakawa, M., K. Ohta, S. Maekawa, T. Yamauchi, Y. Ida, T. Gotoh, N. Yonai-guchi, H. Sasaki and T. Nakamura, 2006. Electromagnetic precursors to the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, *Phys. Chem. Earth*, vol. 31, 356-364.
- Hayakawa M. 2007. VLF/LF Radio Sounding of Ionospheric Perturbations Associated with Earthquakes // *Sensors.* V.7. P.1141-1158.
- Hayakawa M., Hobara Y., Ohta K., Izutsu J., Nikolaenko A.P., Sorokin V.M. 2011. Seismogenic effects in the ELF Schumann resonance band. // *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials.* V.131, No.9, pp.684-690.
- Hayakawa M., Raulin J. P., Kasahara Y., F. Bertoni C. P., Hobara Y., and W. Guevara-Day. 2011. Ionospheric perturbations in possible association with the 2010 Haiti earthquake, as based on medium-distance subionospheric VLF propagation data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 513–518
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaki, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., Sano, Y. 1955. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science* 269, 60–61.
- IGOS International Global Observation Strategy Geohazards Theme Report; 2004, ESA/UNESCO: Printed by European Space Agency, Paris, France, 54 p.
- Isaev N.V., Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Serebryakova O.N., and Ovcharenko O.Ya. 2002. Electric field enhancement in the ionosphere above tropical storm region. *Seismo Electromagnetics: Litosphere – Atmosphere – Ionosphere Coupling.* Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB. Tokyo. P.313-315.
- Jianguo, H., 1989: Near earth surface anomalies of the atmospheric electric field and earthquakes. *Acta Seismol. Sin.*, 2, 289-298.
- Kiehl, J. T. and Trenberth, K. E., 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 197-208
- Kim V.P., Hegai V.V. 1999. A possible presage of strong earthquakes in the night – time mid – latitude F2 region ionosphere // *Atmospheric and ionospheric electro-*

- magnetic phenomena associated with earthquakes. Ed. By M. Hayakawa. TERRAPUB. Tokyo. P.619-627.
- King, C.-Y. 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview. *J. Geophys. Res.* 91 (B12), 12269–12281.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Pulinets S.A., Zhao B., Tsidilina M.N. 2011. Formation mechanism of great positive TEC disturbances prior to Wenchuan earthquake on May 12, 2008 // *Advances in Space Research* 48, 488–499
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Pulinets S.A. 2012. Variations of equatorial electrojet as possible seismo-ionospheric precursor at the occurrence of TEC anomalies before strong earthquake // *Advances in Space Research* 49, 509–517
- Kobayashi, T., Tobita M., Koarai M., Okatani T., Suzuki A., Noguchi Y., Yamanaka M., and Miyahara B. 2012. InSAR-derived crustal deformation and fault models of normal faulting earthquake (Mj7.0) in Fukushima-Hamadori area // *Earth Planet Space*, V.64, P.1209–1221.
- Kopytenko, Y.A., Matiashvili, T.G., Voronov, P.M., Kopytenko E.A., and Molchanov, O.A. 1993. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories // *Phys. Earth Planet. Inter.*, V.77. P.85 - 89.
- Kratz D.P., Cess R.D. 1988. Infrared radiation models for atmospheric ozone // *Journal of geophysical research* V.93. No.D6. P.7047-7054.
- Kuzuoka, S.; Mizuno, T. 2004. Land Deformation Monitoring Using PSInSAR Technique. In *Proceedings of International Symposium on Monitoring, Prediction and Mitigation of Disasters by Satellite Remote Sensing*, Awaji, Hyogo, Japan, January, 176-181.
- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Schlegel K., Haldoupis Ch. 1997. Currents and turbulence in and near mid-latitude sporadic E-layers caused by strong acoustic impulses. *Ann. Geophys.* 15. 767-773.

- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., Bogdanov V.V. 2005. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 783–789.
- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Bogdanov V.V. 2008. On the generation of electric field and infrared radiation in aerosol clouds due to radon emanation in the atmosphere before earthquakes // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 1199–1205.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Tsai H.F. 2001. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake // *Geophysical research letters*, V. 28, No. 7, P.1383-1386.
- Liu, J.; Chuo, Y.; Shan, S.; Tsai, Y.; Chen, Y.; Pulinets, S.; Yu, S. 2004. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. *Ann. Geophys.*, 22, 1585-1593.
- Liu, J.Y.; Tsai, Y.B.; Chen S.W.; Lee C.P.; Chen Y.C.; Yen H.Y.; Chang W.Y.; Liu C. 2006. Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02103.
- Liu, J.-Y.; Tsai, Y.-B.; Ma, K.-F.; Chen, Y.-I.; Tsai, H.-F.; Lin, C.-H.; Kamogawa, M.; Lee, C.-P. 2006. Ionospheric GPS total electron content (TEC) disturbances triggered by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami, *J. Geophys. Res.*, 111, A05303.
- Liu, J. Y.; Chen, Y.I.; Chen, C.H.; Liu, C.Y.; Chen, C.Y.; Nishihashi, M.; Li, J.Z.; Xia, Y.Q.; Oyama, K.I.; Hattori, K.; Lin, C.H. 2009. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake. *J. Geophys. Res.*, 114, A04320.
- Liu, J. Y., Y. I. Chen, C. H. Chen, and K. Hattori, 2010. Temporal and spatial precursors in the ionospheric global positioning system (GPS) total electron content observed before the 26 December 2004 M9.3 Sumatra–Andaman Earthquake, *J. Geophys. Res.*, 115, A09312, doi:10.1029/2010JA015313.

- Lixin Wu and Shanjun Liu. 2009. Remote Sensing Rock Mechanics and Earthquake Thermal Infrared Anomalies, *Advances in Geoscience and Remote Sensing*, Gary Jedlovac (Ed.), ISBN: 978-953-307-005-6
- Ma, W.; Ma, W.; Zhao, H.; Li, H. 2008. Temperature changing process of the Hokkaido (Japan) earthquake on 25 September 2003. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 985-989.
- Markson R. 1978. Solar modulation of atmospheric electrification and possible implications for the Sun-weather relationship // *Nature* 273, 103-109.
- Martynenko S.I., Fuks I.M., and Shubova R.S. 1996. Ionospheric electric - field influence on the parameters of VLF signals connected with nuclear accidents and earthquakes // *J. Atmos. Electr.* V.15. P.259 - 269.
- Massonnet, D.; Rossi, M.; Carmona, C.; Adragna, F.; Peltzer, G.; Feigl, K.; Rabaute T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- Meister C.-V., Liperovskaya, E.V., Molchanov, O.A., Pokhotelov, O.A., Senchenkov, S.A., Alimov, O.A., 2002. To the question of spatial scales of seismo – ionospheric effects. *Seismo Electromagnetics: Lithosphere – Atmosphere – Ionosphere Coupling*. Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB. Tokyo. 329-331.
- de Michele, M.; Raucoules, D.; Salichon, J.; Lemoine, A.; Aochia H. 2008. Using INSAR for seismotectonic observations over the Mw 6.3 Parkfield earthquake (28/09/2004), California. In *Proceedings of Commission IV ISPRS Congress, Beijing, China, 3 – 11 July 2008*; Available online at: http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/4_pdf/265.pdf.
- Molchanov, O.A., Kopytenko, Y.A., Voronov, P.M., Kopytenko, E.A., Matiashvili, T.G., Fraser-Smith, A.C., and Bernardy, A. 1992. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitak ($M_s = 6.9$) and Loma Prieta ($M_s = 7.1$) earthquakes: Comparativ analyses. // *Geophys. Res. Lett.*, V.19. P.1495 - 1498.

- Molchanov, O.A., Mazhaeva, O.A., Golyavin, A.N., and Hayakawa, M. 1993. Observation by Intercosmos-24 satellite of ELF - VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes // *Ann. Geophys.*, V.11. P.431 - 440.
- Molchanov, O.A. 1993. Wave and plasma phenomena inside the ionosphere and the magnetosphere associated with earthquakes, in *Review of Radio Science 1990-1992*, edited by W.R. Stone, Oxford University Press, New York. P.591 - 600.
- Molchanov, O.A., Hayakawa, M., and Rafalsky, V.A. 1995. Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere // *J. Geophys. Res.*, V.100. P.1691 - 1712.
- Molchanov, O.A. and Hayakawa, M. 1996. VLF transmitter earthquake precursors influenced by a change in atmospheric electric field // *10th International Conference on Atmospheric Electricity*, June 10-14, Osaka, Japan, Proceedings. P. 428 - 431.
- Molchanov O.A., Hayakawa M. 1998. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related with earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 103, pp. 17489-17504.
- Molchanov O.A. 1999. Fracturing as an underlying mechanism of seismo-electric signals // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Ed. M. Hayakawa. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB). Tokyo. P.349.
- Molchanov, O., Schekotov, A., Fedorov, E., Belyaev, G., and Gordeev, E. 2003. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka, *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* 3, 203–209.
- Molchanov O., Fedorov E., Schekotov A., Gordeev E., Chebrov V., Surkov V., Rozhnoi A., Andreevsky S., Iudin D., Yunga S., Lutikov A., Hayakawa M., Biagi P.F. 2004. Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere // *Natural Hazards and Earth System Sciences V.4*. P.757–767.
- Molchanov, O.; Rozhnoi, A.; Solovieva, M.; Akentieva, O.; Berthelie, J.J.; Parrot, M.; Lefeuvre, F.; Biagi, P.F.; Castellana, L.; Hayakawa, M. 2006. Global diagnos-

- tics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **6**, 745-753.
- Moriya T., Mogi T., Takada M. 2010. Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes // *Geophys. J. Int.* V.180. P.858-870.
- Namgaladze, A.A., Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., et al. 2009. Physical mechanism and mathematical simulation of ionosphere earthquake precursors observed in total electron content. *Geomagn. Aeron.* **49**, 252–262.
- Nikiforova, N. N., and S. Michnowski, 1995: Atmospheric electric field anomalies analysis during great Carpatian Earthquake at Polish Observatory Swider. IUGG XXI General Assem. Abst., Boulder, Colo., VA11D-16.
- Nickolaenko A. P., Hayakawa M., Sekiguchi M., Ando Y., Ohta K. 2006. Model modifications in Schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicentre // *Ann. Geophys.* V.24. P.567-575.
- Nomicos, C., Vallianatos, F., Kalliakatos, J., Sideris, F., Bakatsakis, M., 1995. Latest aspects of telluric and electromagnetic variations associated with shallow and intermediate depth earthquakes in South Aegean, *Annali di Geophysica*, X1/2, 361-375.
- Heincke, J., Koch, U., Martinelli, G. 1995. CO₂ and Radon measurements in the Vogtland area (Germany) - a contribution to earthquake prediction research. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 774 – 779.
- Ohta K., Watanabe N., Hayakawa M. 2006. Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan // *Physics and chemistry of the Earth.* V.31. P.397-402.
- Okada, Y.; Mukai, S.; Singh R.P. 2004. Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001. *Adv. Space Res.*, **33**, 254-258.
- Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H., Kawada Y., Ishikawa T., Tokonami S., Shinagi M. 2007. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **7**, 629-635.

- Omori Y., Nagahama H., Kawada Y., Yasuoka Y., Ishikawa T., Tokonami S., Shinogi M. 2008. Preseismic alteration of atmospheric electrical conditions due to anomalous radon emanation // *Physics and Chemistry of the Earth* 33, 276-284..
- Ondoh, T., Hayakawa, M., 2002. Seismo discharge model of anomalous sporadic *E* ionization before great earthquakes. *Seismo Electromagnetics: Lithosphere – Atmosphere – Ionosphere Coupling*. Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB. Tokyo. 385-390.
- Ondoh, T., 2003. Anomalous sporadic-E layers observed before M7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake; Terrestrial gas emanation model. *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*. 17, 96-108.
- Ouzounov, D.; Freund, F. 2003. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.* 33, 268-273.
- Ouzounov, D.; Bryant, N.; Logan, T.; Pulinets, S.; Taylor, P. 2006. Satellite thermal IR phenomena associated with some of the major earthquakes in 1999-2003. *Phys. Chem. Earth*, 31,154-163.
- Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. 2007. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // *Tectonophysics* V.431. P.211–220.
- Ouzounov, D.; Hattori, K.; Liu, J. Y. 2011. Validation of Earthquake Precursors—VESTO. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 41, 4-5, 369-370
- Ouzounov, D.; Pulinets S.; Romanov A.; Romanov A.; Tsybulya K.; Davidenko D.; Kafatos M.; Taylor P. 2011. Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results. *Earthquake Science*, vol. 24, 6, 557-564.
- Ozawa, S.; Murakami, M.; Kaidzu, M.; Hatanaka, Y. 2005. Transient crustal deformation in Tokai region, central Japan, until May 2004. *Earth Planets Space*, 57, 909-915.
- Panda, S.K.; Choudhury, S.; Saraf, A.K.; Das, J.D. 2007. MODIS land surface temperature data detects thermal anomaly preceding 08 October 2005 Kashmir earthquake. *Int. J. Remote Sens.* 28, 4587-4596.

- Park, C.G., Dejnakarindra, M. 1973. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere, 1. Middle and auroral latitudes, *Journal of Geophysical Research*, 84, 960-964.
- Parrot, M. 2002. The micro-satellite DEMETER. *J. Geodynamics*, 33, 535-541.
- Parrot, M.; Berthelier, J.J.; Lebreton, J.P.; Sauvaud, J.A.; Santolík, O.; Blecki, J. 2006. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions. *Phys. Chem. Earth*, 31, 486-495.
- Peltzer, G.; Hudnut, K.; Feigl, K. 1994. Analysis of coseismic surface displacement gradients using radar interferometry: New insights into the Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 99, 21971-21981.
- Pinty, B.; Gobron, N.; Verstraete, M.M.; Mélin, F.; Widlowski, J.-L.; Govaerts, Y.; Diner, D.J.; Fielding, E.; Nelson, D.L.; Madariaga, R.; Tuttle M.P. 2003. Observing Earthquake-Related Dewatering Using MISR/Terra Satellite Data. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 84, 37-48.
- Ponomareva N.L., Bulaeva N.M., Tupik N.V., Kobzarenko D.N., 2002. The connection between seismic events and thermal fields in region. *Proc. of Int. conf.: The Earth's thermal field and related research methods. Moscow, Russia, June 17-20, 2002*, p. 208-211.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Yagova N.V., and Yumoto K. 1999. Attempt to detect ULF electro - magnetic activity preceding earthquake // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Ed. M. Hayakawa., Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo. P.203 - 214.
- Piroddi, L.; Ranieri, G. 2011. Thermal remote sensing applications to seismology and earthquake precursors: the case of l'aquila 2009. *IGARSS, Vancouver, Canada, 24-29 July 2011, Paper: MOP.S.4*.
- Pulinets S.A., Alekseev V.A., Legenka A.D., Khagai V.V. 1997. Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification. *Adv. Space Res.* 20, 2173 – 2176.

- Pulinets, S. A., Boyarchuk, K. A., Hegai, V. V., Kim, V. P., and Lomonosov, A. M. 2000. Quasielectrostatic model of atmosphere – thermosphere - ionosphere coupling // *Adv. Space Res.*, 26, 1209–1218.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Karelin A.V. 2002. Conception and model of seismo – ionosphere – magnetosphere coupling. In *Seismo Electromagnetics: Lithosphere – Atmosphere – Ionosphere Coupling*. Eds. M.Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB. Tokyo. P.353-361.
- Pulinets, S.A., Legen`ka, A.D., Gaivoronskaya, T.V., Depuev, V.Kh. 2003. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 1337-1347.
- Pulinets, S.A., Kotsarenko A.N., Ciraolo L., Pulinets I. A. 2007. Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation // *Adv. Space Res.*, **39**, 970–977.
- Pulinets S. 2004. Ionospheric Precursors of Earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications // *TAO*, V.15, No. 3, P.413-435.
- Pulinets, S.A.; Ouzounov, D.; Ciraolo, L.; Singh, R.; Cervone, G.; Leyva, A.; Dunajacka, M.; Karelin, A.V.; Boyarchuk, K.A.; Kotsarenko, A. 2006. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003. *Ann. Geophys.* 24, 835-849.
- Pulinets S.A. 2009. Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults // *Advances in Space Research* V.44. P.767–773.
- Pulinets S, Ouzounov D. 2011. Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (laic) model - an unified concept for earthquake precursors validation // *Journal of Asian Earth Sciences*. V.41 (4-5), P.371-382.
- Pulinets S. 2012. Low-Latitude Atmosphere-Ionosphere Effects Initiated by Strong Earthquakes Preparation Process // *International Journal of Geophysics*. V.2012. P.1-14.
- Qiang, Z.; Du, L.-T. 2001. Earth degassing, forest fire and seismic activities. *Earth Science Frontiers*, 8, 235-245.

- Quang, Z.; Xu, X.; Dian, C. 1991. Thermal Infrared Anomaly–Precursors of Impending Earthquakes. *Chin. Sci. Bull.*, 36, 319-323.
- Rapoport Y., Grimalsky V., Hayakawa M., Ivchenko V., Juarez-R D., Koshevaya S., Gotynyan O. 2004. Change of ionospheric plasma parameters under the influence of electric field which has lithospheric origin and due to radon emanation // *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 579–587.
- Rauscher E.A., Van Bise W.L. 1999. The relationship of extremely low frequency electromagnetic and magnetic fields associated with seismic and volcanic natural activity and artificial ionospheric disturbances // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Ed. M. Hayakawa. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB). Tokyo. P.459-487.
- Regular update of seismic hazard maps through thermal space observations. European Communities: Madrid, Spain. Project Reference: ENV4980741, 2000.
- Rozhnoy A. A., Solovieva M. S., Molchanov O. A., Hayakawa M., Maekawa S., Biagi P.F. 2005. Anomalies of LF signal during seismic activity in November–December 2004 // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. V.5. P.657-660.
- Rozhnoy A. A., Molchanov O.A., Solovieva M.S., Gladyshev V., Akentieva O., Berthelier J. J., Parrot M., Lefeuvre F., Hayakawa M., Castellana L., Biagi P. F. 2007. Possible seismo-ionosphere perturbations revealed by VLF signals collected on ground and on a satellite // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. V.7. P.617-624.
- Rozhnoi A., M. Solovieva, O. Molchanov, K. Schwingenschuh, M. Boudjada, P. F. Biagi, T. Maggipinto, L. Castellana, A. Ermini, and M. Hayakawa. 2009. Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M=6.3) on 6 April 2009 // *Natural Hazard and Earth System Sciences*. V. 9. P. 1727-1732.
- Rulenko, O. P., 2000: Operative precursors of earthquakes in the near-ground atmosphere electricity. *Vulcanology and Seismology*, 4, 57-68.
- Ruzhin, Yu.Ya., Nomicos, C., Vallianatos, F., 1999. VHF precursor generated in atmosphere before earthquake, Report SE27-017, 24th General Assembly of EGS; Haague, Geophysical Res., 105.

- Ruzhin, Yu.Ya., Nomicos, C., Vallianatos, F., 2000. High frequency seismoprecursor emissions. Proc. 15th Wroclaw EMC Symposium 512-517.
- Ruzhin, Yu., Nomicos, C., 2007. Radio VHF precursors of earthquakes, Nat. Hazards, 40, 573-583.
- Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. 2000. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62, 1563-1576.
- Sapkota B.K., Varshneya N.C. 1990. On the global atmospheric electrical circuit // Journal of Atmospheric and Terrestrial Phys. V.52, P.1-20.
- Saraf, A.K.; Choudhury S. 2003. Earthquakes and thermal anomalies. Geospatial Today, 2, 18-20.
- Saraf, A.K.; Choudhury, S. 2005. NOAA-AVHRR detects thermal anomaly associated with 26 January, 2001 Bhuj Earthquake, Gujarat, India. Int. J. Remote Sens., 26, 1065-1073.
- Saraf, A.K.; Rawat, V.; Banerjee, P.; Choudhury, S.; Panda, S.K.; Dasgupta, S.; Das, J.D. 2008. Satellite detection of earthquake thermal precursors in Iran. Nat. Hazard, 47, 119-135.
- Saraf, A. K.; S. Choudhury and S. Dasgupta. 2006. Satellite observations of the great mega thrust Sumatra earthquake activities, International Journal of Geoinformatics, Vol. 1, No. 4, pp. 67-74.
- Schmidt, D.A.; Bürgmann R. 2006. InSAR constraints on the source parameters of the 2001 Bhuj earthquake. Geophys. Res. Lett., 33, L02315.
- Segall, P. 2010. Earthquake and Volcano Deformation, Princeton University Press, 424 p.
- Segall, P.; и Davis, J.L. 1997. GPS applications for geodynamics and earthquake studies, Annual Reviews of Earth and Planetary Science, 25, p. 301-36.
- Serebryakova O.N., Bilichenko S.V., Chmyrev V.M., Parrot M., Rauch J.L., Lefeuvre F., Pokhotelov O.A. 1992. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low- altitude satellites // Geophys. Res. Lett. 19, 91-94.

- Singh, R.P.; Bhoi, S.; Sahoo, A.K. 2002. Changes observed on land and ocean after Gujarat earthquake of January 26, 2001 using IRS data. *Int. J. Remote Sens.*, 23, 3123-3128.
- Singh, R.P.; Ouzounov, D. 2003. Earth Processes in Wake of Gujarat Earthquake Reviewed from Space. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, 84, 244.
- Singh, R.P.; Cervone, G.; Kafatos, M.; Prasad, A.K.; Sahoo, A.K.; Sun, D.; Tang, D.L.; Yang, R. 2007. Multi-sensor studies of the Sumatra earthquake and tsunami of 26 December 2004. *Int. J. Remote Sens.*, 28, 2885-2896.
- Singh, R.P., Mehdi W. and Sharma M. 2010. Complementary nature of surface and atmospheric parameters associated with Haiti earthquake of 12 January 2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1299–1305,
- Sorokin, V.M. and Chmyrev, V.M. 1999. Modification of the Ionosphere by Seismic Related Electric Field // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Ed. M. Hayakawa., Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo. P.805 - 818.
- Sorokin V.M., Yaschenko A.K. 2000. Electric field disturbance in the earth – ionosphere layer // *Adv. Space Res.* Vol. 26, No. 8, pp. 1219-1223.
- Sorokin V. M., Chmyrev V. M., and Hayakawa M. 2000. The Formation of Ionosphere - Magnetosphere Ducts Over the Seismic Zone // *Planet. Space Sciences*. V.48. P.175.
- Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. 2001. Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 63, 1681–1691.
- Sorokin V.M., Chmyrev V.M., and Yaschenko A.K. 2003. Ionospheric generation mechanism of geomagnetic pulsations observed on the Earth's surface before earthquake // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V.64. P.21-29.
- Sorokin V.M., Fedorov E.N., Schekotov A.Yu., Molchanov O.A. and Hayakawa M. 2004. Depression of the ULF geomagnetic pulsation related to ionospheric irregularities // *Annals of Geophysics*. V.47. No1. P.191-198.

- Sorokin V.M., Isaev N.V., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., and Hayakawa M., 2005a. Strong DC electric field formation in the low latitude ionosphere over typhoons. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, 1269-1279.
- Sorokin, V.M., Chmyrev, V.M., Yaschenko, A.K. 2005b. Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **67**, 1259-1268.
- Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., and Hayakawa M., 2005c. DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 661-666.
- Sorokin V.M., Pokhotelov O.A., 2005. Gyrotropic waves in the mid-latitude ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, 921-930.
- Sorokin V.M., Yaschenko A.K., and Hayakawa M., 2006. Formation mechanism of the lower ionosphere disturbances by the atmosphere electric current over a seismic region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V.68. No.11. P.1260-1268.
- Sorokin V.M., Chmyrev V.M., and Yaschenko A.K., Possible DC electric field in the ionosphere related to seismicity. *Advances in Space Research*, 2006, 37, 666-670.
- Sorokin, V.M., Yaschenko, A.K., Hayakawa, M. 2007. A perturbation of DC electric field caused by light ion adhesion to aerosols during the growth in seismic-related atmospheric radioactivity. *Nat. Haz. Earth Syst. Scien.* **7**, 155-163.
- Sorokin V.M., Hayakawa M. 2008. On the generation of narrow-banded ULF/ELF pulsations in the lower ionospheric conducting layer // *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, a06306, doi:10.1029/2008ja013094
- Sorokin V. M., Sergeev I. Yu., Pokhotelov O. A., 2009. Low latitude gyrotropic waves in a finite thickness ionospheric conducting layer. *Journal of Atmosphere and Solar – Terrestrial Physics*. V.71. P.175-179.
- Sorokin V.M., Chmyrev V.M. 2010. Atmosphere – ionosphere electrodynamic coupling. In “The Atmosphere and Ionosphere: Dynamics, Processes and Monitoring”. (Eds.: V.L. Bychkov, G.V. Golubkov, A.I. Nikitin). Springer. P.97-146. ISBN: 978-90-481-3211-9

- Sorokin V. M., Pokhotelov O. A. 2010. Generation of ULF geomagnetic pulsations during early stage of earthquake preparation. *Journal of Atmosphere and Solar – Terrestrial Physics*. V.72. P.763-766.
- Sorokin V. M., Pokhotelov O. A. 2010. The effect of wind on the gravity wave propagation in the Earth's ionosphere. *Journal of Atmosphere and Solar – Terrestrial Physics*. V.72. P.213-218.
- Sorokin V.M., Ruzhin Yu.Ya., Yaschenko A.K., Hayakawa M. 2011a. Generation of VHF radio emissions by electric discharges in the lower atmosphere over a seismic region. // *Journal of Atmosphere and Solar – Terrestrial Physics*. V.73, pp.664-670.
- Sorokin V.M., Ruzhin Yu.Ya., Kuznetsov V.D., Yaschenko A.K. 2011b. Model of electric discharges formation in the lower atmosphere over a seismic region. // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. pp.1-14.
- Sorokin V.M., Ruzhin Yu.Ya., Yaschenko A.K., Hayakawa M. 2012. Seismic – related electric discharges in the lower atmosphere. In.: *The frontier of earthquake prediction studies*. Editor M.Hayakawa. Nihon-Senmontosho-Shuppan. Tokyo. Japan. P.592-611. ISBN978-4-931507-16-6.
- Sorokin V.M., Hayakawa M. 2013. Generation of seismic-related DC electric fields and lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling, *Modern Applied Science*, V.7, No6, P.1-25.
- Sorokin V.M., Pokhotelov O.A. 2013. Model for the VLF-LF radio signal anomalies formation associated with earthquakes // *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.048>
- Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M. 2014. VHF transmitter signal scattering on seismic related electric discharges in the troposphere // *Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics*, V.109, P.15-21.
- Stramondo, S.; Moro, M.; Tolomei, C.; Cinti, F.R.; Doumaz, F. 2005. InSAR surface displacement field and fault modelling for the 2003 Bam earthquake (southeastern Iran). *J. Geodynamics* 40, 347-353.

- Subarya, C.; Chlieh, M.; Prawirodirdjo, L.; Avouac, J.-P.; Bock, Y.; Sieh, K.; Meltzner, A.J.; Natawidjaja, D.H.; McCaffrey R. 2006. Plate-boundary deformation associated with the great Sumatra-Andaman earthquake. *Nature* 440, 46-51.
- Surkov V., Pilipenko V. 1999. The physics of pre-seismic electromagnetic ULF signals // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Ed. M. Hayakawa. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB). Tokyo. P.357.
- Tengfei Ma and Zhongliang Wu, 2012. Precursor-Like Anomalies prior to the 2008 Wenchuan Earthquake: A Critical-but-Constructive Review, *International Journal of Geophysics*, vol. 2012, Article ID 583097, 13 p.. doi:10.1155/2012/583097
- Tertyshnikov A.V. 1996. The variations of ozone content in the atmosphere above strong earthquake epicenter // *Physics of solid Earth*. V.31. P.789-794.
- Thomas J.N., Love J.J., Komjathy A., Verkhoglyadova O.P., Butala M., Rivera N. 2012. On the reported ionospheric precursor of the 1999 Hector Mine, California earthquake // *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06302, doi:10.1029/2012GL051022.
- Tobita, M.; Fujiwara, S.; Ozawa, S.; Rosen, P.A.; Fielding, E.J.; Werner, C.L.; Murakami, M.; Nakagawa, H.; Nitta, K.; Murakami, M. 1998. Deformation of the 1995 North Sakhalin earthquake detected by JERS-1/SAR interferometry. *Earth Planets Space*, 50, 313-325.
- Tramutoli, V. 1998. Robust AVHRR Techniques (RAT) for environmental monitoring: Theory and applications. In *Earth Surface Remote Sensing II*; Cecchi, G., Zilioli, E. Eds; SPIE proceedings series: Barcelona, Spain, Vol. 3496, p. 101-113.
- Tramutoli, V.; Bello, G.D.; Pergola, N.; Piscitelli, S. 2001. Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas. *Ann. Geofis.*, 44, 295-312.
- Tramutoli, V.; Cuomo, V.; Filizzola, C.; Pergola, N.; Pietrapertosa, C. 2005. Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas. The case of Kocaeli (İzmit) earthquake, August 17th, 1999. *Remote Sens. Environ.*, 96, 409-426.
- Tronin, A.A. 1996. Satellite thermal survey—a new tool for the studies of seismoactive regions. *Int. J. Remote Sens.*, 17, 1439-1455.

- Tronin A.A. 2000. Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in China. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 16, p. 3169-3177.
- Tronin, A.A. 2002. Atmosphere-lithosphere coupling. Thermal anomalies on the Earth surface in seismic processes. In *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*; Hayakawa, M., Molchanov, O.A. Eds; TERRAPUB, Tokyo, Japan, p.173-176.
- Tronin, A.A.; Hayakawa, M.; Molchanov, O.A. 2002. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China. *J. Geodynamics*, 33, 519-534.
- Tronin, A.A.; Biagi, P.F.; Molchanov, O.A.; Khatkevich, Y.M.; Gordeev, E.I. 2004. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area. *Phys. Chem. Earth*, 29, 501-506.
- Tronin, A.A. 2006. Remote sensing and earthquakes: A review. *Phys. Chem. Earth*, 31, 138-142.
- Tronin A.A. 2010. *Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review. Remote Sensing*, 2(1):124-150.
- Tsai, Y.B.; Liu, J.Y.; Ma, K.F.; Yen, H.Y.; Chen, K.S.; Chen, Y.I.; Lee, C.P. 2006. Precursory phenomena associated with the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan as identified under iSTEP Program. *Phys. Chem. Earth*, 31, 365-377.
- Uyeda, S.; Nagao, T.; Kamogawa, M. 2009. Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics. *Tectonophysics*, 470, 205-213.
- Vallianatos, F., Nomicos, K., 1998. Sismogenic radioemissions as earthquake precursors in Greece, *Physics and Chemistry of the Earth*, 23(9-10), 953-957.
- Varotsos, P., 2001. A review and analysis of electromagnetic precursory phenomena, *Acta Geophysica Polonica* 49, No.1, 1-42.
- Vershinin, E. F., A. V. Buzevich, K. Yumoto, K. Saita, and Y. Tanaka, 1999: Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kam-

- chatka region. In: Hayakawa M. (Ed.), *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, TERRAPUB, Tokyo, 513-517p.
- Virk, H. S., Singh, B. 1994. Radon recording of Uttarkashi earthquake. *Geophys. Res. Lett.* **21**, 737-741.
- Voitov, G.I., Dobrovolsky, I.P. 1994. Chemical and isotope - carbonic instability of the soil gases in the seismic regions. *Izvestiya AN SSSR, Fizika Zemli.* №3, 20-27.
- Wang, L.; Shum C. K.; Simons F. J.; Tapley B. and Dai C. 2012. Coseismic and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake constrained by GRACE gravimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L07301, doi:10.1029/2012GL051104.)
- Wei, L.; Guo, J.; Liu, J.; Lu, Z.; Li, H.; Cai, H. 2009. Satellite Thermal Infrared Earthquake Precursor to the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake in Sichuan, China, and its Analysis on Geodynamics. *Acta Geol. Sinica-Engl. Ed.*, 83, 4, 767-775.
- Williams, E.R., 1989. The Electrification of thunderstorms, *J. Geophysical Research*, 93(D6), 992-993.
- Lixin Wu and Shanjun Liu. 2009. Remote Sensing Rock Mechanics and Earthquake Thermal Infrared Anomalies, *Advances in Geoscience and Remote Sensing*, Gary Jedlovec (Ed.), ISBN: 978-953-307-005-6, InTech, DOI: 10.5772/8292. Available from: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-geoscience-and-remote-sensing/remote-sensing-rock-mechanics-and-earthquake-thermal-infrared-anomalies>
- Xuemin Zhang and Xuhui Shen. 2011. Electromagnetic Anomalies around The Wenchuan Earthquake and Their Relationship with Earthquake Preparation, *International Journal of Geophysics*, vol. 2011, Article ID 904132, 8 pages,. doi:10.1155/2011/904132
- Yasuda, Y., Y. Ida, T. Goto, and M. Hayakawa, 2009. Interferometric direction finding of over-horizon VHF transmitter signals and natural VHF radio emissions possibly associated with earthquakes, *Radio Science*, 44, RS2009, doi:10.1029/2008RS003884.

- Yasuoka Y., Igarashi G., Ishikawa T., Tokonami S., Shinogi M. 2006. Evidence of precursor phenomena in the Kobe earthquake obtained from atmospheric radon concentration // *Appl. Geochem.* 21, 1064-1072.
- Yokoyama, T., Yamamoto, M., Pfaff, R.F., Fukao, S., Iwagami, N., 2002. SEEK-2 campaign measurement of the electric field in the E-region and its association with the QP echoes. Abstracts for 112th SGEPS Fall Meeting. Tokyo. Univ. of Electro-Comm., 12-13
- Yonaiguchi, N., Y. Ida, M. Hayakawa, and S. Masuda, 2007a. A comparison of different fractal analyses for VHF electromagnetic emissions and their self-organization for the off-sea Miyagi-prefecture earthquake, *Natural Hazards Earth System Sci.*, vol. 7, 485-493.
- Yonaiguchi, N., Y. Ida, M. Hayakawa, and S. Masuda, 2007b. Fractal analysis for VHF electromagnetic noises and the identification of preseismic signature of an earthquake, *J. Atmos. Solar-terr. Phys.*, vol. 69, 1825-1832.
- Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Krankowski, A., et al. 2007. Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of September 25, 2003 (M = 8.3). *Studia Geophysica et Geodaetica* 51, 267–278.
- Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Tepenitzina N.Yu., Krankowski A. 2008. Anomalous Modification of the Ionospheric Total Electron Content Prior to the 26 September 2005 Peru Earthquake. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V.70. P.1919-1928.
- Zhang X., Zeren Z., Parrot M., Battiston R., Qian J., Shen X. 2011. ULF/ELF ionospheric electric field and plasma perturbations related to Chile earthquake // *Adv. Space Res.* 47, 99.
- Zhao, Y., Qian, F., 1997. Earthquake lights: a very convincing evidence for energy transfer from earth to air, Intern.Workshop on Seismo-Electromagnetics (Abstracts), NASDA, Tokyo 242.
- Zolotov O.V., Namgaladze A.A., Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Martynenko O.V. 2008. Simulations of the equatorial ionosphere to the seismic electric field

sources. // Proceedings of the 7th International Conference "Problems of Geocosmos" (St. Petersburg, Russia, 26-30 May 2008) P.492-496.

Zoran M., 2012. MODIS and NOAA-AVHRR 1 and surface temperature data detect a thermal anomaly preceding the 11 March 2011 Tohoku earthquake International Journal of Remote Sensing, Vol. 33, Issue 21, 6805-6817.



Валерий Михайлович Сорокин

Доктор физико – математических наук, профессор.

Заведующий лабораторией Теории электромагнитных полей.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), Российской академии наук.

В 1969 году закончил факультет Теоретической и экспериментальной физики Московского инженерно - физического института по специальности Теоретическая ядерная физика.

Основное направление исследований – электродинамика ионосферной плазмы, волновые процессы и активные воздействия в системе атмосфера – ионосфера, теоретические исследования электродинамических процессов в системе атмосфера – ионосфера, возникающих в результате воздействия на нее катастрофических явлений естественной и антропогенной природы, таких как землетрясения, тайфуны, солнечные вспышки, сильные взрывы и т.п. Работает в этой области с 1971 года, имеет более 180 научных статей и 6 монографий.

Адрес: 142190, Москва, Троицк, Калужское шоссе 4, ИЗМИРАН.
Телефон: +7-499-400-6202; Факс: +7-495-851-0124
E-mail: sova@izmiran.ru; URL: <http://www.izmiran.ru/~sova>



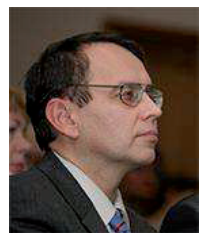
Виталий Михайлович Чмырев

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.

Институт физики Земли, Российской Академии наук.

По окончании Физического факультета Ленинградского университета В.М.Чмырев поступил на работу в Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, где закончил аспирантуру, защитил кандидатскую диссертацию и продолжил научную деятельность в качестве младшего научного сотрудника, руководителя лаборатории, начальника отдела и заместителя директора Института. В 1996 г. он защитил докторскую диссертацию в Институте физики Земли РАН.

В.М.Чмырев является автором и соавтором более 100 работ, опубликованных в реферируемых российских и международных научных журналах, по проблемам распространения и взаимодействия волн в космической плазме и эффектам воздействия крупномасштабных природных и техногенных катастроф на атмосферу, ионосферу и магнитосферу Земли.



Андрей Аркадьевич Тронин

Доктор геолого-минералогических наук.

Проработал в общей сложности 30 лет в Институте космоэрогеологических методов Министерства геологии, а с 1996 г. в Санкт-Петербургском центре экологической безопасности Российской академии наук, занимая позиции от младшего научного сотрудника в начале карьеры до заместителя директора института. Его научная активность лежит в области сейсмологии и дистанционного зондирования Земли из космоса. Трониным получены фундаментальные научные результаты по изменению температуры поверхности Земли в связи с сейсмической активностью, разработаны спутниковые методы изучения землетрясений в инфракрасном тепловом диапазоне.

Он является автором более 50 публикаций в реферируемых научных журналах, научный индекс цитирования его работ составляет 545 (полный) и 31 (за 2013 г.)

Люблю **КНИГИ**
ljubljudknigi.ru



yes i want morebooks!

Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн - в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов! Мы используем экологически безопасную технологию "Печать-на-Заказ".

Покупайте Ваши книги на
www.ljubljudknigi.ru

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.get-morebooks.com

VDM Verlagsservicegesellschaft mbH

Heinrich-Böcking-Str. 6-8
D - 66121 Saarbrücken

Telefon: +49 681 3720 174
Telefax: +49 681 3720 1749

info@vdm-vsg.de
www.vdm-vsg.de

