КОПИЯ ФОРМЫ 503

3.1. Номер проекта

12-02-31043

3.2. Название проекта

Явление магнитогравитационных волн в земной ионосфере

3.3. Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы

05-651 02-440

3.4 Объявленные ранее цели проекта на 2013 год

В соответствии с заявленным календарным планом работ, в 2013 году было запланировано получение результатов в рамках следующих задач:

1. Оценка возможности распространения МГВ в ионосфере в условиях почти вертикального (субавроральная область) и горизонтального геомагнитного поля (приэкваториальная область) и степень соответствия экспериментальным данным параллельных наблюдений ионосферных и магнитных возмущений.

2. Обнаружение магнитогравитационных волн по данным о вариациях концентрации ионосферного слоя F2 и магнитным наблюдениям во время высокоэнергичных геофизических событий.

3. Теоретический анализ возможности генерации МГВ различными источниками (тепловым, пондеромоторным, движением границы ионизации). Экспериментальная проверка полученных результатов.

4. Поляризационные соотношения МГВ, детальное сопоставление с экспериментальными данными о возмущениях концентрации ионосферного слоя F2 и возмущениях магнитного поля.

5. Определение характерных особенностей распределения поля магнитогравитационных волн вдоль меридиональных и широтных направлений.

6. Количественная связь между вариациями ключевых гелиогеофизических параметров и классами ионосферной возмущенности.

7. Методика прогноза ионосферной возмущенности на основе значений индекса ионосферной активности. Прогнозирование возмущений, вызванных распространением МГВ на больших расстояниях, генерируемых высокоэнергичными источниками естественного и искусственного происхождения.

3.5 Степень достижения поставленных в проекте целей

Целью данного проекта на 2013 год являлось изучение возможности генерации и распространения магнитогравитационных волн (МГВ) в периоды развития высокоэнергичных геофизических событий. Все заявленные задачи в рамках поставленной цели выполнены и полученные результаты представлены в данном отчете. Приведем кратко основные достигнутые результаты.

1. Получены аналитические оценки возможности распространения МГВ в субавроральной (вертикальное магнитное поле) и приэкваториальной (горизонтальное магнитное поле) областях ионосфры (пункт 1 раздела 3.6, пункт 1 приложения 1). Продемонстрировано соответствие установленных параметров МГВ экспериментальным наблюдениям этих волн в одновременных ионосферных и магнитных возмущениях (пункты 1 и 2 раздела 3.6, пункты 1 и 2 приложения 1).

2. Во время высокоэнергичных геофизических событий (землетрясения с магнитудой > 6.5 баллов по шкале Рихтера) обнаружено прохождение МГВ в приэкваториальной области ионосферы регистрируемых по данным о вариациях концентрации ионосферного слоя F2 и одновременным магнитным наблюдениям (пункт 2 раздела 3.6, пункт 2 приложения 1).

3. Изучена генерация МГВ токовым источником и источником вещества в рамках магнитогидродинамического (МГД) подхода с учетом поля гравитации и силы Ампера для среды с конечной проводимостью. Полученные аналитические результаты проверены на примере уникального высокоэнергичного события - пролета метеорита Челябинск, произошедшего 15 февраля 2013 г (пункт 3 раздела 3.6, пункт 3 приложения 1).

4. Получены поляризационные соотношения для МГВ в приэкваториальной области ионосферы. Выполнены оценки значений возмущения плотности, давления и магнитного поля в среде, генерируемых реалистичными высокоэнергичными источниками (пункт 4 раздела 3.6, пункт 4 приложения 1).

5. Определены характерные особенности распределения поля МГВ вдоль меридиональных и широтных направлений на основе анализа зависимостей в пространстве волновых векторов. Полученные результаты сопоставлены с реальными событиями (землетрясения) (пункт 5 раздела 3.6, пункт 5 приложения 1).

6. Установлена степень влияния вариаций индекса AE, длинноволнового рентгеновского излучения и горизонтальной компоненты геомагнитного поля на уровень возмущенности среднеширотной ионосферы, оцениваемый по значениям индекса ионосферной активности IAI и определен вклад каждого из этих параметров в уровень возмущенности ионосферы (пункт 6 раздела 3.6, пункт 6 приложения 1).

7. Разработана методика краткосрочного прогноза ионосферной возмущенности (индекса IAI) с учетом установленного вклада выше упомянутых гелиогеофизических параметров. Заявлена возможность использования этой методики для целей прогноза МГВ, генерируемых высокоэнергичными источниками естественного и искусственного происхождения (пункт 7 раздела 3.6, пункт 7 приложения 1).

3.6 Полученные в 2013 году важнейшие результаты

1. Показана возможность распространения МГВ в субавроральной и приэкваториальной областях ионосферы. Полученые результаты сопоставлены с экспериментальными данными одновременных наблюдений за вариациями критических частот ионосферы и возмущений геомагнитного поля. Часть выводов, касающихся возможности распространения МГВ в субавроральной области ионосферы, были уже представлены в промежуточном отчете. Решение этой задачи выполнено в рамках МГД подхода при учете совместного влияния магнитного поля и силы тяжести в условиях конечной проводимости. Такие условия выполняются в ионосфере начиная с высот порядка 250 км.

Получены дисперсионные уравнения и проанализированы дисперсионные кривые МГВ для субавроральной ионосферы области на высотах порядка 250 км (слой F2). Значения выбранных параметров соответствовали ионосферной модели MSIS-E. Согласно дисперсионным кривым возможно распространение двух мод МГВ. Первая мода имеет распространение вдоль вертикального магнитного поля при любых азимутальных углах. Вторая мода МГВ распространяется также и под углом к вертикали. Скорости распространяющихся мод МГВ лежат в интервале 3000 - 4000 м/с.

В приэкваториальной области ионосферы с практически горизонтальным геомагнитным полем согласно полученным дисперсионным уравнениям существуют две быстрые и одна медленная моды МГВ. Первая мода может распространяться вертикально вниз без заметного затухания независимо от азимутального направления в частотном диапазоне до 0.5 Гц. Скорость первой моды не зависит от азимутальной ориентации волнового вектора и в горизонтальном направлении минимальна. Вторая мода МГВ распространяется только вертикально вверх при любых азимутальных углах в частотном диапазоне до 0.5 Гц для длин волн превышающих 10 км. Третья (медленная) мода МГВ более низкочастотна и распространяется при любых значениях азимутального угла. Скорость ее распространения возрастает от нуля до максимального значения при изменении полярного угла от

вертикали к горизонтали. Увеличение значений азимутального угла от 0 до 90° ведет расширению диапазона частот от 0.03 Гц до 0.08 Гц для этой распространяющейся моды с длинами волн свыше 10 км. Скорости распространения первой моды составляют значения от 4200 м/с в случае почти вертикального распространения до 900 м/с при почти горизонтальном распространении независимо от длины волны. При горизонтальном распространении волн порядка 75 км скорость максимальна и имеет значение около 1300 м/с; минимальное значение скорости около 200 м/с для длин волн порядка 8 км. Для вертикально распространяющейся второй моды значения фазовой скорости порядка 4200 м/с для всего рассматриваемого диапазона длин волн. Фазовые скорости третьей моды меняются в диапазоне 150 - 1200 м/с. Они убывают с уменьшением длины волны и растут с увеличением значения угла θ.

Сопоставление одновременных максимумов интенсивности динамических спектров магнитных и плазменных возмущений свойственных МГВ по данным станций вдоль геомагнитного меридиана, свидетельствует об их возбуждении восточным электроджетом в периоды суббурь и распространении к средним широтам. Оценки скоростей переноса МГВ по экспериментальным данным дают значения свыше 2000 м/с. Характерные регистрируемые частоты МГВ находятся в диапазоне 10^(-4) ÷ 4*10^(-4) Гц. В соответствии с полученными дисперсионными кривыми для МГВ в авроральной области, в этом частотном диапазоне возможно существование первой (быстрой) моды МГВ при продольном распространении и второй (медленной) моды при распространении под углом к магнитному полю. Характрерные масштабы длин волн МГВ при этом свыше 10 км.

2. Обнаружены МГВ по данным о вариациях концентрации ионосферного слоя F2 и магнитным наблюдениям во время высокоэнергичных геофизических событий двух сильных подземных землетрясений, произошедших 8 января 2006 и 17 июля 2006 (более 6,5 баллов по шкале Рихтера) на западном побережье Индонезии. Сопоставление максимумов интенсивности плазменных и магнитных возмущений в частотном диапазоне 10-5÷10-3 Гц за три дня до и три дня после событий показывает отсутствие их синхронности, что свидетельствует о низком уровне МГВ активности в данный период. За два дня до и спустя два дня после землетрясений количество наблюдаемых синхронных возмущений ионосферной плазмы и компонент геомагнитного поля возрастает. В день землетрясений наблюдается ослабление МГВ активности, однако отмечено увеличение интенсивности колебаний критической частоты спорадического слоя Es в течение двух часов перед землетрясением 8 января и в течение 8 часов перед землетрясением 17 июля. Другой особенностью является возникновение синхронных плазменных возмущений, связанных с прохождением волн акустико-гравитационного типа.

3. Выполнен анализ возможности генерации МГВ различными источниками (тепловым, пондеромоторным, движением границы ионизации) и проведено сопоставление с эспериментальными данными. В соответствии с поставленной задачей ЛЛЯ спектральных приэкваториальной области ионосферы выполнено исследование особенностей МГВ, генерируемых тепловым, токовым и источником вещества задаваемыми двумерным гауссовым распределением. Численные эксперименты по решению МГД уравнений с источниками подтвердили возможность генерации МГВ и позволили установить параметры рассматриваемых источников, при которых значения спектральных компонент смещений среды будут максимальны. Для источника вещества наиболее эффективным является эллиптического сечения длинный горизонтальный шнур, ориентированный перпендикулярно магнитному полю и силе тяжести с радиусами порядка 800 м вдоль силы тяжести и порядка 2 км вдоль магнитного поля. Максимальные значения спектральных компонент смещений среды достигаются при генерация МГВ на частоте порядка 0.7 Гц. Характерные масштабы излучаемых волн составляют порядка 10 км для вертикальных длин волн и порядка 40 км для горизонтальных длин волн. В случае генерации МГВ источником распределенного тока, установлено, что наиболее эффективно эти волны излучает цилиндрический токовый шнур, ориентированный также ка и источник вещества, причем амплитуды спектральных компонент смещений возрастают с уменьшением радиуса шнура. При радиусе в 1 км наиболее успешно генерируются волны с горизонтальными и вертикальными масштабами порядка 15 км и 50 км, соответственно. Генерация МГВ происходит наиболее эффективно на частоте порядка 0.04 Гц, которая является более низкой по сравнению с источником вещества (0.07 Гц).

Экспериментальное подтверждение существования МГВ генерируемых источником вещества получено при анализе последствий падения метеорита «Челябинск» на земную поверхность 15 февраля 2013 года в 09.20 LT в результате торможения в атмосфере Земли небольшого астероида. Согласно результатам выполненного нами по данным станций Новосибирск, Арти и Томск динамического спектрального анализа одновременных плазменных и магнитных возмущений отмечается повышенный уровень геомагнитной возмущенности в области, близкой к падению метеорита (Новосибирск) в течение всего дня. Вместе с тем, отмечается отдельное интенсивное возмущение продолжительностью порядка 4 часов, начавшееся приблизительно через 40 минут после пролета метеорита. В это же время имели место два последовательных возмущения критической частоты ионосферного слоя F2, отвечающие двум последовательным медленным МГВ со скоростями порядка 600 м/с и 200 м/с, соответственно. Преимущественное направление распространения первой волны на юго-восток, и направление распространения второй волны - на северо-запад. Отметим, что спустя 5 часов после события на станции Томск наблюдалась акустико-гравитационная волна, распространявшаяся со скоростью порядка 120 м/с.

4. Получены поляризационные соотношения МГВ в приэкваториальной области и выполнено сопоставление возмущений плотности *R*, давления *P* и магнитного поля *G* с соответствующими экспериментальными данными. Согласно численным расчетам наибольшие значения давления, плотности и магнитного поля достигаются при равных масштабах источника в 1 км вдоль геомагнитного поля и поля гравитации. При этом значения горизонтальных длин волн имеют порядок 7-8 км и значения вертикальных длин волн - 40 км. Эти результаты согласуются с ранее сделанными выводами относительно размеров источников наиболее эффективных для генерации МГВ.

Расчет возмущенных значений спектральных составляющих давления, плотности и магнитного поля в приэкваториальной ионосфере проводился для следа радиусом 10^(4) см от метеора с эффективной массой порядка 1.6.10^(8) г, который летит перпендикулярно магнитному полю и гравитации без потери высоты со скоростью 4·10⁽⁴⁾ см/с [Голицын Г.С., Григорьев Г.И., Докучаев В.П. Изучение акустикогравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Физика Атмосферы и Океана, Т.13, №9, с.926-935, 1977]. Аналогичный расчет при генерации МГВ токовым источником, выполнялся для параметров экваториальной токовой струи, диаметр которой порядка 400 км и максимальные значения плотности тока в на высоте 100 км находятся в интервале 2÷9 мкА/м^2 [Беспалов П.А., Савина О.Н. Экваториальная токовая струя и ее отклик на внешние электромагнитные воздействия // Изв. ВУЗов Радиофизика, Т.55, №4, с.237-254, 2012]. В результате можно отметить ряд особенностей. В случае генерации МГВ токовым источником значения спектральных компонент возмущений плотности среды максимальны на длине волны порядка 200 км. Для случая генерации МГВ выбранным источником вещества спектральных компоненты возмущений плотности и магнитного поля имеют максимумы на длине волны порядка 1.2 км, и давления - на длине волны порядка 800 м. Сопоставление зависимостей спектральных компонент среды и

магнитного поля от значений горизонтальных длин волн вычисленных для рассматриваемых источников, демонстрирует сходное поведение. Для токового источника спектральные компоненты давления, плотности и магнитного поля имеют наибольшее значение на горизонтальных длинах волн порядка 13-15 км, а для источника вещества - на длинах волн порядка 7.5 – 8 км.

5. Характерные особенности распределения поля МГВ волн вдоль меридиональных и широтных направлений в приэкваториальной области ионосферы определены при анализе пространства волновых векторов. Согласно полученным результатам, резонансные направления распространения МГВ для обеих распространяющихся мод близки к вертикальному направлению. Пространство волновых векторов для второй моды в отличие от первой не зависит от частоты. Размер источника вдоль геомагнитного поля для наиболее эффективной генерации МГВ не должен превышать 600 м. Вместе с тем, возможно распространение возбуждаемой источником второй моды с горизонтальным размером не менее 800 м под углом порядка 25° к вертикали. Отмечаемые направления распространяющихся МГВ согласуются с выводами, полученными из анализа дисперсионных кривых для МГВ в приэкваториальной области. Экспериментальные оценки направления распространения МГВ в приэкваториальной области были выполнены на основе динамического спектрального анализа геомагнитных возмущений вблизи эпицентров двух землетрясений магнитудой более 6.5 баллов по шкале Рихтера. Продемонстрирована возможность горизонтального распространения МГВ от этих источников в любых направлениях.

между вариациями индекса 6. Установлена количественная СВЯЗЬ авроральной возмущенности (АЕ), значениями длинноволнового рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å (XL) и значениями горизонтальной компоненты геомагнитного поля, т.е. ключевыми гелиогеофизическими параметрами, и классами ионосферной возмущенности (индексом IAI). Для решения данной задачи разработаны методики классификации этих параметров и выполнена очистка значений индекса IAI от возмущений связанных с прохождением терминатора. Полученные результаты свидетельствуют о наличии связи индексированных гелиогеофизических параметров с индексом IAI. Оценка степени вклада авроральной возмущенности в индекс IAI дает величину порядка 10%, величина вклада геомагнитной возмущенности в эти значения составляет порядка 20%, и степень вклада длинноволнового рентгеновского излучения в индекс IAI составляет около 10%. Таким образом, изменения во всех заявленных гелиогеофизических параметрах действительно находят свое отражение в значениях предложенного нами индекса IAI. В целом, суммарный вклад авроральной возмущенности, геомагнитной возмущенности и возмущенности вызванной воздействием длинноволнового рентгеновского излучения в ионосферную возмущенность составляет около 40%.

7. Создана методика прогноза ионосферной возмущенности на основе значений индекса активности и заявлена возможность прогнозирования возмущений, ионосферной вызванных распространением ΜΓΒ больших расстояниях, генерируемых на высокоэнергичными источниками естественного и искусственного происхождения. В качестве инструмента для осуществления прогноза значений ІАІ были использованы нейросетевые технологии, которые включали в себя нейронную сеть прямой передачи, сеть Элмана и нейронечеткую сеть FUZZY. В качестве дополнительных параметров были использованы индекс AE, интенсивность длинноволнового рентгеновского излучения XL и горизонтальная составляющая геомагнитного поля (MF) за 1986 г. Сделан вывод о возможности эффективного краткосрочного прогнозирования значений индекса IAI. Предпочтительным является тип нейросети прямой передачи со следующими входными

параметрами: первая производная индекса IAI и комбинация пары параметров: горизонтальная составляющая геомагнитного поля плюс индекс AE, или горизонтальная составляющая геомагнитного поля плюс интенсивность длинноволнового рентгеновского излучения. В этом случае эффективность прогноза составляет 75%. Полученные результаты по определению ключевых гелиогеофизических параметров, оказывающих влияние на уровень возмущенности среднеширотной ионосферы, и сконструированная нейроная сеть, которая имеет оптимальную конфигурацю для прогноза состояния ионосферной активности могут быть использованы для прогноза МГВ, возбуждаемых высокоэнергичными геофизическими событиями.

3.7 Степень новизны полученных результатов

Выполненные в рамках данного проекта исследования являются продолжением научной деятельности коллектива участников проекта. Все результаты, которые получены по каждой заявленной задаче, являются новыми.

Первая задача была посвящена аналитической оценке возможности распространения МГВ в субавроральной и приэкваториальной областях ионосферы и проверке полученных результатов на основе экспериментальных данных. Для этого в уравнениях магнитной гидродинамики для среды с конечной проводимостью был выполнен учет совместного влияния силы тяжести и силы Ампера при двух различных ориентациях неаозмущенного магнитного поля (вертикального и горизонтального). Эта работа является продолжением исследований [Бархатова и др., 2009; Barkhatov at al., 2010; Barkhatova at al., 2011], где дисперсионные соотношения МГВ были получены для субавроральной ионосферной среды в условиях бесконечной проводимости. Выполненный в данной работе учет проводимости является этапом оригинальных исследований, конечной среды посвященных явлению переноса МГВ в ионосфере. Продемонстрированы отличия параметров МГВ в приэкваториальной области с преимущественной горизонтальной ориентаций геомагнитного поля от параметров МГВ для ионосферы высоких широт. Экспериментальная проверка возможности распространения МГВ в субавроральной области была выполнена на основе обновленного набора экспериментальных данных со станций вертикального зондирования и магнитных станций. Ранее возможность распространения МГВ от аврорального источника была изучена в работе [Бархатова и др., 2009] только на основе анализа ионосферной возмущенности по данным МНЧ (максимальных наблюдаемых частотах) на трассах наклонного зондирования ионосферы Инскип – Ростов-на-Дону и Кипр – Ростов-на-Дону. Вместе с тем, в рамках решения данной задачи, анализ вариаций плазменной возмущенности слоя F2 был впервые дополнен анализом одновременных данных о вариациях горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Такой подход позволил более ответственно определять возмущения, связанные с переносом МГВ.

В рамках решения второй задачи был выполнен поиск МГВ в приэкваториальной области во времена развития двух сильных землетрясений. Ранее нами выполнялось обнаружение МГВ только в авроральной области ионосферы [Бархатова и др., 2009, Бархатов и др., 2012]. При этом предполагалось возбуждение этих волн восточным электроджетом. В данных исследованиях были рассмотрены новые высокоэнергичные источники генерации МГВ и выполнено экспериментальное подтверждение их существования в другой (приэкваториальной) области ионосферы.

Исследования, выполненные при решении третьей и четвертой задач проекта, были направлены на изучение возможности генерации МГВ модельными источниками и оценку значений спектральных характеристик параметров среды на основе поляризационных соотношений. В выполненных нами ранее исследованиях [Бархатова и др., 2009;

Вагкhatov at al., 2010; Barkhatova at al., 2011, Бархатов и др., 2012] решались задачи только о распространении МГВ. Задачи, связанные с возбуждением этих волн, решались в рамках данного проекта впервые на основе МГД уравнений с правой частью в виде источников вещества и силового источника от распределенного тока. Экспериментальная проверка возможности возбуждения МГВ в приэкваториальной области была проведена анализом уникального события – метеорного следа от метеорита Челябинск, падение которого на земную поверхность зарегистрировано 15 февраля 2013 г. Новым результатом является оценка значений возмущений плотности, давления и магнитного поля параметров среды при возбуждении МГВ реалистичными источниками в виде следа от метеорного болида и интенсивной экваториальной токовой струи. Все полученные на данном этапе аналитические и экспериментальные результаты являются новыми.

В рамках пятой задачи были аналитически определены резонансные направления распространения МГВ в приэкваториальной области. Ранее направления распространения МГВ определялись только на основе анализа экспериментальных данных одновременных ионосферных и магнитных возмущений в авроральной области ионосферы (результаты опубликованы в работе [Бархатов и др., 2012] и представлены в промежуточном отчете). Также новым результатом является определение характерных направлений учетом доминирующих ионосферных распространения ΜΓΒ с ветров В приэкваториальной области на основе одновременных наблюдений за вариациями критических частот и магнитными возмущениями в периоды развития двух землетрясений с магнитудой не менее 6 баллов по шкале Рихтера.

В рамках решения шестой и сельмой задачи с помощью введенного нами ранее индекса ионосферной активности ІАІ были определены ключевые гелиогеофизические параметры, которые оказывают наибольшее влияние на уровень возмущенности ионосферы средних широт. В выполненных нами ранее исследованиях [Бархатова и др., 2009] также проводилось установление конкретных параметров межпланетной среды и магнитосферы, которые влияют на текущее состояние авроарльной ионосферы. Новым обстоятельством в ланной работе является разработка методики класификации для каждого из рассматриваемых параметров. Также впервые установлено конкретное значение степени гелиогеофизических праметров уровень ионосферной вклада каждого ИЗ В возмущенности. По результатам проведенных исследований было выполнено нейросетевое прогнозирование значений индекса IAI, что потребовало разработки оригинального нейросетевого алгоритма.

3.8 Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Возмущения концентрации слоев ионосферной ионизации часто связаны с волновыми геофизические явлениями. сопровождающими высокоэнергичные события (землетрясения, цунами, нестабильность авроральных электроджетов и др.). Современные работы, в которых исследуются вопросы генерации и переноса волновых возмущений в ионосфере, в основном ограничиваются рассмотрением акустико-гравитационных волн (АГВ) разных пространственных масштабов [Hocke and Schlegel, 1996; Vlasov et al., 2011]. Однако наличие в атмосфере ионизованной компоненты создает условия для распространения в этой среде магнитогидродинамических (МГД) волн, вызывающих возмущения компонент геомагнитного поля. Обычно АГВ и МГД возмущения рассматриваются независимо друг от друга вследствие разных механизмов их переноса. Однако в работе [Сорокин и Федорович, 1982] было обращено внимание наличие стратификации ионосферы по плотности и степени ионизации и на существование условий для вовлечения как ионизованной, так и нейтральной компонент среды на отдельных этапах распространения волнового возмущения. При учете совместного влияния силы тяжести и магнитного поля можно показать возможность распространения в ионосфере магнитогравитационные волны (МГВ), которые представляют собой отдельный класс волновых возмущений. Их скорость, благодаря участию в процессе переноса магнитного поля, оказывается выше скоростей крупномасштабных АГВ, но ниже скорости МГД волн [Сорокин и Федорович, 1982; Бархатова и др., 2009, Бархатова и др., 2012]. Отметим, что в современных аналитических работах не выполняется учет магнитного поля при распространении волн в ионосферной среде. В основном подобные исследования посвящены вопросам моделирования перемещающихся ионосферных возмушений (ПИВ), которые вызываются различными источниками, в том числе АГВ [Kirchengast, 1997; Balthazor and Moffett, 1997; Sun et al., 2007]. В работах, касающихся экспериментального анализа ионосферной возмущенности, вызванной волновыми процессами, отсутствует сопоставление плазменных и магнитных возмущений, что важно для отделения МГВ от АГВ. Одним из направлений современных работ является обнаружение АГВ в областях полярной шапки и установление их характеристик [Cai et al., 2011; Manson et al., 2011]. Большинство других исследований направлено на определение масштабов и скоростей переноса среднемасштабных и крупномасштабных ПИВ (в том числе обусловленных прохождением АГВ) на основе использования данных наблюдений ионосферных радаров некогерентного рассеяния [Hocke at al., 1996; Vlasov et al., 2011]. В этой связи, решаемые в данном проекте задачи, направленные на изучение фундаментальной проблемы возникновения ионосферной возмущенности сопровождаемой магнитной, являются новыми и актуальными.

Выше было отмечено, что источниками волновых возмущений в ионосфере могут являться авроральные электролжеты в периоды магнитосферных суббурь [Afraimovich et al., 2000; Живетьев и др., 2005], высокоэнергичные геофизические события стихийного характера (например, землетрясения и цунами) [Смирнов, 2003; Liu et al., 2000; Dabas et al., 2007; Hickey et al., 2009; Perrone et al., 2010; Xu et. al., 2010; Liu et al., 2011], а также наземные и высотные взрывы, искусственный нагрев ионосферы [Альперович и др., 1985 (а, б, в); Алебастров и др., 1985; Нагорский, 1985], и др. Для обнаружения ионосферной возмущенности, связанной с развитием данных высокоэнергичных геофизических событий естественного и искуственного происхождения авторы используют данные со станций вертикального зондирования (критические частоты и высоты ионосферных слоев), GPS наблюдения и карты полного электронного содержания (TEC), а также методы наклонного и возвратно-наклонного зондирования, дополняемые использованием сейсмографов и оптических наблюдений. К сожалению, в работах по данной тематике полностью отсутствуют магнитные наблюдения в периоды рассматриваемых событий. Отметим, что авторы в некоторых работах регистрируют волновые явления, обладающие повышенными (более 1 км/с) по сравненеию с АГВ скоростями распространения, которые не могут объясняться в рамках теории акустико-гравитационных волн в связи с недостаточной для таких высоких скоростей температурой ионосферы. Однако в ряде работ отмечается, что в периоды подготовки землетрясения может иметь место усиление магнитной активности, которая может быть связана с излучением из очага будущего землетрясения потока холонов [CNews, 2006] (черенковских электронов). Поток холонов создает магнитные возмущения на пути из очага до ионосферы. В этом случае продолжительность магнитных возмущений и их интенсивность определяют магнитуду будущего землетрясения [Ахундов, 2004; Гусейнов 2001]. Детальные исследования, проведенные на орбитальных станциях искусственных спутников Земли, показали, что на низких и средних широтах наблюдаются значительные изменения потоков холонов высокой энергии. Эти изменения особенно заметны под нижней границей радиационного пояса Земли, что говорит об отсутствии связи рассматриваемых магнитных возмущений с солнечной активностью [Гальпер, 1992]. Поскольку ионосферная плазма на высотах слоя F2 обладает высокой проводимостью, подобные возмущения магнитного поля, связанные с подготовкой землетрясения, могут вызывать колебания ионосферной плазмы. Таким

образом, авторы современных работ в основном рассматривают возмущения ионосферной плазмы и магнитного поля независимо друг от друга. Соответственно, исследователи не уделяют внимание анализу дисперсионных соотношений, а также амплитудно-частотным характеристикам возможных МГВ. В рамках данного проекта проводится аналитическое исследование МГВ и сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными по одновременному наблюдению плазменных и магнитных возмущений, что позволяет более полно описывать перемещающиеся ионосферные возмущения, возникающие при развитии геофизических событий.

Среди работ, в которых анализируется поведение критических частот в различных условиях солнечной и магнитосферной активности, следует выделить работы по классификации ионосферной возмущенности и созданию индексов ионосферной погоды [Kutiev and Muchtarov, 2001; Bremer et al., 2006; Gulyaeva et al., 2008; Mielich and Bremer, 2010]. Отметим, что предлагаемые авторами методики создания подобных индексов часто основаны на ограниченном наборе анализируемых данных. Например, в работе [Gulyaeva al.. 20081 изучается ионосферная возмущенность елинственный et за геомагнитоспокойный год (2006), что не позволяет учесть долгопериодные вариации ионосферы в течение цикла солнечной активности. Вместе с тем в работе [Liu et al., 2007] обращается внимание наличие такой зависимости. Проблема создания индекса ионосферной активности, который может быть использован для текущего контроля и прогноза уровня ионосферной возмущенности является актуальной и ей посвящен ряд современных исследований. Авторами работы [Mielich and Bremer, 2010] разработан индекс ионосферной активности AI на основе анализа данных с одной станции вертикального зондирования Juliusruh (54.6 N, 13.4 E), что не позволяет выявить широтные и долготные особенности распределения возмущенности ионосферы и, следовательно, не позволяет считать данный индекс универсальным. Кроме того, разработанный индекс не имеет тесной связи с уровнем солнечной активности, однако в большинстве работ отмечено влияние на ионосферу ряда солнечно-магнитосферных параметров [Balan et al. 1993, 1996; Liu et al., 2003; Lăstovĭcka et al., 2008; Бархатова и др., 2009]. В работе [Бархатов и Бархатова, 2012] были представлены основы методики классификации ионосферной возмущенности по данным о критической частоте слоя F2. Классификация выполнялась с учетом уровня гелио- и геомагнитной активности по значениям критических частот за полный цикл солнечной активности, очищенных от долгопериодных вариаций. На основе анализа этих данных были выделены пять классов ионосферной возмущенности, соответствующие спокойному состоянию ионосферы, состоянию ионосферы с малой, повышенной, высокой и экстремальной возмущенностью. По результатам проведенной классификации был создан индекс ионосферной активности IAI, принимающий значения от 0 до ±4 в зависимости от уровня ионосферной возмущенности. Предлагаемый индекс может считаться более универсальным по сравнению с существующими ионосферными индексами, поскольку он учитывает уровень геомагнитной активности. В рамках данного проекта было выполнено усовершествование предложенного индекса с учетом широтного и долготного распределения ионосферной возмущенности. Вместе с тем, установленная по результатам выполненных исследований связь индекса IAI с ключевыми гелиогеофизическими параметрами и возможность его краткосрочного нейросетевого прогнозирования с учетом установленных связей для описания текущего подтверждает его адекватность уровня ионосферной возмущенности.

Литература:

Ахундов И.Д., Гусейнов М.А., Солодилов Л.Н. Ядерные процессы в Земле и прогноз землетрясений. "Проблемы оценки сейсмической опасности, сейсмического риска и

прогноза землетрясений" // Материалы международной конференции. Ташкент, 2004 г. С. 331 - 338.

Бархатова О.М., Смирнова А.С., Улыбина Р.И. Учет солнечно-магнитосферных связей в задаче прогноза критической частоты субавроральной ионосферы. Изв. ВУЗов Радиофизика, Т. 52, №2, с.109-117, 2009

Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Григорьев Г.И. Магнитогравитационные волны в ионосфере в условиях конечной проводимости // Изв. ВУЗов Радиофизика, Т.55, № 6, с. 421-430, 2012.

Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Григорьев Г.И. Обнаружение магнитогравитационных волн в ионосфере по анализу максимально наблюдаемых частот на трассах наклонного зондирования // Изв. ВУЗов Радиофизика, Т.52, №10, с.761-778, 2009.

Гусейнов М. А., Солодилов Л. Н., Ахундов И. Д. Механизм образования землетрясения и стратегия прогноза // Геофизика XXI столетия: 2001 год. Сборник трудов Третьих геофизических чтений имени В. В. Федынского. М.: Научный мир, 2001. С. 146-148

Живетьев И.В., Афраймович Э.Л., Кирюшкин В.В. Динамика крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений аврорального происхождения. Реакция на внезапное начало магнитной бури 29 октября 2003 г // Труды VIII Конференции молодых ученых. Секция «Физика околоземного космического пространства», БШФФ-2005. С. 69–72

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

Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A. et al. Determining parameters of large-scale travelling ionospheric disturbances of auroral origin using GPS-arrays // J. Atm. Solar-Terr. Phys., V.62, N.7, p. 553–565, 2000.

Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A. et al. Observation of large-scale travelling ionospheric disturbances of auroral origin by global GPS networks // Earth, Planets, and Space, V.52, N.10, p.669–673, 2000.

Balthazor R.L., Moffett R.J. A study of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances at equatorial latitudes // Ann. Geophysicae 15, p.1048-1056, 1997.

CNews_ Спиноны и холоны_ первые данные. Web Document от 14.07.2006.

Dabas R.S., Das R.M., Sharma K., Pillai, K.G.M. Ionospheric precursors observed over low latitudes during some of the recent major earthquakes, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 69, 1813–1824, 2007

Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. Propagation of tsunami-driven gravity waves into the thermosphere and ionosphere // Journal of Geoph. Res. V. 114, A08304, 2009

Hocke, K., Schlegel, K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophysicae 14, p.917-940, 1996.

Hocke, K., Schlegel, K., and Kirchengast, G.: Phases and amplitudes of TIDs in the high-latitude F-region observed by EISCAT, // J. Atmos. Terr. Phys., 57, 245–255, 1996.

Kirchengast G. Characteristics of high-latitude TIDs from different causative mechanisms deduced by theoretical modeling // J. Geophys. Res., V. 102, N. A3, P.4597-4612, 1997.

Liu J.Y., Chen C.H., Lin C.H., Tsai H.F. Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake // Journal of Geophysical Research, V. 116, A06319, 2011

Liu J.Y., et al. Seismo-ionospheric signatures prior to M>6.0 Taiwan earthquakes. //Geophysical Research Letters. 2000, v.27, n.19, p.3113-3116.

Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // Ann. Geophys., 28, 941–950, 2010

Sun L., Wan W., Ding F., and Mao T. Gravity wave propagation in the realistic atmosphere based on a three-dimensional transfer function model // Ann. Geophys., 25, p.1979–1986, 2007.

Vlasov A., Kauristie K., M. van de Kamp, Luntama J.-P., and Pogoreltsev A.: A study of Traveling Ionospheric Disturbances and Atmospheric Gravity Waves using EISCAT Svalbard Radar IPY-data // Ann. Geophys., V. 29, p. 2101–2116, 2011.

Xu T., Hu Y., Wu J., Wu Z., Suo Y., Feng J. Giant disturbance in the ionospheric F2 region prior to the M8.0 Wenchuan earthquake on 12 May 2008 // Ann. Geophys., 28, 1533–1538, 2010

3.9 Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта

В соответствии с заявленным планом работ, в 2013 году была выполнена оценка возможности распространения МГВ в субавроральной и приэкваториальной областях ионосферы на основе анализа дисперсионных соотношений МГВ в ионосферной среде конечной проводимостью. Решение ланной залачи выполнялось на основе магнитогидродинамического подхода, который заключался в аналитическом учете совместного влияния магнитного поля и силы тяжести в системе уравнений магнитной гидродинамики. Исследование вопросов генерации МГВ различными источниками (источником вещества и силовым источником от распределенного тока) выполнялось на неоднородной системы магнитогидродинамических уравнений основе решения численными методами в среде Matlab. Все вычисления проводились с помощью оригинальных программ, созданных для решения заявленных задач.

Экспериментальное подтверждение возможности распространения МГВ в ионосфере в условиях почти вертикального геомагнитного поля (субавроральная область) и горизонтального геомагнитного (приэкваториальная область) выполнялось поля сопоставлением одновременных плазменных и магнитных возмущений в периоды развития высокоэнергичных геофизических событий. Для этого был выполнен отбор таких событий и создана база данных анализируемых параметров – критических частот ионосферных слоев Es, E и F2 [http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr], данных о компонентах геомагнитного поля (X, Y, Z) [http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr], а также значений индекса интенсивности восточного электроджета (AU) [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc]. Уровень глобальной геомагнитной возмущенности оценивался по значениям индексов Dst и Кр [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc]. При этом были использованы оригинальные методики устранения суточного хода из критических частот ионосферных слоев и очистки значений компонент геомагнитного поля от влияния симметричной и ассиметричной чатей кольцевого тока. Поиск МГВ был произведен на основе сопоставления максимумов интенсивности динамических спектров, вычисляемых в среде matlab на основе быстрого преобразования Фурье.

Оценка степени вклада гелиогеофизических параметров в ионосферную возмущенность, оцениваемую по значениям индекса IAI, потребовала разработки методики очистки значений этого индекса от возмущений, связанных с прохождением терминатора. Данная методика является новой. Кроме того, в рамках решения данной задачи были разработаны индивидуальные методы классификации для каждого из рассматриваемых параметров.

Прогнозирование значений индекса ионосферной возмущенности IAI выполнялось с применением нейросетевых технологий. Для достижения лучшего прогностического результата были проведены эксперименты с нейронными сетями нескольких типов: сетью прямой передачи, сетью Элмана и сетью с алгоритмом нечеткой логики (Fuzzy).

3.10.1.1. Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения Проекта 15

3.10.1.2. Из них включенных в перечень ВАК 3

3.10.1.3. Из них включенных в системы цитирования (Web of Science, Scopus, Web of Knowledge, Astrophysics, PubMed, Mathematics, Chemical Abstracts, Springer, Agris, GeoRef)

2

3.10.2. Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2013 году

1

3.11. Участие в научных мероприятиях по тематике Проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда 7

3.12. Участие в экспедициях по тематике Проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда

3.13. Финансовые средства, полученные от РФФИ 300000,00

3.14. Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по данному проекту, например, http://www.somewhere.ru/mypub.html

3.14.1. http://spacelab.mininuniver.ru 3.14.2. http://vk.com/spacelabnnov

3.15. Библиографический список всех публикаций по проекту за весь период выполнения проекта, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.

1. Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Григорьев Г.И. Магнитогравитационные волны в ионосфере в условиях конечной проводимости // Изв. ВУЗов Радиофизика. Т.55. № 6. С. 421-430, 2012

2. Бархатов Н.А., Бархатова О.М. Выявление классов ионосферной возмущенности по многолетним данным о критической частоте слоя F2 // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 52. № 4. С. 1–10, 2012

3. Бархатова О.М. Индукционные токи в протяженных коммуникациях, возникающие в периоды геомагнитной возмущенности. Приволжский научный журнал, № 2, С.116-121, 2013

4. Бархатова О.М., Косолапова Н.В. Обнаружение магнитогравитационных волн в интервалы сильных подземных землетрясений // (принята в печать) Вестник ННГУ, 2013

5. Barkhatova O.M., Dodonova I.A., Kosolapova N.V. The displaying of heliogeophysical disturbance in mid-latitude ionospheric index // Proc. of the XXXV Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", p. 103 – 106, 2012

6. Бархатова О.М., Додонова И.А., Косолапова Н.В. Долготный анализ ионосферной возмущенности на средних широтах // Сборник трудов Нижегородской сессии молодых ученых, 2013

7. Бархатова О.М., Додонова И.А., Косолапова Н.В. Учет широтной зависимости индекса ионосферной активности // Сборник трудов Нижегородской сессии молодых ученых, 2013 8. Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Ревунов С.Е., Ревунова Е.А., Королев А.В., Романов Р.В., Серебрякова Р.И., Шадруков Д.В., Косолапова Н.В., Виноградов А.Б. Солнечноземные связи: задачи на современном этапе // Труды XVI научной конференции по радиофизике, ННГУ, с. 18-30, 2012 9. Бархатова О.М. Нелинейная связь полярных (AU, AL) и среднеширотных (SYM, ASY) индексов геомагнитной активности на главной фазе геомагнитной бури // Труды XVI научной конференции по радиофизике, ННГУ, с. 84-86, 2012

10. Бархатова О.М. Индукционный ток в протяженных строительных коммуникациях, вызванный вариациями геомагнитного поля // Труды конгресса Великие реки-2012, с. 204-210, 2012

11. Barkhatova O.M., Kosolapova N.V. Detection of magnetogravity waves by ionospheric F2 layer data and magnetic observations during high energy geophysical event // "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXVI Annual Seminar, Apatity, P. 139-142, 2013.

12. Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А. Землетрясения как источник магнитогравитационных волн // Труды конгресса Великие реки-2013, с. 93-96, 2013

13. Barkhatova O.M., Dodonova I.A., Kosolapova N.V. The display of heliogeophysical disturbance in midlatitude ionospheric activity index (IAI) // "Physics of Auroral Phenomena", Abstr. XXXV Annual Seminar, p. 43-44, 2012

14. Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Серебрякова Р.И. Обнаружение магнитогравитационных волн по данным о вариациях концентрации ионосферного слоя F2 и магнитным наблюдениям в периоды высокоэнергичных геофизических событий // Abstracts of 36 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, P. 54-55. 2013

15. Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Серебрякова Р.И. Обнаружение и дисперсионный анализ магнитогравитационных волн в среде с конечной проводимостью // Сборник тезисов 8-ой конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 4-8 февраля 2013 г., ИКИ РАН, с. 69, 2013.

3.16. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта (выбрать номер пункта по Приложению или «не очевидно»)

Рациональное природопользование

3.17. Критическая технология РФ, которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта (выбрать номер пункта по Приложению или «не очевидно»)

Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

3.18 Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта (выбрать номер пункта по Приложению или «не очевидно»)

Космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями, включая ГЛОНАСС и программу развития наземной инфраструктуры.

Приложение 1. Развернутое изложение полученных в 2013 году важнейших результатов

1. Выполнен анализ возможности распространения магнитогравитационных волн (МГВ) в субавроральной и приэкваториальной областях ионосферы. Полученые результаты были проверены на экспериментальных данных параллельных наблюдений за вариациями критических частот ионосферы и возмущений геомагнитного поля.

Решение данной задачи было начато в 2012 году, вследствие чего некоторые результаты, касающиеся возможности распространения МГВ в субавроральной области ионосферы были представлены в промежуточном отчете. Окончательные результаты, которые основаны на аналитическом и экспериментальном подходе к исследованию возможности распространения МГВ в субавроральной и приэкваториальной областях ионосферы, представлены ниже.

Анализ возможности распространения МГВ в ионосфере высоких и средних широт был выполнен на основеполученных дисперсионных соотношений и дисперсионных кривых МГВ для случаев вертикальной (вдоль оси ОZ) и горизонтальной (вдоль оси ОХ) ориентации невозмущенного геомагнитного поля. Для этого в уравнениях гидродинамики был выполненучет совместного влияния магнитного поля и силы тяжести в условиях конечной проводимости. Отметим, что необходимые для этого условия в ионосфере могут выполняться начиная с высот порядка 250 км.

Исходная линеаризованная однородная система уравнений магнитной гидродинамики для рассматриваемых случаев ориентации геомагнитного была выбрана в виде:

$$\rho_{0} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \rho \,\mathbf{g} + \frac{1}{c} (\mathbf{j} \times \mathbf{H}_{0}), \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_{0} \operatorname{div} \mathbf{v} + (\mathbf{v} \nabla) \rho_{0} = 0$$
$$\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) p_{0} = V_{s}^{2} [\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \rho_{0}]$$
$$\operatorname{rot} \mathbf{h} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{h} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \quad \mathbf{j} = \sigma \{\mathbf{E} + \frac{1}{c} (\mathbf{v} \times \mathbf{H}_{0})\}$$

Здесь возмущения плотности среды – ρ , давления – p, скорости – v, магнитного поля–**h**; V_s^2 –квадрат адиабатической скорости звука, γ – постоянная адиабаты, **g** – ускорение свободного падения, c – скорость света, **H**₀ – напряженность магнитного поля. Величины с индексом «0» являются невозмущенными параметрами среды и магнитного поля.

В рамках рассматриваемой задачи равновесные давление и плотность связаны соотношением $\frac{dp_0}{dz} = -g\rho_0 u$ меняются с высотой согласно зависимости $p_0(z), \rho_0(z) \sim \exp(-z/H)$, где H –высота однородной атмосферы, m – масса молекул.

Для решения системы (1) использовалось преобразование Фурье, так что: $\frac{\partial}{\partial t} = -i\omega$, $\frac{\partial}{\partial x} = ik_x$, $\frac{\partial}{\partial y} = ik_y$, $\frac{\partial}{\partial z} = ik_z \pm (2H)^{-1}$. Используемая система координат представлена на рисунке 1 (а, б). Вектор **H**₀ показывает выбранное направление невозмущенного геомагнитного поля: (а) – для субавроральной области ионосферы, (б) – для приэкваториальной области ионосферы.



Рис. 1. Используемая система координат и ориентация векторов силы тяжести, магнитного поля и волнового вектора; (a) – субавроральная область ионосферы (ориентация магнитного поля вдоль вертикальной оси), (б) – приэкваториальная ионосфера (ориентация магнитного поля вдоль горизритальной оси оси)

А) Распространение МГВ в субавроральной области ионосферы

На основе однородной системы уравнений для компонент вектора смещения $\xi = \frac{\partial v}{\partial t}$ при условии Н₀ || g была получена система уравнений, детерминант которой представляет собой следующее полное дисперсионное уравнение

$$(\omega^{2} + Q) \{ \omega^{2} [\omega^{2} + Q - (V_{s}^{2} + V_{AM}^{2})(k_{x}^{2} + k_{y}^{2})] - V_{s}^{2} (k_{z}^{2} + \frac{1}{4H^{2}}) [\omega^{2} + Q - V_{AM}^{2}(k_{x}^{2} + k_{y}^{2})] + (\gamma - 1)g^{2}(k_{x}^{2} + k_{y}^{2})\} = 0,$$

первый множитель которого представляет собой дисперсионное уравнение альвеновских волн, второй множитель – дисперсионное уравнение МГВ.

Здесь $V_A^2 = \frac{H_0^2}{4\pi\rho_0}$ – квадрат альвеновской скорости и

 $V_{AM}^{2} = \frac{V_{A}^{2}}{1 + i \frac{c^{2}}{4\pi\sigma\omega} (k_{x}^{2} + k_{y}^{2} + k_{z}^{2} - \frac{1}{4H^{2}} - \frac{ik_{z}}{H})} - \text{ квадрат модифицированной альвеновской}$

скорости в условиях конечной проводимости, $Q = V_{AM}^{2} \left(\frac{1}{2H} + ik_{z}\right)^{2}, \ k_{x}^{2} + k_{y}^{2} = k_{\perp}^{2} = k^{2} \sin \theta$,

 $k_{z} = k \cos \theta$, k- волновое число.

На основе полученного дисперсионного уравнения для МГВ был выполнен расчет их дисперсионных кривых в безразмерных величинах. Безразмерная частота и волновое число были приняты в виде [McLellan A., Winterberg F. Magneto-gravity waves and heating of the Solar corona // Solar Physics. V. 4. P. 401-408. 1968]:

$$W = \frac{\omega}{\omega_c}$$
 и $K = \frac{k}{k_c}$, где $\omega_c = \frac{H_0 g}{V_s^2 (4\pi\rho_0)^{1/2}}$ и $k_c = \frac{\omega_c}{V_s}$.

Безразмерное дисперсионное уравнение для МГВ:

$$W^{5} + AW^{4} + BW^{3} + CW^{2} + DW + E = 0,$$

rge $A = \frac{\sqrt{2}K\cos\theta}{\gamma^{3/2}\beta^{1/2}\operatorname{Re}_{m}} + i(\frac{2K^{2}}{\beta\operatorname{Re}_{m}} - \frac{1}{\operatorname{Re}_{m}}),$
 $B = \frac{\gamma^{2}}{4} - \frac{2}{\gamma^{3}\beta}K^{2} - (\frac{2}{\gamma\beta} + 1)K^{2}\sin^{2}\theta - \frac{\gamma^{3}\beta}{2} - K^{2}\cos^{2}\theta + i\frac{\sqrt{2}\gamma^{1/2}}{\beta^{1/2}}K\cos\theta,$

$$C = -\frac{\sqrt{2}K^{3}}{\gamma^{1/2}\beta \operatorname{Re}_{m}} \cos\theta - \frac{\gamma^{5/2}\beta^{1/2}K}{4\sqrt{2}\operatorname{Re}_{m}} \cos\theta - i\frac{2K^{4}}{\gamma^{2}\beta \operatorname{Re}_{m}} + i\frac{\gamma^{4}\beta}{32\operatorname{Re}_{m}},$$

$$D = \frac{2K^{4}}{\gamma\beta} \sin^{2}\theta + \frac{\gamma^{2}}{4}K^{2} - \frac{\gamma^{2}K^{2}}{4}\cos^{2}\theta - \frac{\gamma^{5}\beta}{2} + \frac{(\gamma-1)\gamma\beta K^{2}}{2}\sin^{2}\theta - \frac{\gamma^{5}\beta}{2} + \frac{\gamma^{2}\beta K^{2}}{2}\sin^{2}\theta - \frac{\gamma^{5}\beta K^{2}}{2}\sin^{2}\theta$$

Здесь $\beta = \frac{P_0}{H_0^2 / 8\pi}$ – отношение газокинетического давления к магнитному,

$$\operatorname{Re}_{m} = \frac{4\pi v_{A} H O}{c^{2}}$$
 - магнитное число Рейнольдса, θ – угол между **k** и **g**, **H**₀

Расчет дисперсионных кривых, соответствующих уравнению МГВ, был выполнен для параметров ионосферы, близких к реальным на высоте порядка 250 км. Значение проводимости на данной высоте принималась равной $\sigma = 10^{10} \text{ c}^{-1}$, магнитное число Рейнольдса $\text{Re}_m = 3 \cdot 10^2$ [Бархатова и др., 2009], $T = 10^3 \text{ K}$, $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты, $\beta = 0.02$, $H = 3 \cdot 10^6 \text{ см}$, $\mathbf{H}_0 = 0.5 \text{ Гс}$. Значения выбранных параметров ионосферы согласуются с ионосферной моделью MSIS-E.

На рисунке 2 представлены дисперсионные кривые в безразмерных переменных для двух распространяющихся мод МГВ. Здесь сплошная линия соответствует продольному распространению ($\theta = 0^{\circ}$), мелкий пунктир – распространению под углом ($\theta = 45^{\circ}$), крупный пунктир – поперечному распространению ($\theta = 90^{\circ}$) МГВ. Линии дисперсионных кривых, не приведенные на рисунке 2, находятся за пределами рассматриваемого частотного диапазона.



Рис. 2. Дисперсионные кривые для двух распространяющихся мод МГВ в безразмерных переменных: сплошная линия соответствует продольному распространению ($\theta = 0^\circ$), мелкий пунктир – распространению под углом ($\theta = 45^\circ$), крупный пунктир – поперечному распространению ($\theta = 90^\circ$) МГВ

Согласно представленным дисперсионным кривым, для первой моды возможно только распространение вдоль вертикальной оси (вдоль магнитного поля) при любых

азимутальных углах. Вторая мода МГВ имеет возможность распространения как вдоль вертикальной оси, так и под углом к ней.

На рисунке 3 (а, б) приведены расчетные фазовые и групповые скорости первой и второй мод МГВ в рассматриваемом диапазоне длин волн. Безразмерные значения фазовой скорости для первой моды составляет около 8, для второй моды – около 5,5. Безразмерные значения групповой скорости первой моды составляют около 5,5, для второй моды около 6 для продольного распространения и около 4,5 для распространения под углом $\theta = 45^{\circ}$. Реальные значения скоростей могут быть получены при умножении безразмерных значений на скорость звука (~ 500 – 600 м/с). Таким образом, скорости распространяющихся мод МГВ лежат в интервале 3000 - 4000 м/с.



Рис. 3.Фазовые и групповые скорости для двух распространяющихся мод МГВ: сплошная линия соответствует продольному распространению ($\theta = 0^{\circ}$), мелкий пунктир – распространению МГВ под углом ($\theta = 45^{\circ}$)

Таким образом, по результатам выполненного анализа подтверждена возможность распространения двух мод МГВ в субавроральной области на высоте слоя F2 ионосферы. Характерные скорости переноса возмущений посредством МГВ составляют в этом случае 3-4 км/с.

Полученные результаты опубликованы в работе [Бархатова и др., 2012].

Б) РаспространениеМГВ в приэкваториальнойобласти ионосферы

Детерминант записанной однородной уравнений магнитной выше системы гидродинамикидля возмущений смещения при распространении ΜΓΒ R приэкваториальной области ионосферы (рис. 1, б) позволяет вычислить дисперсионное соотношение для альвеновской и магнитогравитационных волн. В безразмерных переменных дисперсионное соотношение представляется в виде:

$$(W^{2} + A_{0}W + B_{0})(W^{5} + AW^{4} + BW^{3} + CW^{2} + DW + L) = 0.$$
(4)

Безразмерные коэффициенты

$$A_0 = \sqrt{\frac{2}{\beta\gamma}} \frac{K\cos\theta}{\mathrm{Re}_m} + i\left(\frac{2K^2}{\beta\gamma^2 \mathrm{Re}_m} - \frac{\gamma}{4\mathrm{Re}_m}\right) \mathbf{H} \quad B_0 = -\frac{2}{\beta\gamma} K^2 \sin^2\theta \cos^2\varphi$$

входят в выражение для альвеновских мод, а коэффициенты

$$A = \frac{\sqrt{2}}{\operatorname{Re}_{m}\beta^{\frac{1}{2}}\gamma^{\frac{1}{2}}}K\cos\theta + i\left(\frac{2}{\operatorname{Re}_{m}\beta\gamma^{2}}K^{2} - \frac{\gamma}{4\operatorname{Re}_{m}}\right),$$
$$B = \frac{\gamma^{2}}{4} - \left(1 + \frac{2}{\beta\gamma}\right)K^{2} - \frac{\beta\gamma^{3}}{8} + i\frac{\sqrt{2}\gamma}{\beta^{\frac{1}{2}}}K\cos\theta , \quad (5)$$

$$C = -\frac{\beta^{\frac{1}{2}}\gamma^{\frac{1}{2}}}{\operatorname{Re}_{m}}K\cos\theta - \frac{\sqrt{2}}{\operatorname{Re}_{m}\beta^{\frac{1}{2}}\gamma^{\frac{1}{2}}}K^{3}\cos\theta + i\left(\frac{\beta\gamma^{4}}{32\operatorname{Re}_{m}} - \frac{2}{\operatorname{Re}_{m}\beta\gamma^{2}}K^{4}\right),$$

$$D = \frac{\gamma^{2}}{2}K^{2}\cos^{2}\varphi\sin^{2}\theta - \frac{\beta\gamma(1-\gamma)}{2}K^{2}\sin^{2}\theta + \frac{2}{\beta\gamma}K^{4}\cos^{2}\varphi\sin^{2}\theta - i\left(\frac{\sqrt{2}\gamma^{\frac{1}{2}}}{\beta^{\frac{1}{2}}}K^{3}\cos^{2}\varphi\sin^{2}\theta\cos\theta\right),$$

$$L = \frac{\beta^{\frac{1}{2}}\gamma^{\frac{1}{2}}}{2\sqrt{2}\operatorname{Re}_{m}}K^{3}\left(\sin^{2}\frac{\theta}{2} - \sin^{2}\frac{3\theta}{2}\right) + i\left(\frac{\gamma-1}{8\operatorname{Re}_{m}\beta}K^{2}\sin^{2}\theta + \frac{\gamma-1}{\operatorname{Re}_{m}\gamma}K^{4}\sin^{2}\theta\right),$$
имеют отношение к магнитогравитационным волнам. Здесь β - отношение

имеют отношение к магнитогравитационным волнам. Здесь β – отношение газокинетического давления к магнитному, Re_m – магнитное число Рейнольдса, θ – угол между **k** и осью OZ, φ - азимутальный угол, т.е. угол между \mathbf{k}_{\perp} и \mathbf{H}_0 .

Анализ полученных дисперсионных соотношений показывает, что в условиях ионосферного слоя F2 в приэкваториальной областимогут существовать две быстрые и одна медленная моды МГВ. Дисперсионные кривые распространяющихся мод представлены на рисунке 4 для азимутального угла φ =45° при следующих параметрах ионосферы: T=10³ K, γ = 1.4– показатель адиабаты, β = 0.02,H = 3·10⁶ см, H₀=0.5 Гс, проводимость σ = 10¹⁰ с⁻¹и магнитное число Рейнольдса Re_m = 3·10² [Бархатова и др., 2012].



Рис. 4. Дисперсионные кривые трех распространяющихся мод МГВ, построенные при значении азимутального угла $\varphi = 45^{\circ}$ для различных значений полярного угла θ

Первая мода может распространяться без заметного затухания независимо от азимутального направления в частотном диапазоне до 0.5 Гц. Указанная мода распространяется вертикально вверх не распространяется, однако имеет возможность распространения вертикально вниз (сплошная красная линия). Скорость этой волны не зависит от азимутальной ориентации волнового вектора и в горизонтальном направлении минимальна. Вторая мода МГВ распространяется только вертикально вверх ($\theta = 0^{\circ}$) при любых азимутальных углах в частотном диапазоне до 0.5 Гц для длин волн превышающих 10 км. Третья (медленная) мода МГВ более низкочастотна по сравнению с первой и второй модами, но также распространяется при любых значениях азимутального угла. Однако данная мода не распространяется вдоль вертикали (сплошные черная и красная линия на дисперсионных кривых отсутствуют)и скорость ее распространения возрастает

при приближении направления распространения к горизонтальному. Кроме того, увеличение значений азимутального угла от $\varphi = 0^{\circ}$ до $\varphi = 90^{\circ}$ ведет расширению диапазона частот от 0.03 Гц до 0.08 Гц для этой распространяющейся моды с длинами волн свыше 10 км.

Выше аналогичным образом были получены дисперсионные кривые распространяющихся мод МГВ в случае вертикальной ориентации геомагнитного поля (вдоль оси Z), что соответствует авроральным областям ионосферы. По результатам выполненных расчетов были обнаружены две распространяющиеся моды МГВ: «быстрая» мода, которая распространяется вдоль магнитного поля H_0 , и «медленная» мода, распространяющаяся под углом $\theta = 45^{\circ}$ к плоскости XY. Характерный частотный диапазон для обоих типов распространяющихся мод составлял до 0.25 Гц. В приэкваториальной области число распространяющихся мод увеличилось на одну по сравнению с авроральной областью. Наиболее близкой к частотному диапазону мод авроральной области является третья мода, в то время как первая и вторая моды являются более высокочастотными. Фазовые скорости МГВ, распространяющихся в авроральной области, составляют значения порядка 4000 м/с для «быстрой» моды и 2500 м/с для более «медленной» моды. При этом значения скоростей для обеих мод неизменны в рассматриваемом диапазоне длин волн. В случае горизонтальной ориентации геомагнитного поля значения фазовых скоростей для всех распространяющихся мод МГВ приведены на рисунке 5.



Рис. 5. Фазовые скорости трех распространяющихся мод МГВ ($\phi = 0^{\circ}$) для различных углов θ

Скорости распространения первой моды составляют значения от 4200 м/с в случае почти вертикального распространения до 900 м/с при почти горизонтальном распространении и их значения также неизменны в рассматриваемом диапазоне длин волн. При горизонтальном распространении ($\theta = 90^{\circ}$) фазовая скорость первой моды меняется с длиной волны. Для длин волн порядка 75 км скоростьмаксимальна и имеет значение около 1300 м/с; минимальное значение скорости около 200 м/с для длин волн порядка 8 км. Для вертикальнораспространяющейся второй модызначения фазовой скорости порядка 4200 м/сдля всего рассматриваемого диапазона длин волн. Фазовые скорости третьей моды меняются в диапазоне 150 - 1200 м/с. Они убывают с уменьшением длины волны и растут с увеличением значения угла θ .

Согласно результатам выполненного анализа дисперсионных соотношений МГВ для приэкваториальной области ионосферы подтверждена возможность распространения в этой области трех мод МГВ. Характерные скорости переноса возмущений могут

составлять от 200 м/с для коротких волн (длина волны около 8 км) до 4200 м/с для более длинных волн (длина волны свыше 75 км).

С целью проверки возможности распространения МГВ в авроральной области на высоте слоя F2 ионосферы, был выполненпоиск этих волн вдоль геомагнитного меридиана. При этомпредполагалось, что возбуждение МГВ происходитвосточным электроджетом в периодысуббурь. Методика обнаружения МГВ была основана на сравнительном спектральном анализесинхронных колебаний инлекса AU [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp], вариаций критических частот ионосферного слоя F2 на станциях вертикального зондирования ионосферы [http://spidr.ngdc.noaa.gov] и вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля [http://spidr.ngdc.noaa.gov]. Динамический спектральный анализ был выполнен для дневных интервалов марта-апреля 2006 г. При этом, с целью исключения долгопериодных вариаций, выполнялась предварительная очисткавариаций критических частот слоя F2 от суточного хода. Выбранные станции вертикального зондирования и магнитные станции представлены в таблице 1. Разрешение используемых данных составляло 15 мин.

						гаолица г.
Ионосферные и	Сокращенное	Геогр.	Геогр.	Геом.	Геом.	L (параметр
магнитные станции	обозначение	широта	долгота	широта	долгота	Мак Илвейна)
	станций					
L Aquila	AQU	42.38	13.32	58.7	1.9	1.5
Furstenfeldbruck	FUR	48.17	11.28	64.2	1.6	1.9
HEL	HLP	54.61	18.82	69.5	4.0	2.5
Lvov	LVV	49.9	23.75	66.3	4.7	2.05
Juliusruh/Rugen	JR055	54.6	13.4	69.3	2.2	2.5
SanVito	VT139	40.6	17.8	57.0	2.7	1.47

Тоб лино 1

На рисунке 6 представлены примеры согласованных динамических спектров индекса AU (две верхние панели), ионосферных (вторая и третья сверху панели) и магнитных (две нижние панели) возмущений для 4 и 5 апреля 2006. Отмечается совпадение спектральных особенностей в представленных динамических спектрахв интервале16:15 – 19:00 UT для 4 апреля и 11:15 – 15:15 UT для 5 апреля. Этосвидетельствует о распространении одновременных возмущений плотности и магнитного поля от аврорального источника к средним широтам. Сопоставление максимумов интенсивности спектров показывает отсутствие временного сдвига как между возмущениями плотности ионосферного слоя F2, так и между возмущениями геомагнитного поля на всех рассматриваемых станциях. Это может являться следствием более высоких скоростей МГВ по сравнению с классическими акустико-гравитационными волнами. Поскольку расстояние от восточного электроджета до рассматриваемых ионосферных и магнитных станций известно, можно выполнить оценку скорости распространения рассматриваемых МГВ. Для расстояний порядка 2000 км отсутствие временного сдвига, наблюдаемое на динамических спектрах полученных по данным с 15 минутным разрешением, свидетельствует о скоростях МГВ свыше 2000 м/с.



Рис. 6. Примеры динамических спектров индекса AU, данных двух ионосферных и двух магнитных станций (сверху вниз) для 4 апреля (слева) и 5 апреля (справа) 2006 г. Вертикальными линиями отмечены области совпадения спектральных особенностей – 4 апреля 16:15 – 19:00 UT, 5 апреля 11:15 – 15:15 UT

Динамический спектральный анализ позволяет также оценить характерные регистрируемые частоты МГВ. Они находятся в диапазоне $10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-4}$ Гц и им соответствуют значения безразмерных частот W = $5 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$ ($6 \cdot 10^{-3} \div 2.5 \cdot 10^{-2}$ Гц). В соответствии с полученными дисперсионными кривыми для МГВ в авроральной области (рис. 2), в этом частотном диапазоне возможно существование быстрой моды МГВ при продольном распространении и медленной моды при распространении под углом к магнитному полю. Значения безразмерного волнового вектора в этом случае лежат в интервале $0 \div 5 \cdot 10^{-3}$, что соответствует длинам волн МГВ свыше 10 км.

Более точная экспериментальная оценка значений фазовых скоростей переноса МГВ может быть выполнена на основе сопоставления динамических спектров горизонтальных компонент геомагнитного поля с минутным разрешением для рассматриваемых магнитных станций. С учетом расстояния между рассматриваемыми магнитными станциями и оцененных скоростей переноса МГВ в авроральной области, временной сдвиг максимумов интенсивности на динамических спектрах в областях, отвечающих прохождению МГВ, должен составлять от 5 до 15 мин. На рис. 7 приведены динамические спектры индекса AU и горизонтальных компонент на магнитных станциях НЕL и AQU. На каждом из спектров маркером отмечены области, предположительно отвечающие прохождению в южном направлении МГВ, которые возбуждаются восточным электроджетом. При сопоставлении таких областей на спектрах индекса AU и указанных станций можно обнаружить временной сдвиг между ними. Величина сдвига в рассматриваемом случае составляет 10 – 15 минут, что согласуется с выполненными аналитическими оценками.



Рис. 7. Динамические спектры индекса AU и горизонтальных компонент на станциях HEL, AQU, FUR и LVV для 4 апреля 2006. Маркерами отмечен временной сдвиг между скачками интенсивности в соответствующих динамических спектрах индекса, связанный с прохождением МГВ

Таким образом, сопоставление характерных частот и скоростей переноса МГВ, полученных по результатам динамического спектрального анализа синхронных возмущений параметровионосферной среды и возмущений геомагнитного поля, а также на основе анализа расчетных дисперсионных кривых, показало согласованность результатов. Это подтверждает существование ионосферных возмущений, вызываемых прохождением волн магнитогравитационного типа В субавроральной И приэкваториальной областях ионосферы и возможность использования ИХ для мониторинга высокоэнергичных геофизических событий.

2. Обнаружение магнитогравитационных волн по данным о вариациях концентрации ионосферного слоя F2 и магнитным наблюдениям во время высокоэнергичных геофизических событий.

Возмущения концентрации слоев ионосферной ионизации часто связаны с волновыми явлениями, сопровождающими высокоэнергичные геофизическиесобытия. В рамках данной задачи поиск МГВ был выполнен в интервалы двух сильных подземных землетрясений, произошедших 8 января 2006 и 17 июля 2006 (более 6,5 баллов по шкале Рихтера) на западном побережье Индонезии. Для этого были проанализированы данные критических частот ионосферных слоев E, Es и F2, а также данные вариаций X, Y, Z компонент геомагнитного поля. Дискретность используемых данных составляла 15 минут.Координаты эпицентра, время землетрясения и параметры станций, выбранных для анализа, указаны в таблице 2.

					1 wormqu =
Дата землетрясения	Координаты эпицентра	Время начала UT	Магнитуда	Ионосферная станция	Магнитная станция
17.07.2006	9.33° ю.ш., 107.26° в.д.	08:19:25	7,7	Learmonth (21,9° ю.ш., 114° в.д.)	Learmonth (21,9° ю.ш., 114° в.д.)
08.01.2006	36.30° с.ш., 23.36°в.д.	01:35	6,8	San Vito (40,6с.ш., 17,8 в.д.)	Laquila (42,38с.ш., 13,32 в.д.)

Таблина 2

Поиск МГВ был выполнен в пределах временного интервала, включающего 3 дня до события, день события, и 3 дня после него. Уровень глобальной геомагнитной возмущенности в исследуемые периоды оценивался по значениям планетарного индекса Кр, значения которого приведены на рис. 8. Согласно представленным данным, геомагнитная обстановка в целом была спокойной за исключением слабых возмущений 14.07.2006 и 06-07.01.2006.



Рис. 8. Значения Кр индекса за исследуемый интервал времени (три дня до землетрясения, сам день и три дня после него) для землетрясений 8 января 2006 г. и 17 июля 2006 г.

Для исключения возмущений в вариациях компонент геомагнитного поля, не связанных с прохождением МГВ, значения Х, Ү, Хкомпонент на рассматриваемых станциях были очищены от влияния токовых систем симметричной и асимметричной частей кольцевого тока.Это было достигнуто вычитанием значений индексов SYM-Hи ASY-Huз значений указанных компонент в случае одновременного выполнения двух условий: во-первых, наличие их синхронной возмущенности и во-вторых, вклад возмущений, создаваемых токовыми системами кольцевого тока, в возмущенность рассматриваемых компонент должен быть не менее 50%. Для оценки уровня ионосферной возмущенности, не связанной с периодическими вариациями, значения критических частот слоев F2, Е и Еs были очищены от суточного хода.

Обнаружение синхронных плазменных и магнитных возмущений, обусловленных прохождением МГВ, для каждых суток в пределах рассматриваемых временных интервалов выполнялось на основе сопоставления спектральных характеристик очищенных данных критических частот и компонент геомагнитного поля в частотном 10⁻⁵÷10⁻³ Гш. При лиапазоне этом осуществлялось сопоставление максимумов интенсивности динамических спектров, отвечающих плазменным (очищенные критические частоты слоев Es, Eu F2)и магнитным (очищенные компоненты X, Y, Z геомагнитного поля) возмущениям на станциях (см. таблицу 2), находящихся на расстоянии не более 1500 км от эпицентра землетрясения. На рис. 9 представлены динамические спектры указанных ионосферных и магнитных параметров за три дня до рассматриваемых землетрясений. При сопоставлении максимумов интенсивности плазменных и магнитных возмущений наблюдается практически полное отсутствие их синхронности – количество совпадений не превышает 1 случая. Это может свидетельствовать о низком уровне магнитогравитационной активности в данный период.

Аналогичная ситуация наблюдается спустя три дня после рассматриваемых землетрясений.



Рис. 9. Динамические спектры очищенных критических частот слоев F2, Еи Es (сверху вниз три верхние панели) и компонент X, Y, Z геомагнитного поля (сверху вниз три нижние панели) за три дня до рассматриваемых землетрясений. По оси абсцисс отложено время (UT), по оси ординат – характерные значения частот плазменных и магнитных возмущений

Однако за два дня до землетрясений и спустя два дня после этих высокоэнергичных событий количество наблюдаемых синхронных возмущений ионосферной плазмы и компонент геомагнитного поля заметно возрастает – наблюдается до 5 совпадений в течение суток. На рисунке 10 представлены динамические спектры ионосферных и магнитных параметров для 6 января и 15 июля, т.е. за два дня до землетрясений. Стрелками отмечены максимумы синхронных возмущений критических частот и компонент геомагнитного поля.



Рис. 10.Динамические спектры очищенных критических частот слоев F2, Еи Es (сверху вниз три верхние панели) и компонент X, Y, Z геомагнитного поля (сверху вниз три нижние панели) за два дня до рассматриваемых землетрясений. По оси абсцисс отложено время (UT), по оси ординат – характерные значения частот плазменных и магнитных возмущений. Стрелки указывают на синхронные плазменные и магнитные возмущения

В день рассматриваемых землетрясений наблюдается ослабление магнитогравитационной активности, что выражается в полном отсутствии синхронных плазменных и магнитных возмущений. Однако наблюдаются другие характерные признаки, связанные с подготовкой и развитием землетрясений. Отмечено увеличение интенсивности колебаний критической частоты спорадического слоя Es в течение двух часов перед землетрясением 8 января и в течение 8 часов перед землетрясением 17 июля. Данная особенность хорошо видна на динамическом спектре критической частоты слоя Es, представленном на рисунке 11 (третья панель сверху). Вертикальной линией на рисунке отмечено время начала землетрясения. Другой особенностью является возникновение в день землетрясений синхронных плазменных возмущений,связанных с прохождением волн акустикогравитационного типа (8 января синхронные возмущения критических частот слоев E и Es, и 17 июля – слоев F2 и Es). На рисунке 11 указанные возмущения отмечены стрелками.



Рис. 11.Динамические спектры очищенных критических частот слоев F2, Eu Es (сверху вниз три верхние панели) и компонент X, Y, Zreoмагнитного поля (сверху вниз три нижние панели)в день землетрясений. По оси абсцисс отложено время (UT), по оси ординат – характерные значения частот плазменных и магнитных возмущений. Черные стрелки указывают на синхронные плазменные возмущения.Вертикальная линия отмечает время начала землетрясения

Суммарные результаты количества синхронных плазменных и магнитных возмущений для каждого исследуемого дня представлены на рисунке12.Полный анализ динамических спектров за исследуемый период показал, что магнитогравитационная активность заметно возрастает в течение двух дней до и двух дней после рассматриваемых землетрясений. В остальные дни рассматриваемых временных интервалов уровень магнитогравитационной активности остается низким.



Рис. 12.Количество обнаруженных синхронных плазменных и магнитных возмущений для землетрясений 8 января (слева) и 17 июля (справа) 2006

Таким образом, в интервалы сильных подземных землетрясений 8 января 2006 г. и 17 июля 2006 г. (более 6,5 баллов по шкале Рихтера), которые произошли на западном побережье Индонезии, были обнаружены синхронные возмущения концентрации ионосферных слоев F2, E, Es и возмущения компонент геомагнитного поля. Подобные возмущения могут быть связаны с образованием магнитогравитационных волн (МГВ) в интервалы развития высокоэнергичных геофизических событий. Усиление магнитогравитационной активности происходит в течение двух дней до землетрясения и двух дней после него. В день землетрясения МГВ не регистрируются, однако замечено прохождение акустико-гравитационных волн.

3. Теоретический анализ возможности генерации МГВ различными источниками (тепловым, пондеромоторным, движением границы ионизации). Экспериментальная проверка полученных результатов.

Анализ дисперсионных кривых МГВ для приэкваториальной области ионосферы, выполненный выше, показал возможность распространения этих волн в областях с преимущественно горизонтальной ориентацией геомагнитного поля. Здесь наиболее вероятными и заметными высокоэнергичными источникамимагнитогравитационных волновых возмущений в отличие от среднеширотной ионосферы, которая подвержена влиянию авроральных токовых систем, могут быть землетрясения, прохождение терминатора и пролеты метеоров.

В соответствии с поставленной задачей, выполним исследование спектральных особенностей магнитогравитационных волн, генерируемых тепловым, пондеромоторным источником, а также источником вещества. Для этого рассмотрим линеаризованную систему магнитогидродинамических уравнений с источником пондеромоторной силы **F**и источником веществаМ, отвечающих горизонтальному направлению геомагнитного поля (рис. 1, б).

$$\rho_{0} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \frac{1}{c} (\mathbf{j} \times \mathbf{H}_{0}) + \mathbf{F}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_{0} \operatorname{div} \mathbf{v} + (\mathbf{v} \nabla) \rho_{0} = M$$
$$\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) p_{0} = V_{s}^{2} [\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \rho_{0}]$$
$$\operatorname{rot} \mathbf{h} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{h} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \quad \mathbf{j} = \sigma \{\mathbf{E} + \frac{1}{c} (\mathbf{v} \times \mathbf{H}_{0})\}$$

Здесь возмущения плотности среды – ρ , давления – p, скорости – v, магнитного поля–**h**; V_s^2 –квадрат адиабатической скорости звука, γ – постоянная адиабаты, **g**– ускорение свободного падения, c – скорость света, **H**₀– напряженность магнитного поля, **F** – внешняя сила от источника распределенного тока *I*, *M* – источник вещества. Величины с индексом «0» являются невозмущенными параметрами среды и магнитного поля.

Для решения представленной системы уравнений был использован подход, описанный в пункте 1 данного раздела: рассматривалась экспоненциальная зависимость невозмущенных давления и плотности от высоты, и решение искалось в форме гармонических волн, так что

$$\frac{\partial}{\partial t} = -i\omega, \ \frac{\partial}{\partial x} = ik_x, \ \frac{\partial}{\partial y} = ik_y, \ \frac{\partial}{\partial z} = ik_z \pm (2H)^{-1}$$

Неоднородная система уравнений для компонент вектора смещения в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \xi_{x}\left(\omega^{2}-V_{s}^{2}k_{x}^{2}\right)+\xi_{y}\left(-k_{x}k_{y}V_{s}^{2}\right)+\xi_{z}\cdot k_{x}\left[ig\left(\gamma/2-1\right)-V_{s}^{2}k_{z}\right]&=-\frac{V_{s}^{2}k_{x}m}{\rho_{0}\omega}-\frac{f_{x}}{\rho_{0}},\\ \xi_{x}\left(-k_{x}k_{y}V_{s}^{2}\right)+\xi_{y}\left(\omega^{2}-V_{s}^{2}k_{y}^{2}-V_{AM}^{2}k_{\perp}^{2}\right)+\xi_{z}\cdot k_{y}\left[-V_{s}^{2}k_{z}+ig\left(\gamma/2-1\right)+iV_{AM}^{2}\left(ik_{z}+1/2H\right)\right]=\frac{V_{s}^{2}k_{y}m}{\rho_{0}\omega}+\frac{f_{y}}{\rho_{0}\omega},\\ \xi_{x}k_{x}\left[-V_{s}^{2}k_{z}-ig\left(\gamma/2-1\right)\right]+\xi_{y}k_{y}\left[-V_{s}^{2}k_{z}-ig\left(\gamma/2-1\right)+iV_{AM}^{2}\left(ik_{z}+1/2H\right)\right]+\\ +\xi_{z}\left[\omega^{2}-V_{s}^{2}\left(k_{z}^{2}+1/4H^{2}+V_{AM}^{2}\left(ik_{z}+1/2H\right)-V_{AM}^{2}k_{x}^{2}\right)\right]=-\frac{V_{s}^{2}\left(k_{z}+1/2H\right)m}{\omega\rho_{0}}-\frac{gm}{i\omega\rho_{0}}-\frac{f_{z}}{\rho_{0}},\end{aligned}$$

где *m* и *f* - спектральные компоненты источника вещества и силы, $V_{AM}^{2} = \frac{V_{A}^{2}}{1 + i \frac{c^{2}}{4\pi\sigma\omega}(k_{x}^{2} + k_{y}^{2} + k_{z}^{2} - \frac{1}{4H^{2}} - \frac{ik_{z}}{H})} -$ модифицированная альвеновская скорость,

 k_x , k_y , k_z - компоненты волнового вектора **k**в выбранной системе координат, $\rho_0 = 5.3 \cdot 10^{-14} \, \text{г/cm}^3$ – фоновая плотность среды, оцененная на основе модели MSIS-E для высоты 250 км.

Рассмотрим задачу о возбуждении рассматриваемых возмущений источниками вещества *M* и энергии *E*, а также распределенным током *I*. Распределение этих источников в пространстве и времени примем в виде двумерного гауссова распределения вдоль осей ОХ и ОZ с помощью нормированной функции:

$$D(\mathbf{r},t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \cdot \tau \cdot a_x \cdot a_z} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2a_x^2} - \frac{z^2}{2a_z^2}\right), \qquad (*)$$

где τ – половина характерного времени изменений в источнике, a_x , a_z - характерные пространственные размеры источника. Таким образом, выбранный источник представляет бесконечно длинный шнур, ориентированный вдоль оси ОҮ. Прямая x = z = 0 совмещена с осью шнура и вдоль нее происходит максимальное испарение метеора, имеющего массу М и скорость Uили вдоль этой оси течет распределенный ток *I*. Масштабы a_x , a_z введены с целью получения численных оценок величин возмущений, вызываемых рассматриваемыми источниками.

Тогда спектр нормированной функции источника задаваемого выражением (*) имеет вид:

$$D(W, \mathbf{K}) = \exp\left(-\frac{W^2 \cdot \tau^2 \cdot \omega_c^2}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{K_x^2 \cdot a_x^2 \cdot k_c^2}{2} - \frac{K_z^2 \cdot a_z^2 \cdot k_c^2}{2}\right)$$
(**)

Система МГД уравнений решена относительно спектральных компонент смещения $\xi(W, K)$ вещества в случае источника типа (**).Громоздкий вид полученных выражений не позволяет привести их аналитический вид.

3.1. Возбуждение МГВ источником вещества

Возникновение источников вещества в ионосфере может быть обусловлено различными физическими процессами, которые имеют разные пространственные масштабы. Выполним численный и графический анализ спектральных компонент смещений отвечающим частотам и пространственным масштабам распространяющихся МГВ модам для приэкваториальной ионосферной среды с заданными выше параметрами.

Верхние графики слева и справа на рисунке 13 соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника единичной амплитуды. Представляет интерес установление размеров источника вещества в приэкваториальной области, при которых возможна наиболее эффективная генерация горизонтальных и вертикальных масштабов МГВ, т.е. компоненты смещений ξ_x и ξ_{z} получаютнаибольшие значения. Значения компоненты ξ_y для рассматриваемой модели источника здесь и далее равны нулю. Возникающие МГ возмущения смещений в зависимости от горизонтального размера источника (a_x) при его вертикальном масштабе $a_z = 1000$ м на фиксированной (Kx) и вертикальной (Kz) компонент волнового вектора заданы как параметры – одна из компонент имеет фиксированное значение, а значения другой меняются от 0.001 до 0.005 (в безразмерных величинах, длина волны 40 – 8 км), затем наоборот. Левый столбец на рисунке 5 содержит зависимости ξ_x и $\xi_{zor} a_x$ при фиксированном значении Kz = 0.0028



(длина волны 15 км)в виде семейства кривых для значений Кх; правый столбец соответствует значению Кх = 0.002в виде семейства кривых для значенийКz.

Рис. 13. Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника. Ниже представлены зависимости амплитуд для компонент смещений ξ_x и ξ_z от горизонтального размера источника (a_x) в виде семейств Кx и Kz, соответственно

0 0

4 · 10⁵

8 · 10⁵ 12 · 10⁵ 16 · 10⁵

а_х,см

0.5

°

4.105 8.105 12.105 16.105

а_х,см

Анализ полученных результатов показывает, что для спектральных компонент смещений ξx и ξz сохраняется гауссова форма, при этом эффективность источника зависит от возбуждаемой длины волны. Исключение составляет источник с горизонтальным (вдоль магнитного поля) масштабом порядка 3 км для компоненты ξx и порядка 2 км для компоненты ξz . В рассматриваемых случаях значения ξx и ξz практически одинаковы для всех рассмотренных горизонтальных длин возбуждаемых волн. Для компонент ξx и ξz наибольшие значения достигается при горизонтальных размерах источника до 3 км на горизонтальных длинах волн порядка 8 км (Kx=0.005). При увеличении горизонтального размера источника значения всех рассматриваемых компонент смещений снижаются. Зависимость спектральных компонент смещений для различных вертикальных длин волн от горизонтальных масштабов источника показывает, что значения ξx и ξz уменьшаются с уменьшением вертикальных длин волн при любых горизонтальных размерах источника.

Результаты аналогичного исследования зависимости компонент смещений ξ_x и ξ_z от вертикальных размеров источника представлены на рисунке 14. Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника единичной амплитуды. Ниже приведены значения компонент смещений в зависимости от a_z для фиксированного значения Kz = 0.0028 (длина волны 15 км) в виде семейства кривых для значений Kx (левый столбец) и значения Kx = 0.002 (длина волны 20 км) в виде семейства кривых для значений Kz (правый столбец).



Рис. 14. Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника. Ниже представлены зависимости амплитуд для компонент смещений ξx и ξz от вертикального размера источника (a_z) в виде семейств Kx и Kz, соответственно

Установлено, что в данном случае гауссов характер зависимости всех рассматриваемых компонент смещений для семейств Кх и Кz также сохраняется и увеличение вертикального масштаба источника ведет к снижению их значений. Зависимость спектральных компонент смещений для различных вертикальных длин волн от вертикальных масштабов источника показывает, что значения ξx и ξz растут с уменьшением горизонтальных длин волн при любых вертикальных размерах источника. Для семейства Кz наибольшие значения компонент ξx и ξz достигаются на вертикальных масштабах длин волн при протяженности источника в вертикальном направлении не более 600 м.

Выполним анализ зависимости эффективности генерации МГВ от горизонтального масштаба возмущения (Kx) для различных горизонтальных и вертикальных размеров источника (см. рисунок 15). При этом значения частоты (W = 0.0055 или 0.07 Гц) и горизонтальной компоненты волнового вектора Kz (Kz = 0.0028 или 14 км) зафиксируем. Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источникаединичной амплитуды. Ниже приведены результаты численного расчета спектральных компонент смещений ξ_X и ξ_Z для линейных размеров источника вдоль оси ОХ (a_x) в зависимости от значений Кх: левый столбец соответствует фиксированному значению вертикального размера источника вдоль оси Za_Z= 800 м, а его горизонтальный размер принимает значения от 1 до 7 км; правый столбец соответствует значению горизонтального размера источника $a_X = 2$ км при его вертикальной протяженности от 1 до 7 км.



Рис. 15. Зависимость амплитуды компонент смещений ξx и ξz от горизонтальной длины волны (Kx). Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника. Ниже представлены зависимости амплитуд для компонент смещений ξx и ξz от горизонтального масштаба возмущения (Kx) в виде семейств ах и аz (левый и правый столбец, соответственно). Значения вертикальной длины волны (Kz) и генерируемой частоты источника (W) считаются постоянными

Согласно результатам, представленным на рисунке15 (левый столбец), зависимость компонент смещений ξx и ξz от значений горизонтальной длины волны отличается от исходной гауссовой формы при масштабах источника вдоль магнитного поля менее 3 км. Максимумы для этих компонент достигаются на горизонтальной длине волны порядка 8 км при горизонтальном размере источника менее 3 км. Отметим, что уменьшение значений частоты источника приводит к смещению максимумов у компонент ξx и ξz в область более длинных волн. При изменении вертикальных размеров источника (рис. 7, правый столбец) спектральная компоненты ξx и ξz сохраняют гауссову форму источника при его масштабах свыше 5 км. В остальном характерные масштабы длин волн и форма зависимостей повторяет результаты, полученные для семейства a_x .

Аналогичное исследование поведения спектральных компонент смещений ξ_X и ξ_Z было выполнено в зависимости от вертикального масштаба возмущения (Kz) для различных горизонтальных и вертикальных размеров источника при фиксированных значениях частоты (W = 0.0055) и горизонтальной компоненты волнового вектора Kx (Kx = 0.002) как параметров. На рисунке 16 верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральных компонентам гауссового источника. Ниже приведены результаты расчета спектральных компонент смещений ξ_X и ξ_Z для линейных размеров источника в случае фиксированного значения $a_Z = 800$ м в виде семейства кривых для значений a_X (левый столбец) и значения $a_X = 2$ км в виде семейства кривых для значений a_Z (правый столбец).



Рис. 16. Зависимость амплитуды компонент смещений ξx и ξz от горизонтальной длины волны (Kz). Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника. Ниже представлены зависимости амплитуд для компонент смещений ξx и ξz от вертикального масштаба возмущения (Kz) в виде семейств ах и аz (левый и правый столбец, соответственно). Значения вертикальной длины волны (Kx) и генерируемой частоты источника (W) считаются постоянными

Согласно полученным результатам для семейства a_x (левый столбец рис. 16), спектральная компоненты ξx и ξz имеют наибольшее значение при горизонтальном масштабе источника 1 км и и соответствующих вертикальных длинах волн порядка 100 и 30 км. Для семейства a_z (правый столбец рис. 16) максимальное значение всех спектральных компонент такжедостигается при вертикальном масштабе источника 1 км. При этом соответствующие значения вертикальных длин волн для компоненты ξx порядка 130 км и компоненты ξz – около 57 км.

Обобщая все полученные выше результаты, можно заключить, что для рассматриваемой области ионосферы все компоненты смещений принимают наибольшие значения для горизонтальных длин волн порядка 8 км (Kx = 0.005) и вертикальных длин волн порядка 40 км (Kz = 0.001) при протяженности источника вдоль горизонтального направления порядка 2 км и вдоль вертикального направления не более 1 км.

Рассмотрим зависимость компонент смещений ξx и ξz возмущений от частоты, излучаемой наиболее эффективным источником, размеры которого установлены в соответствие с выполненными выше исследованиями и составляют 2 км вдоль горизонтальной оси и 800 м вдоль вертикальной оси. Соответствующие значения компонент волнового вектора Kx и Kz также определены по результатам выполненного выше анализа (рис. 15, 16) и имеют значения равные Kx = 0.005 и Kz = 0.001, что отвечает горизонтальным длинам волн порядка 7-8 км и вертикальным длинам волн порядка 40 км. На рисунке17 представлены заданные спектральные компоненты гауссового источника и вычисленные значения спектральных компонент ξx и ξz в зависимости от частоты W.



Рис. 17. Графики заданных спектральных компонент гауссового источника и зависимостей компонент смещений ξx и ξz от значений безразмерной частоты, генерируемой массовым источником с фиксированными пространственными размерами

Согласно графикам рисунка17 можно заключить, что для всех рассматриваемых компонент смещений максимум их амплитуд наблюдается в интервале безразмерных частот W = 0.0055, что соответствует частотам порядка 0.07 Гц. Это означает, что при заданных размерах источника возможна генерация всех трех мод МГВ согласно полученным ранее дисперсионным соотношениям. Полученный интервал частот существующих МГВ при характерных значениях горизонтальных и вертикальных длин волн согласуются с их высокими скоростями распространения.

3.2. Возбуждение МГВ токовым источником

Генерация МГВ может быть вызвана двумерным гауссовым токовым источником в виде шнура, ориентированного вдоль оси ОУ (J_Y) , задаваемым нормированной функцией (6) с соответствующим спектром (7). Основное отличие данной модельной задачи от рассмотренной выше задачи возбуждения МГВ источником вещества, заключается в возникновении в рассматриваемом случае распределенной силы ампера направленной строго по вертикали (Fz):

$$F_{Z} = \frac{1}{c} \big(J_{Y} \cdot H_{0} \big).$$

Изучим спектральных зависимость величин компонент смещений от пространственных размеров источника (вдоль магнитного поля и вертикальной оси ОZ) с целью установления его наиболее эффективных масштабов для генерации волн МГ типа. Эта зависимость от горизонтальных размеров источника (a_x) была проанализирована для фиксированных вертикальном масштабе $a_z = 1000$ м, частоте W = 0.0055 (0.07 Гц). Значения горизонтальной (Kx) и вертикальной (Kz) компонент волнового вектора также задавались как параметры – одна из компонент имела фиксированное значение 0.002 (Кх или Кz), а значения другой менялись в интервале 0.001 - 0.005 (длина волны 40 – 8 км). Полученные зависимости практически повторяют результаты, полученные для источника вещества и представленные на рисунке 13. Отличие заключается в том, что значения спектральных компонент ξx и ξz уменьшаются с уменьшением вертикальных длин волн при любых горизонтальных размерах источника. В случае с источником вещества такая зависимость наблюдалась только для компоненты ξx .

Результаты исследования зависимости значений компонент Ех и Ег от вертикального размера источника (см. рисунок 18, левый столбец) показывают, что для различных горизонтальных длин волн отличий по сравнению с модельным источником вещества нет. Для различных вертикальных длин волн эти зависимости изменяются и на соответствующие 18 (правый столбец) представлены графики рисунке при фиксированных горизонтальном масштабе $a_x = 1000$ м и частоте W = 0.0055 (0.07 Гц). Значения параметров Кх и Кz в виде семества кривых представлены на рисунке 18 левый и правый столбец, соответственно. Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника.

В рассматриваемых случаях зависимости всех компонент смещений для семейств Кх и Кz как и для источника вещества имеют гауссов характер. Для различных горизонтальных длин волн (семейства Kx) полученные зависимости смещений ξx и ξz от вертикальных масштабов источника повторяют характерные особенности возмущений в случае источника вещества - значения ξx и ξz растут с уменьшением горизонтальных длин волн при любых вертикальных размерах источника. Для семейства Kz эффективность источника также зависит от возбуждаемой длины волны (за исключением источника размером порядка 1,5 км). При вертикальном масштабе $a_z < 1.5$ км наибольшие значения компоненты ξx достигаются на вертикальных длинах волн порядка 8 км (Kz = 0.005), а при увеличении вертикального размера $a_z > 1.5$ км - на более длинных волнах порядка 40 км (Kz = 0.001). Вместе с тем, значения компоненты ξz для любых вертикальных размеров источника растут с увеличением вертикальной длины волны.



Рис. 18. Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника. Ниже представлены зависимости амплитуд для компонент смещений ξx и ξz от вертикального размера источника (a_z) в виде семейств Kx и Kz, соответственно

Для оценки характерных горизонтальных масштабов длин волн, на которых происходит наиболее эффективная генерация МГВ, выполним анализ зависимости значений компонент смещений от величины Кх для различных горизонтальных и вертикальных размеров источника. На рисунке 19 два верхних графика соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника для фиксированного значения частоты (W = 0.0055 или 0.07 Гц) и компоненты волнового вектора Kz = 0.002 (20 км). Два нижних графика левого столбца соответствуют значениям ξx и ξz в зависимости от Кх для различных горизонтальных масштабов источника (вертикальный масштаб при этом фиксирован аz = 1000 м), а два нижних графика правого столбца – значениям ξx и ξz в зависимости от Кх для различных вертикальных масштабов источника (при этом аx = 1000 м).



Рис. 19. Зависимость амплитуды компонент смещений ξx и ξz от горизонтальной длины волны (Kx). Верхние графики слева и справа соответствуют заданным спектральным компонентам гауссового источника. Ниже представлены зависимости амплитуд для компонент смещений ξx и ξz от горизонтального масштаба возмущения (Kx) в виде семейств ах и аz (левый и правый столбец, соответственно)

Анализ полученных результатов (левый столбец рисунка 19) показывает, что компоненты ξ_x и ξ_z имеют наибольшие значения при горизонтальных размерах источника 1 км и на горизонтальных длинах волн порядка 8 км (Kx = 0.005). Полученный результат совпадает с масштабами и длинами волн, оцененными выше для источника вещества. Иной результат наблюдается при рассмотрении зависимости величин смещений от Кx при различных вертикальных размерах источника. Наиболее эффективным в данном случае также является наименее протяженный вдоль вертикальной оси источник, но горизонтальные длины волн, на которых отмечаются максимумы спектральных компонент, имеют большие значения по сравнению с источником вещества. Здесь максимум отмечается на Kx = 0.0028 (длина волны порядка 15 км), а для источника вещества это было на Kx = 0.005 (длина волны порядка 8 км).

Аналогичные расчеты были выполнены для определения характерных масштабов вертикальных длин волн, на которых наблюдаются максимумы спектральных компонент ξx и ξz . В данном случае генерируемая частота также была фиксирована W = 0.005 (0.07 Гц), Kx = 0.002. Значения горизонтального (ах) и вертикального (аz) размеров источника также задавались как параметры – один из них имел фиксированное значение 1 км, а

значения другого менялись в интервале 1 – 7 км. Полученные результаты демонстрируют снижение значений спектральной компоненты ξz при уменьшении значений вертикальной длины волны при любых размерах источника. Форма распределения компоненты ξx отличается от гауссовой и для источника с размером ах или az равным 1 км имеет наибольшее значение при вертикальном масштабе длины волны порядка 50 км (Kz = 0.0008).

Таким образом, эффективность источника МГВ в виде цилиндрического токового шнура, ориентированного вдоль оси ОУ, увеличивается с уменьшением его радиуса. При радиусе в 1 км наиболее успешно генерируются волны с горизонтальными и вертикальными масштабами порядка 15 км и 50 км, соответственно. В этом содержится отличие от генерации волн источником вещества.

Исследование зависимости амплитуд спектральных компонент от частоты W при прочих фиксированных параметрах позволит выявить частоты источника наиболее эффективные для генерации МГВ. На рисунке 20 представлены зависимости спектральных компонент ξ_x и ξ_z от значений безразмерной частоты W при следующих параметрах токового источника: ax = az = 1 км, Kx = 0.0028 (15 км), Kz = 0.0008 (50 км).



Согласно представленным на рисунке 20 результатам, наиболее эффективной для генерации МГВ является частота токового источника порядка W = 0.003 (0.04 Гц). Генерация МГВ в данном случае происходит на более низких характерных частотах по сравнению с источником вещества (0.07 Гц).

Таким образом, подтверждена возможность генерации МГВ в приэкваториальной области ионосферы источником вещества и источником распределенного тока, и установлены параметры этих источников, при которых значения спектральных компонент смещений среды будут максимальны. Для источника вещества наиболее эффективным являетсябесконечно длинный эллиптический шнур, ориентированный вдоль оси Yc радиусами порядка 800 м в вертикальном направлении (вдоль силы тяжести) и порядка 2 км в горизонтальном направлении (вдоль магнитного поля).Максимальные значения спектральных компонент смещений достигаются пригенерация МГВ на частоте порядка

0.7 Гц. Характерные масштабы излучаемых волн составляют порядка 10 км для вертикальных длин волн и порядка 40 км для горизонтальных длин волн. В случае генерации МГВ источником распределенного тока, установлено, что наиболее эффективно эти волны излучает цилиндрический токовый шнур, ориентированного вдоль оси Y, причем амплитуды спектральных компонент смещений возрастают с уменьшением радиуса шнура. При радиусе в 1 км наиболее успешно генерируются волны с горизонтальными и вертикальными масштабами порядка 15 км и 50 км, соответственно. В этом содержится отличие от генерации волн источником вещества.Для рассматриваемого токового источника наиболее генерации МГВ происходит наиболее эффективно на частоте порядка 0.04 Гц, которая является более низкой по сравнению с источником вещества (0.07 Гц).

Экспериментальная проверка полученных результатов в случае возбуждения МГВ источником вещества была выполнена на основе анализа следа от метеорита «Челябинск», упавшего на земную поверхность 15 февраля 2013 года в 09.20 LT в результате торможения в атмосфере Земли небольшого астероида. На рисунке 21 представлена траектория движения метеорита по данным OpenStreetMap community.



Рис. 21. Траектория метеорита, упавшего в озеро Чебаркуль.

При рассмотрении метеорного следа как источника волновых возмущений в ионосфере, можно считать, что кинетическая энергия метеорита практически полностью передается окружающему газу [Голицын Г.С., Григорьев Г.И., Докучаев В.П. Изучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Физика Атмосферы и Океана, Т.13, №9, с.926-935, 1977]. В этом случае след метеорита может с достаточной степенью точности считатья источником вещества с некой эффективной массой, определяемой его кинетической энергией.

Поиск магнитогравитационных волн, которые, возможно, сопровождали рассматриваемое высокоэнергичное событие, был выполнен по доступным данным критических частот ионосферного слоя F2 и одновременным данным вариаций горизонтальной (H) и вертикальной (Z) компонент геомагнитного поля. Данные о вариациях критических частот были предварительно очищены от суточного хода. Дискретность используемых данных составляла 15 минут. Ионосферные и магнитные станции, а также их географические координаты представлены в таблице 3. Географическое положение станций представлено на рисунке 22.

		Табл	ица 3.
Название станции	Географическая широта	Географическая долгота	
Томск (ТК356)	56.5 с.ш.	84.9 в.д.	
Новосибирск (NVS)	54.8 с.ш.	83.2 в.д.	
Арти (ARS)	59.4 с.ш.	58.6 в.д.	



Рис. 22. Географическое расположение рассматриваемых ионосферных и магнитных станций, а также г. Челябинск

Обнаружение ΜΓΒ выполнялось сопоставлением динамических спектров одновременных данных о вариациях критических частот и компонент геомагнитного поля в день пролета метеорита. Согласно полученным результатам, магнитные возмущения имеют место в основном для вертикальной компоненты геомагнитного поля. На рисунке 23 представлены динамические спектры критических частот и вертикальной (Z) компоненты геомагниного поля, вычисленные по данным рассматриваемых станций. Поскольку полёт метеорного тела от момента входа в атмосферу до момента его взрыва продолжался около 32 секунд, с учетом разрешения используемых данных можно считать образование его следа в атмосфере пракически мгновенным. Следовательно, отмеченное на рисунке 23 вертикальной линией время столкновения метеорита с поверхностью Земли, можно считать временем образования следа.



Рис. 23. Динамические спектры вариаций критических частот на станции Томск и вариации вертикальной (Z) компоненты геомагнитного поля на станциях Новосибирск, и Арти в день пролета метеорита Челябинск (15 февраля 2013). Вертикальной линией отмечено время столкновения метеорита с земной поверхностью

Анализ динамических спектров (рис. 23) демонстрирует повышенный уровень геомагнитной возмущенности на станции Новосибирск в течение всего дня. Вместе с тем, отмечается отдельное интенсивное возмущение продолжительностью порядка 4 часов, начавшееся приблизительно через 40 минут после пролета метеорита (04.00 UT). В это же время на станции Томск наблюдаются два последовательных возмущения критической частоты ионосферного слоя F2. Поскольку отмеченные ионосферные возмущения происходили на фоне интенсивного магнитного возмущения, можно предположить, что в данном случае от метеорного следа образовались две последовательные медленные магнитогравитационные волны. С учетом расстояния от места падения метеорита (оз. Чебаркуль) до указанных ионосферной и магнитной станций скорости этих волн составляют порядка 600 м/с для первой волны и порядка 200 м/с для второй волны. Отметим, что возмущение магнитного поля от второй волны наблюдается также на магнитной станции Арти (Arsi) и его интенсивность здесь выше, чем на станции Новосибирск. Вместе с тем, магнитное возмущение от первой волны на данной станции не регистрируется. Это может свидетельствовать о преимущественном направлении распространения первой волны на юго-восток и направлении распространения второй волны на северо-запад.

Отметим, что на станции Томск регистрируется ионосферное возмущение (08.30 UT), которое не сопровождается синхронными возмущениями геомагнитного поля. С учетом расстояния от эпицентра события до этой ионосферной станции и времени регистрации возмущения, можно заключить, что в данном случае имеет место акустико-гравитационная волна, распространяющаяся со скоростью порядка 120 м/с.

Таким образом, по результатам исследования высокоэнергичного события в виде пролета Челябинского метеороида, произошедшего 15 февраля 2013 г., были обнаружены две медленные МГВ со скоростями порядка 600 м/с и 200 м/с, соответственно. Полученные результаты согласуются с оценками, выполненными по дисперсионым кривым для МГВ в приэкваториальной области. С указанными скоростями может распространяться третья низкочастотная мода МГВ (рис. 4). Оцененный по динамическим спектрам плазменных и магнитных возмущений частотный диапазон обнаруженных МГВ составляет до $8 \cdot 10^{-4}$ Гц. Соответствующие данному диапазону частот масштабы длин волн, оцененные по дисперсионной кривой третьей моды МГВ (рис. 4), составляют не менее 80 км.

4. Поляризационные соотношения МГВ, сопоставление с экспериментальными данными о возмущениях концентрации ионосферного слоя F2 и возмущениях магнитного поля.

На основе неоднородной системыуравнений магнитной гидродинамики с источником вещества M и внешней силой F от источника распределенного тока I, представленной выше, можно записать выражения для безразмерных возмущений плотности R, давления P и магнитного поля G через компоненты смещения в МГВ:

$$\begin{split} R &= \frac{\xi_Z}{H} - i \sqrt{\frac{\beta}{2\gamma}} \left(\frac{\xi_X}{H} K_X + \frac{\xi_Y}{H} K_Y + \frac{\xi_Z}{H} K_Z \right), \\ P &= \frac{\xi_Z}{H} - i \sqrt{\frac{2}{\beta\gamma}} \left(\frac{\xi_X}{H} K_X + \frac{\xi_Y}{H} K_Y + \frac{\xi_Z}{H} K_Z \right), \\ G &= -\frac{i}{A} \sqrt{\frac{\beta}{2\gamma}} \left(\frac{\xi_X}{H} K_X + \frac{\xi_Y}{H} K_Y + \frac{\xi_Z}{H} K_Z \right), \text{ rge } A = 1 - \frac{i}{W \cdot \text{Re}_m} \left(\frac{\gamma}{4} + \frac{2}{\beta\gamma} K + i \sqrt{\frac{2}{\beta\gamma}} K_Z \right). \end{split}$$

Здесь Кх, Ку, Кz – компоненты безразмерного волнового вектора К.

Численные расчеты спектральных компонент смещений с учетом приведенных безразмерных выражений для спектральных компонент плазменных (плотности R и давления P) и магнитных G возмущенийпозволяют вычислить их значения для источника вещества и источника распределенного тока.

Значения *R*, *P* и *G*, вычисленные для источника вещества, в зависимости от Kx и Kz представлены на рисунке 24. При этом были рассмотрены следующие источники:

источник, вытянутый вдоль геомагнитного поля $(a_x > a_z)$, т.е. вдоль оси ОХ; источник, вытянутый вертикально $(a_z > a_x)$, т.е. вдоль оси ОZ и цилиндрический источник, симметричный относительно оси ОY $(a_x = a_z)$. Значение частоты источника при этом считалось постоянным и равным W = 0.0055 (0.7 Гц).



Рис. 24. Зависимость спектральных амплитуд безразмерных плазменных и магнитных возмущений от горизонтальных и вертикальных длин волн для различных источников: сплошная линия соответствует источнику, вытянутому в вертикальном направлении ($a_x = 7$ км, $a_z = 1$ км); крупный пунктир – источнику, вытянутому в горизонтальном направлении ($a_x = 1$ км, $a_z = 7$ км); мелкий пунктир – симметричному вдоль осей Ох и Оz источнику ($a_x = 1$ км, $a_z = 1$ км)

Согласно результатам, приведенным на рисунке 24, наибольшие значения давления, плотности и магнитного поля достигаются при равных масштабах источника вдоль горизонтальной и вертикальной оси 1 км. Приведенные для сравнения графики, вычисленные для источников, вытянутых в горизонтальном и вертикальном направлении, показывают меньшие значения для параметров возмущений среды. Полученные зависимости от горизонтального (Кх) и вертикального (Кz) масштаба длины волны показывают, что наибольшие значения параметров давления, плотности и магнитного поля наблюдается при значении горизонтальных длин волн порядка 7-8 км и значении вертикальных длин волн 40 км. Эти результаты согласуются с ранее сделанными выводами относительно размеров источников наиболее эффективных для генерации МГВ.

Численный анализ характерных горизонтальных и вертикальных масштабов источника вещества, наиболее эффективных для генерации МГВ в приэкваториальной области ионосферы показали, что наибольшие значения спектральных компонент параметров среды достигаются при равной горизонтальной и вертикальной протяженности (до 3 км) источника, задаваемого в виде бесконечно длинного шнура

вдоль оси ОҮ. Наиболее близким данному модельному источнику является след метеорного болида. Оценка возмущения параметров среды, возникающих при пролете этих космических тел, была выполнена в работе [Голицын Г.С., Григорьев Г.И., Докучаев В.П. Изучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Физика Атмосферы и Океана, Т.13, №9, с.926-935, 1977], и там же приведены основные параметры метеоров и оставляемых ими следов. Так, наиболее вероятная масса метеоров, попадающих в атмосферу с интервалами до 5 раз в сутки составляет до 10^4 г, их скорость находится в интервале $(3\div7)\cdot10^6$ см/с, и начальный радиус следа составляет до 10^4 см. Однако в указанном исследовании предполагалась вертикальная ориентация метеорного следа, т.е. по сути, строго вертикальное падение болида. Вместе с тем, многочисленные экспериментальные наблюдения за полетами метеоров в атмосфере показывают, что большинство попавших в земную атмосферу космических тел оставляют скорее горизонтально ориентированные следы.

Выполним оценку возмущенных значений спектральных составляющих давления, плотности и магнитного поля в приэкваториальной ионосфере, вызываемых пролетом метеора массой 1 кг, который летит вдоль оси ОУ без потери высоты со скоростью $4\cdot10^4$ см/с и оставляет след радиусом 10^4 см. При этом можно считать, что практически вся кинетическая энергия метеора передается окружающему газу [Докучаев]. Эффективная масса метеора может быть рассчитана по формуле

$$\frac{mV^2}{2} = m_{_{9\phi}} \cdot V_S^2$$

где *m* – реальная масса метеора, *V* – его скорость, $m_{3\phi}$ – эффективная масса, V_s – скорость звука. Считая скорость звука на высоте слоя F2 ионосферы равной 5·10⁴ см/с и принимая во внимание указанные выше параметры метеора, оценка его эффективной массы дает величину порядка 1,6·10⁸ г.

На рисунке 25 представлены графики зависимости значений давления, плотности и магнитного поля в зависимости от горизонтального (левый столбец) и вертикального (правый столбец) масштаба длин волн, вычисленные при фиксированном значении частоты W = 0.0055 (0.07 Гц).



Рис. 25. Поляризационные соотношения МГВ, вычисленные для реалистичного источника в виде следа от метеорного болида, ориентированного вдоль оси ОУ

Выполним оценку значений спектральных компонент давления, плотности и магнитного поля в среднеширотной ионосфере при генерации МГВ токовым источником, задаваемым в виде бесконечно длинного цилиндрического шнура, ориентированного вдоль оси ОҮ. В рассматриваемой области ионосферы источником, соответствующим рассмотренному выше модельному источнику, может являться экваториальная токовая струя, которая формируется в спокойной низкоширотной ионосфере под действием приливных течений и является достаточно развитой [Беспалов П.А., Савина О.Н. Экваториальная токовая струя и ее отклик на внешние электромагнитные воздействия // Изв. ВУЗов Радиофизика, Т.55, №4, с.237-254, 2012]. Согласно экспериментальным данным, экваториальная токовая струя находится в интервале широт 4-6°, что соответствует диаметру порядка 400 км, и имеет протяженность от 9:00 до 15:00 LT. Максимальные значения плотности тока в данной струе на высоте 100 км находятся в интервале 2÷9 мкА/м².

На рисунке 26 представлены графики зависимости спектральных компонент давления, плотности и магнитного поля в среде при прохождении МГВ, генерируемой токовой струей диаметром 1 км с характерным значением плотности тока порядка 8 мкA/м². При этом значения частоты и горизонтального и вертикального масштаба длин волн считались фиксированными и равными значениям W = 0.003, Kx = 0.0028, Kz = 0.0008, которые были определены выше как наиболее эффективные для генерации МГВ.



Рис. 26. Значения возмущенных спектральных компонент давления, плотности и магнитного поля в ионосферной среде при прохождении МГВ: левый столбец – зависимость от Кх, правый столбец – зависимость от Кz

При сопоставлении полученных зависимостей значений спектральных компонент давления, плотности и магнитного поля для выбранных источников вещества и тока от вертикального масштаба длин волн можно отметить ряд особенностей. В случае генерации МГВ токовым источником значения спектральных компонент давления и магнитного поля меньше в области более коротких вертикальных длин волн. Вместе с тем, значения плотности среды максимальны на длине волны порядка 200 км (Kz = $2 \cdot 10^{-4}$). Для случая генерации МГВ выбранным источником вещества рассматриваемые зависимости спектральных компонент имеют максимумы – плотность и магнитное поле на длине волны порядка 1.2 км (Kz = 0.033) и давление на длине волны порядка 800 м (Kz = 0.047). Следует отметить, что масштабы длин волн наиболее эффективно генерируемых рассмотренными источниками отличаются на два порядка.

Сопоставление зависимостей спектральных компонент среды и магнитного поля от значений горизонтальных длин волн (Kx) полученных для выбранных источника вещества и токового источника демонстрирует сходное поведение. Каждая из спектральных компонент имеет максимум на конкретной горизонтальной длине волны. Для токового источника спектральные компоненты давления, плотности и магнитного поля имеют наибольшее значение на горизонтальных длинах волн порядка 13-15 км (Kx = 0.0028÷0.003). Для источника вещества максимумы значений спектральных компонент среды и магнитного поля отмечаются на длинах волн порядка 7.5 – 8 км (Kx = 0.0051÷0.0053).

5. Определение характерных особенностей распределения поля магнитогравитационных волн вдоль меридиональных и широтных направлений.

Полученные дисперсионные соотношения для МГВ в приэкваториальной области ионосферы позволяет получить пространство волновых векторов (зависимость горизонтального волнового числа (Kx), продольного магнитному полю, от вертикального волнового числа (Kz)) для волн, распространяющихся в среде с бесконечной проводимостью. Зависимость Kx от Kz для двух безразмерных частот W = 0.001 и 0.006 приведена на рисунке 27.



Рис. 27. Зависимость безразмерных компонент волнового вектора Kx от Kz для МГВ (слева) и для АГВ (справа). Черные линии соответствуют частоте W = 0.001, красные линии – частоте W = 0.006. Сплошная линия соответствует первой моде МГВ, пунктирная линия – второй

Согласно графикам, представленным на рисунке 27 (слева), резонансные направления распространения МГВ для обеих мод близки к вертикальному направлению. Пространство волновых векторов для второй моды в отличие от первой не зависит от

частоты. Горизонтальный (вдоль магнитного поля) размер источника для наиболее эффективной генерации МГВ не должен превышать 600 м. Вместе с тем, возможно распространение второй моды под углом порядка 25° к вертикали возбуждаемой источником с горизонтальным размером 800 м и более. Отмечаемые направления распространяющихся МГВ согласуются с выводами полученными из анализа дисперсионных кривых для МГВ в приэкваториальной области, представленных на рисунке 4. Сопоставление полученного пространства волновых векторов для МГВ с пространством для АГВ (рис. 27, справа) показывает, что резонансные наравления для АГВ не вертикальны. Это особенно заметно на более высоких частотах. Также с увеличением частоты происходит расширение области значений горизонтальных длин волн, в которой АГВ не распространяются. Для МГВ запрещенная область горизонтальных длин волн отсутствует.

Выполним оценку характерных особенностей распределения поля магнитогравитационных волн вдоль меридиональных и широтных направлений по экспериментальным данным. Ранее (пункт 2) по данным о синхронных возмущениях концентрации ионосферных слоев F2, E, Es и возмущениях компонент геомагнитного поля, было экспериментально подтверждено существование магнитогравитационных волн, генерируемых сильными подземными землетрясениями 8 января 2006 года в Турции и 17 июля 2006 года в Индонезии. Анализ динамических спектров в период подготовки землетрясения показал усиление МГВ активности за два дня до рассматриваемых событий. В таблице 4 представлены основные параметры рассматриваемых землетрясений и времена обнаруженя МГВ за два дня до их начала.

Таблица 4	ŧ
-----------	---

Дата землетрясения	Координаты эпицентра	Время начала UT	Магнитуда	Время обнаружения МГВ за 2 дня до события, UT
17.07.2006	9.33° ю.ш., 107.26° в.д.	08:19	7.7	00:00 02:00 04:15 08:15 12:15
08.01.2006	36.30° с.ш., 23.36°в.д.	01:35	6.8	09:00 16:30 19:00

Набор анализируемых данных X, Y, Z компонент геомагнитного поля, используемых для установления факта прохождения МГВ, был дополнен данными с магнитных станций, расположенных вокруг эпицентра землетрясения (рис. 28 а,б).



Рис. 28. Расположение магнитных станций относительно эпицентра землетрясений (отмечены красным маркером): а) событие 08.01.2006 г; б) событие 17.07.2006 г.

В таблице 5 представлены названия и географические координаты всех рассматриваемых станций.

		Таблица З
Название магнитной станции	Коорди	наты станции
	Широта	Долгота
	1	, ,
HURBANOVO	47.87	18.19
QSAYBEH	33.87	35.644
SAN FERNANDO	36.46	-6.2
TAMANRASSET	22.79	5.53
GUAM	13.58	144.87
GUANGZHOU	23.09	113.34
KAKADU	-12.686	132.472
PHUTHUY	21.028	105.951

Используемые данные X, Y, Z компонент геомагнитного поля предварительно были очищены от влияния токовых систем симметричной (SYM-H) и асимметричной (ASY-H) частей кольцевого тока с целью исключения магнитных возмущений, не связанных с прохождением МГВ. Обнаружение магнитных возмущений на рассматриваемых станциях, связанных с прохождением МГВ в установленные ранее времена регистрации этих волн, проводилось методом динамического спектрального анализа.

5.1. Землетрясение 08.01.2006 г.

Прохождение МГВ 6 января 2006 г. в 09:00 вызвало одновременное возмущение Z-компоненты геомагнитного поля, отмечаемого на станции L Aquila и возмущения критической частоты слоя F2 (станция San Vito). При анализе динамических спектров дополнительных магнитных станций (рисунок 29) в это же время отмечены максимумы интенсивности на спектрах всех станций, за исключением станции Tamanrasset, находящейся на юго-западе от эпицентра землетрясения.



Рис. 29. Динамические спектры Z-компоненты магнитного поля для магнитных станций L Aquila, Tamanrasset, SanFernando, Qsayben и Hurbanc. Красными стрелками указаны совпадения в возмущениях со станцией Laquila (42.38 с.ш., 13.32 в.д.) для МГВ в 09:00 UT

Рассмотрим МГВ, прохождение которой отмечается в 16.30 UT по совпадению максимума интенсивности динамического спектра У-компоненты геомагнитногополя и возмущения критической частоты слоя F2. При анализе динамических спектров У-

компонент рассматриваемых магнитных станций, обнаружены одновременные совпадения максимумов интенсивности спектров на всех пяти станциях (см. рисунок 30) во время проходжения МГВ.



Рис. 30. Динамические спектры Y-компоненты магнитного поля для магнитных станций L Aquila, Tamanrasset, SanFernando, Qsayben и Hurbanc. Красными стрелками указаны совпадения в возмущениях со станцией Laquila (42,38 с.ш., 13,32 в.д.) во время прохождения МГВ в 16:30 UT

Полученный результат свидетельствует о возможности распространения магнитного возмущения, вызванного прохождением МГВ, во всех направлениях. Однако отметим, что интенсивности максимумов динамических спектров различны – наиболее интенсивное возмущение отмечается на станции San Fernando, расположенной в западном направлении от эпицентра землетрясения. Наименее интенсивные возмущения имеют место на станциях Qsayben и Tamanrasset, расположенных в северном и восточном направлении от эпицентра. Это может свидетельствовать о преимущественно западном направлении распространения МГВ.

Аналогично было рассмотрено прохождение МГВ, зарегистрированной в 19:00 по одновременным возмущениям Х-компоненты геомагнитного поля и критической частоты слоя F2. В данном случае синхронное возмущение Х-компоненты отмечается на динамическом спектре только для станции Tamanrasset (см. рисунок 31), что может свидетельствовать о преимущественном юго-западном направлении распространения МГВ возмущения.



Рис. 31. Динамические спектры Х-компоненты магнитного поля для магнитных станций L Aquila, Tamanrasset, SanFernando, Qsayben, Hurbanc. Красной стрелкой указаны совпадения в возмущении со станцией Laquila (42,38 с.ш., 13,32 в.д.) для МГВ в 19:00 UT

Сравнительный анализ наблюдения трех МГВ, вызванных подготовкой землетрясения 8 января 2006 г. показывает, что в рассматриваемом случае землетрясение является точечным источником МГВ, вследствие чего усиление геомагнитной активности наблюдается практически по всем направлением от эпицентра землетрясения. Однако, учитывая интенсивности вызываемых возмущений компонент геомагнитного поля, можно заключить, что преимущественно МГВ распространяются в западном и юго-западном направлениях.

5.2. Землетрясение 17.07.2006 г.

Во время подготовки землетрясения 17 июля 2006 г. зарегистрировано пять случаев прохождения МГВ от будущего эпицентра события. Два случая в 08:15 и в 12:15 UT были связаны с возмущением Х-компоненты геомагнитного поля, которое в первом событии сопровождалось одновременным возмущением критических частот слоев Es и F2 ионосферы, а во втором случае – только возмущением кртической частоты слоя F2. При анализе динамических спектров с дополнительных магнитных станций Guangzhou, Guam, Kakaduu и Phythuy (см. рисунок 32) для МГВ в 08:15 UT обнаружены синхронные возмущения Х-компоненты на трех рассматриваемых станциях за исключением станций Guangzhou и Phythuy, расположенных в северном направлении от эпицентра. МГВ, зарегистрированная в 12:15 UT вызвала возмущения разной интенсивности на всех Наибольшая интенсивность рассматриваемых магнитных станциях. максимумов динамических спектров наблюдается на станциях Guam, Learmonth и Kakadu, что свидетельствует о преимущественном юго-восточном направлении распространения МГВ.



Рис. 32. Динамические спектры Х-компоненты магнитного поля для магнитных станций Learmonth, Guangzhou, Guam, Kakadu и Phythuy. Красной стрелкой указаны совпадения в возмущении со станцией Learmonth (21,9° ю.ш., 114° в.д.) для МГВ, зарегистрированных в 08:15 и 12:15 UT

Возмущение Y-компоненты геомагнитного поля отмечено при прохождении МГВ в 00:00 и 04:15 UT. В первом случае зарегистрированное магнитное возмущение сопровождалось возмущением критических частот ионосферных слоев Es и F2, а во втором случае – возмущением критической частоты слоя F2. На рисунке 33 представлены динамические спектры Y-компоненты для рассматриваемых магнитных станций и стрелками отмечены синхронные возмущения Y-компоненты для двух случаев прохождения МГВ. По результатам проведенного сопоставления можно отметить, что в обоих случаях одновременные возмущения Y-компоненты отмечаются только на двух станциях – Learmonth и Kakadu, причем интенсивность возмущения на станции Kakadu заметно выше. Это может свидетельствовать о преимущественно восточном направлении распространения МГВ.



Рис. 33. Динамические спектры Y-компоненты магнитного поля для магнитных станций Learmonth, Guangzhou, Guam, Kakaduu Phythuy. Красной стрелкой указаны совпадения с возмущением на станции Learmonth (21.9° ю.ш., 114° в.д.) при прохождении МГВ в 00:00 и 04:15 UT

Возмущение вертикальной Z-компоненты геомагнитного поля было отмечено при прохождении двух МГВ в 02:00 и 04:15 UT. В первом случае было зарегистрировано одновременное возмущение критической частоты слоя Es, а во втором случае – критической частоты слоя F2. Сопоставление динамических спектров, вычисленных для всех рассматриваемых магнитных станций (см. рисунок 34) показывает, что для МГВ, распространяющейся в 01:45 UT возмущение Z-компоненты геомагнитного поля наблюдается только ДЛЯ станции Learmonth. Полученный результат может свидетельствовать о южном направлении распространения МГВ. Для случая регистрации МГВ в 04:15 UT выше был сделан вывод о ее преимущественном направлении распространения на восток по анализу возмущений У-компоненты геомагнитного поля. Однако в данном случае отмечается одновременное магнитное возмущение Z-компоненты на всех рассматриваемых станциях. Ниибольшая интенсивность возмущений отмечается на динамических спектрах станций Guangzhou и Phythuy, которые находятся севернее эпицентра землетрясения. Таким образом, направление распространения МГВ в данном случае не может быть однозначно определено по возмущениям компонент геомагнитного поля. Возможно, что в данном случае землетрясение является точечным источником, и волна, распространяющаяся по всем направлениям, возмущает У-компоненту в восточном направлении, а Z-компоненту – в северном направлении.



Рис. 34. Динамические спектры Z-компоненты магнитного поля для магнитных станций Learmonth, Guangzhou, Guam, Kakaduu Phythuy Красной стрелкой указаны совпадения с возмущением на станции Learmonth (21,9° ю.ш., 114° в.д.) при прохождении МГВ в 01:45 и 04:15 UT

Таким образом, анализ направлений распространения МГВ, определяемых по магнитным возмущениям компонент Х, Y и Z геомагнитного поля, демонстрирует преимущественное западное и юго-западное направление распространения МГВ, возникающих при подготовке землетрясения 8 января 2006 г. При исследовании подготовки события 17 июля 2006 г отмечаются преимущественные ннаправления на север, восток и юго-восток.

6. Количественная связь между вариациями ключевых гелиогеофизических параметров и классами ионосферной возмущенности.

Ранее в рамках данного проекта (2012 г) на основе значений введенного индекса IAI (Ionospheric Activity Index) был выполнен анализ ионосферной возмущенности средних широт в меридиональных и широтных направлениях. При опреативной диагностике состояния ионосферной возмущенности возникает необходимость установления вклада гелиогеофизических параметров, оказывающих заметное влияние на ионосферу средних широт, в общий уровень ионосферной возмущенности.

Для оценки ионосферной возмущенности были использованы данные за полный цикл солнечной активности (1975-1986 г) трех расположенных вдоль одной широты станций вертикального зондирования Москва (55° с.ш., 37° в.д.), Свердловск (56° с.ш., 60° в.д.) и Томск (56° с.ш., 85° в.д.). Пропуски значений критических частот, связанные с

истощением ионосферных слоев в ночное время и техническими сбоями на станциях, заполнялись методом интерполяции кубической функцией. Уровень магнитной возмущенности в авроральной области оценивался по значениям индекса AE, уровень глобальной геомагнитной возмущенности – по значениями индекса Dst. Степень геомагнитной активности на конкретной станции определялся на основе значений горизонтальной компоненты геомагнитного поля (MF), а уровень текущей солнечной активности – на основе значений длинноволновой части рентгеновского излучения (XL) в диапазоне 1–8 Å. Дискретность всех используемых данных составляла 1 час.

Критические частоты ионосферного слоя F2 были использованы для вычисления значений индекса ионосферной активности IAI на каждой из рассматриваемых станций вертикального зондирования по методике, представленной в работе [Бархатов и Бархатова, 2012]. Исследование зависимости уровня возмущенности ионосферы от рассматриваемых гелиогеофизических параметров потребовало разработки методов классификации значений этих параметров. Для неотрицательных значений индекса AE было введено 5 классов, которые соответствуют различной степени авроральной возмущенности. При значениях индекса AE < 500 нТл авроральные возмущения считались фоновыми. Каждому следующему классу авроральной возмущенности соответствовало увеличение значений индекса AE на 300 нТл. В результате такой классификации был введен новый параметр CAE (classificated AE), который может принимать значения от 0 до 4. Именно значения параметра CAE сопоставлялись в дальнейшем со значениями индекса IAI.

При классификации значений длинноволнового рентгеновского излучения (XL) было предварительно выполнено вычитание среднего значения из рассматриваемой последовательности данных. Возникающим при этом малым отрицательным значениям в очищенной последовательности XL присваивлся нулевой (фоновый) уровень возмущенности. Для остальных значений было проведено разделение на классы со значениями от 1 до 4. Каждому следующему классу соответствовало увеличение интенсивности излучения XL в 3 раза. По результатам выполненной классификации был введен новый параметр CXL (classificated XL), значения которого сопоставлялись со значениями индекса IAI.

По методике, аналогичной классификации ионосферной возмущенности, была выполнена классификация значений горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Для этого в международные спокойные (QD) и возмущенные дни (DD) для 1975 и 1982 гг. были определены максимальные и минимальные значения горизонтальной компоненты геомагнитного поля. На основе данных значений было выделено 7 классов магнитной возмущенности со значениями от -4 до 3 и введен новый параметр CMF (classificated MF), который характеризуюет текущую локальную магнитную возмущенность на рассматриваемой станции.

В качестве основных солнечно-магнитосферных параметров, оказывающих заметное влияние на уровень возмущенности среднеширотной ионосферы, были выбраны [Бархатова и др., 2009]: индекс AE, интенсивность длинноволнового рентгеновского излучения (XL) в диапазоне длин волн 1–8 Å и горизонтальная компонента геомагнитного поля на каждой рассматриваемой станции. Однако для определения факта связи рассматриваемого параметра с индексом IAI оригинальные значения всех указанных параметров были подвергнуты классификационной индексации (параметры CAE, CXL, CMF).

Перед тем, как приступить непосредственно к оценке степени влияния того или иного индексированного параметра на вариации индекса IAI, из его значений должны быть удалены все регулярные явления, которые могут накладываться на искомые эффекты и искажать их. Процедура создания индекса IAI предполагает очистку оригинальных значений критических частот от периодических явлений – суточного хода, 27-дневного цикла, а также любых других долгопериодных вариаций. Однако такое регулярное

явление, как проход терминатора не может быть устранено в рамках методики расчета индекса, поскольку время восхода Солнца меняется в зависимости от сезона. Для обнаружения эффекта прохода терминатора в значениях индекса IAI для каждой рассматриваемой станции было определено время ежедневного восхода по значениям солнечного зенитного угла. Далее рассматривался временной интервал от двух часов до восхода и двух часов после (всего 5 часов). Для каждого часа рассматриваемого интервала было проведено суммирование значений индекса ІАІ в течение года. На рис. 35 представлена гистограмма, демонстрирующая значения суммарного индекса IAI для каждого часа, вычисленные на станции Москва за период с 1975 по 1982 г. Она успешно влияние эффекта прохождения терминатора на ионосферную демонстрирует возмущенность. Наибольшие значения суммарный годовой индекс ІАІ принимает за час до восхода и в момент восхода Солнца, что объясняется использованием часовых данных для определения времени восхода, которые не дают достаточной степени точности. Обнаруженный регулярный эффект удалялся из данных индекса IAI вычитанием вклада возмущенности, вызванной проходом терминатора.



Рис. 35. Гистограмма суммарных значений индекса IAI в зависимости от времени до (отрицательные значения) и после (положительные значения) прохода терминатора через станцию Москва за период с 1975 по 1982 гг. По оси абсцисс отложено условное время в часах («0» соответствует восходу Солнца над горизонтом), по оси ординат – суммарные значения индекса IAI за соответствующий год.

Поиск связей возмущений индекса IAI с возмущениями индексированных солнечно-магнитосферных параметров и оценка уровня этих связей выполнялись сопоставлением этих индексов. Совпадение возмущений считалось обнаруженным тогда, когда оба параметра были отличными от нуля. Для количественной характеристики связи индекса IAI и индексированных параметров был вычислен параметр ICom, значения которого принимались равными нулю, если хотя бы одно из значений IAI или рассматриваемого индексированного параметра было нулевым. В противном случае проводилось вычисление значений ICom. Для определения связи индекса IAI и индексированного возмущения (САЕ), ненулевые значения параметра ICom вычислялись как модуль частного САЕ/IAI. Рисунок 36 демонстрирует значения индекса IAI (верхняя панель) на станции Москва, индекса САЕ (средняя панель), а также наличие совпадений в их значениях (параметр ICom, нижняя панель) для мая 1978 г. Отметим, что значения параметра CAE равные 4 соответствуют значениям индекса AE более 1400 нТл,

что свидетельствует о развитии интенсивной суббури. На рис. 36 на интервале от 0 до 100 часов отмечается именно такое возмущение. При этом происходит заметное увеличение значений индекса IAI. Подобная особенность отмечается также вблизи 200, 500 и 700 часов. Полученные результаты свидетельствуют о наличии связи параметра CAE с индексом IAI. Аналогичная связь отмечена и на других анализируемых станциях. Оценка степени вклада авроральной возмущенности в индекс IAI дает величину порядка 10%.



Рис. 36. Значения индекса IAI (верхняя панель) на станции Москва, индекса САЕ (средняя панель), параметр ICom (нижняя панель) для мая 1978 г.

Оценка влияния возмущений горизонтальной компоненты геомагнитного поля на индекс IAI проводилась аналогичным образом. Для количественной характеристики связи индекса и параметра CMF также вычислялся параметр ICom, однако здесь его значения, отличные от нуля, равнялись 1. Таким образом, этот параметр отражает наличие или отсутствие совпадений значений IAI и CMF. Анализ полученных результатов показывает, что во времена продолжительных геомагнитных возмущений значения параметра ICom равны 1 на временных интервалах порядка 2-3 часов, что свидетельствует о синхронности возмущений IAI и CMF. Таким образом, можно заключить, что возмущения горизонтальной компоненты геомагнитного поля находят свое отражение в значениях индекса IAI. По нашим оценкам, величина вклада геомагнитной возмущенности в эти значения составляет порядка 20%.

Следующим значимым параметром, который оказывает заметное влияние на среднеширотной ионосферы, уровень возмущенности является длинноволновое рентгеновское излучение. Поиск связи индексированных значений рентгеновского излучения CXL с индексом IAI проводился по той же схеме, что и для предыдущего параметра – значения параметра ICom, отличные от нуля, равнялись 1. Проведенный анализ показывает, что отличные от нуля значения ICom в случае связи IAI с рентгеновским излучением возникают практически всегда при значениях CXL превышающих 2, а также в случае небольших значений, длительностью более часа. Это свидетельствует о влиянии длинноволнового рентгеновского излучения на уровень возмущенности среднеширотной ионосферы. Согласно проведенным оценкам, степень вклада длинноволнового рентгеновского излучения в индекс IAI составляет около 10%.

Таким образом, изменения во всех заявленных гелиогеофизических параметрах действительно находят свое отражение в значениях предложенного нами индекса IAI. Это свидетельствует о его ценности для описания возмущенности ионосферы средних широт. В целом, суммарный вклад авроральной возмущенности, геомагнитной возмущенности и возмущенности вызванной воздействием длинноволнового рентгеновского излучения в ионосферную возмущенность составляет около 40%.

7. Методика прогноза ионосферной возмущенности на основе значений индекса ионосферной активности. Прогнозирование возмущений, вызванных распространением МГВ на больших расстояниях, генерируемых высокоэнергичными источниками естественного и искусственного происхождения.

Изменение уровня ионосферной возмущенности под влиянием вариаций солнечномагнитосферных параметров в ряде случаев требует ее оперативного прогнозирования. В нашей работе уровень возмущенности среднеширотной ионосферы оценивается значениями разработанного индекса IAI. Прогнозирование значений этого индекса позволит оценивать ожидаемый уровень реакции ионосферы на возмущение солнечномагнитосферных параметров. В качестве инструмента для осуществления прогноза значений IAI были использованы нейросетевые технологии, которые включали в себя нейронные сети следующих типов: сеть прямой передачи FF (двухслойная, по 5 нейронов в слое), сеть Элмана ELM (двухслойная, по 5 нейронов в слое), нейронечеткая сеть FUZZY (2-5 правил на входной параметр в зависимости от объема входных данных, форма правил «колокол»).

Эксперименты по прогнозированию были выполнены на данных станции Москва за 1986 г. В качестве дополнительных параметров были использованы индекс AE, интенсивность длинноволнового рентгеновского излучения XL и горизонтальная составляющая геомагнитного поля (MF), измеренная на данной станции. Обучающий массив для нейронных сетей составлял 2/3 от полного годового массива (5780 значений), тестовый массив – 1/3 (2890 значений). Ниже приведены полученные результаты нейросетевых экспериментов в порядке их усложнения путем добавления новых входных данных:

1. Восстановление значений IAI только по предыстории. На вход подавались по очереди и в комбинациях следующие параметры: первая производная IAI, значение IAI за предыдущий час, за предыдущие 2 часа, за предыдущие 3 часа. Выяснилось, что только первая производная IAI дает весомый вклад в нейросетевой ответ, в то время как значения предыстории за 1-3 часа практически не несут полезной информации. Коэффициент корреляции между реальной и восстановленной последовательностями для сети прямой передачи (FF) составил 0.66, для сети Элмана – 0.64, а для сети нечеткой логики Fuzzy – 0.73. Таким образом, сеть Fuzzy является наиболее предпочтительной в данном случае.

2. Восстановление значений IAI только по одному дополнительному параметру. На вход подавались по очереди параметры CXL, CMF, CAE. Полученные коэффициенты корреляции между реальной и восстановленной последовательностью для каждого параметра не превышают 0,1. Это свидетельствует о том, что данные параметры оказывают косвенное влияние на уровень ионосферной возмущенности. Отметим, что в данном случае на вход нейросети не подавалась первая производная индекса IAI.

3. Восстановление значений IAI только одному дополнительному параметру с включением первой производной IAI (d(IAI)). Полученные коэффициенты корреляции между реальной и восстановленной последовательностью для каждого параметра представлены в таблице 2. Сравнение результатов данного эксперимента с предыдущим показывает необходимость включения первой производной IAI в число входных параметров для нейросети, поскольку она содержит динамические изменения значений индекса. По сравнению с первым экспериментом, добавление параметра CXL на вход сети прямой передачи увеличивает качество восстановления на 6%, параметра CMF – на 8%, и

параметра САЕ – на 6%. Отметим, что при включении дополнительных параметров использование сети прямой передачи дает наилучшие результаты, тогда как при их отсутствии лучший результат дает сеть Fuzzy.

4. Восстановление значений IAI по парным комбинациям параметров с включением первой производной IAI. В данном эксперименте на вход подавались по очереди пары параметров СХL, СМF, САЕ в комбинациях с первой производной IAI. Соответствующие коэффициенты корреляции между реальной и восстановленной последовательностью приведены в таблице 6. В данном случае наиболее эффективной также является сеть прямой передачи (FF). Введение комбинаций из двух дополнительных параметров в среднем увеличивает эффективность прогнозирования на 1-2%.

Таблица 6.

Параметры	Сеть прямой передачи	Сеть Элмана	Сеть Fuzzy
CXL+d(IAI)	0.72	0.70	0.70
CMF+d(IAI)	0.74	0.68	0.69
CAE+d(IAI)	0.72	0.68	0.71
MF+AE+d(IAI)	0.75	0.67	0.70
MF+XL+d(IAI)	0.75	0.68	0.68
AE+XL+d(IAI)	0.74	0.66	0.70

На рис. 37 представлен пример значений индекса IAI, восстановленных нейронной сетью прямой передачи с добавлением на вход первой производной IAI и комбинации параметров CMF+CAE (черный цвет), сопоставленных с реальными значениями индекса IAI (серый цвет).



Рис. 37. Пример значений индекса IAI, восстановленных нейронной сетью прямой передачи с добавлением на вход первой производной IAI и комбинации параметров MF+AE ((серый) зеленый цвет). Черным цветом представлены реальные значения индекса IAI в это время.

Таким образом, по результатам проведенных нейросетевых экспериментов можно сделать вывод о возможности эффективного краткосрочного прогнозирования значений индекса IAI. Предпочтительным является тип нейросети прямой передачи со следующими входными параметрами: первая производная индекса IAI и комбинация пары параметров: горизонтальная составляющая геомагнитного поля плюс индекс AE, или горизонтальная составляющая геомагнитного поля плюс интенсивность длинноволнового рентгеновского излучения. В этом случае эффективность прогноза составляет 75%. Полученные

результаты по определению ключевых гелиогеофизических параметров, оказывающих влияние на уровень возмущенности среднеширотной ионосферы, и сконструированная нейроная сеть, которая имеет оптимальную конфигурацю для прогноза состояния ионосферной активности могут быть использованы для прогноза МГВ, возбуждаемых высокоэнергичными геофизическими событиями.