ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ИОНОСФЕРЫ В ЗАПАДНОМ ОТДЕЛЕНИИ ИЗМИРАН

И.И.Шагимуратов, И.В. Карпов, Ю.Н. Кореньков, Ю.В. Черняк

Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ЗО ИЗМИРАН)

В 1992 г. на базе магнито-ионосферной обсерватории в Калининграде, образовано Западное отделение ИЗМИРАН. В ЗО ИЗМИРАН с 1961 г. проводятся регулярные наблюдения ионосферы и геомагнитного поля, выполняется широкий комплекс экспериментальных и теоретических исследований. В статье дано краткое описание исследований, выполняемых в ЗО ИЗМИРАН в настоящее время. Важным достижением экспериментальных исследований являются уникальные методики анализа состояния ионосферы на основе приёма сигналов спутников ГНСС. Результаты таких наблюдений в периоды гелио-геомагнитных возмущений и их анализ кратко представлены в статье. Теоретические исследования выполняются методами математического моделирования с применением, разработанной в ЗО ИЗМИРАН, глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и электрических полей ГСМ ТИП. На основе этих исследований получен ряд важных результатов, касающихся механизмов формирования ионосферных возмущений в различных геофизических условиях. В статье приведено краткое описание структуры модели ГСМ ТИП и анализ результатов моделирования сейсмических эффектов в ионосфере.

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, магнитное поле Земли, математическое моделирование, GPS/ГЛОНАСС-диагностика.

1. ИСТОРИЯ ЗАПАДНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

В 1961 г. постановлением Совета министров СССР, согласно программе подготовки первого Международного геофизического года, в Калининградской области в пос. Ульяновка была создана магнито-ионосферная обсерватория Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук. Выбор места расположения обсерватории определялся, прежде всего, малым уровнем электромагнитных полей и близостью водного пространства, что давало возможность вести исследования по радиолокации и распространению радиоволн различных диапазонов. Первоначальной задачей обсерватории было непрерывное круглосуточное наблюдение ионосферы методом вертикального зондирования и вариаций геомагнитного поля с регулярным предоставлением этих данных в Международный центр данных (МЦД-2), Москва. Эта служба ведётся в отделении и в настоящее время.

Шагимуратов Ирк Ибрагимович — директор, кандидат физико-математических наук, shagimuratov@mail.ru

Карпов Иван Викторович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, ivkarpov@inbox.ru

Кореньков Юрий Николаевич — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, kor_yu@mail.ru

Черняк Юрий Викторович, заведующий обсерваторией, кандидат технических наук, urcherniak@mail.ru

В 1970—1980-х гг. в обсерватории сформировались научные группы по направлениям распространения радиоволн, экспериментальных методов исследования ионосферы и математического моделирования ионосферных процессов, результаты исследований которых получили высокую оценку у специалистов.

В 1992 г. обсерватория была преобразована в Западное отделение (ЗО) ИЗМИРАН. В настоящее время в ЗО ИЗМИРАН выполняются научные исследования и мониторинговые наблюдения по научным направлениям в ионосферной тематике: мониторинг состояния ионосферы и магнитного поля Земли, исследование условий распространения радиоволн коротковолнового (КВ) диапазона, исследование состояния атмосферы и ионосферы на основе спутниковых наблюдений, теоретические исследования ионосферных процессов методами математического моделирования.

2. ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ GPS/ГЛОНАСС

В настоящее время наиболее широко используемым средством диагностики ионосферы являются навигационные системы GPS/ГЛОНАСС (Global Positioning System/Глобальная навигационная спутниковая система). Спутники излучают сигналы на двух когерентных частотах — 1,2/1,6 ГГц, дифференциальная задержка которых является мерой электронного содержания на луче, соединяющем спутник и наземный приёмник. Системы GPS/ГЛОНАСС являются основным источником получения информации о полном электронном содержании (ПЭС) в глобальном масштабе измерения и по своей полноте превосходят все другие известные методы.

Космическая группировка в каждой из систем насчитывает 24 спутника, расположенных на круговых орбитах с высотой около 20 тыс. км, что позволяет проводить диагностику ионосферы одновременно по всему земному шару. В отличие от системы GPS спутники системы ГЛОНАСС имеют большее наклонение (65°), что обеспечивает более эффективную диагностику высокоширотной ионосферы. Измерения ПЭС обеспечиваются широко разветвлённой международной сетью GPS-станций, число которых на сегодняшний день насчитывается свыше четырёх тысяч. Над каждой станцией за сутки наблюдается более 30 пролётов спутников каждой из систем, что обеспечивает непрерывный мониторинг динамики ПЭС для реальных геофизических условий. В Западном отделении ИЗМИРАН разработана методология обработки GPS/ГЛОНАСС наблюдений для определения абсолютной величины ПЭС и реализована, по многостанционным GPS-наблюдениям, технология формирования карт ПЭС.

2.1. Измерения полного электронного содержания по GPS-наблюдениям

Как известно, двухчастотные групповые измерения задержек сигналов спутников навигационной системы GPS принципиально позволяют выделить в чистом виде ионосферную часть задержки и, соответственно, определить абсолютное значение полного электронного содержания (*англ*. Total Electron Content — TEC). В общем случае дифференциальную задержку можно представить следующим виде [Шагимуратов и др. 1996; Shagimuratov, Baran, 2002]:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{S_{\text{TEC}}}{M} + A_p, \tag{1}$$

здесь P_1 и P_2 — измеряемые групповые задержки на частоте f_1 и f_2 (в [м]); S_{TEC} — величина TEC вдоль луча, соединяющего приёмник спутника (наклонный Tec) (в [эл/м²]); M —коэффициент конвертирующий задержку в метрах в единицы TECU (1 TECU = 10^{16} эл/м²); A_p — неизвестная аппаратурная поправка учитывающая задержку сигналов в аппаратуре спутника и приёмника. Из соотношения (1) следует, что Тес может быть определён с точностью до неизвестной величины A_p . Для пересчёта наклонного электронного содержания в вертикальное используется модель ионосферы в виде бесконечно тонкого слоя расположенного на высоте h = 450 км. С учётом этого связь S_{TEC} и Tec описывается простым геометрическим фактором: $S_{\text{TEC}} = \text{TEC/cos} z$, где z — зенитный угол луча на высоте слоя.

Принципиальным моментом при использовании навигационных измерений для получения абсолютной величины Тес является вопрос аппаратурной поправки к измеряемым параметрам. Именно эта поправка в основном определяет точность измерения абсолютной величины Тес. Существуют различные подходы к нахождению поправки A_p . Все они основываются на том, что поправка не изменяется в течение нескольких дней, а S_{TEC} меняется в пространстве, времени и, что особенно важно, зависит от длины луча и соответственно зенитного угла *z*. Для разрешения уравнения используется модель Тес. С учётом периодичности природы ионосферы в качестве модели используется разложение Тес по гармоникам в функции местного времени.

Уравнение записывается для всех спутников, видимых над станцией наблюдения, и на каждую эпоху на 24-часовом интервале. В результате получаем систему уравнений для определения коэффициентов разложения и соответственно поправок для всех пролётов спутников над станцией наблюдения. Решая которую можно восстановить суточный ход Тес над станцией наблюдения.

Дальнейшим развитием методики является переход от локальной модели распределения полного электронного содержания ионосферы над станцией к глобальному (или региональному) пространственному распределению ТЕС ионосферы.

В глобальной модели распределения ТЕС ионосферы используется разложение ТЕС в виде сферических функций. Для получения пространственного распределения Тес используются одновременные GPS наблюдения международной сети станций IGS. На основе представленного алгоритма в западном отделении ИЗМИРАН была реализована технология построения региональных карт Тес [Шагимуратов и др. 2013].

2.2. Результаты исследований динамики ионосферы во время магнитной бури

В настоящее время приведённый выше алгоритм усовершенствован и применяется для обработки данных более чем от 200 станций. В развитии методики для построения карт используются одновременно измерения групповых и фазовых задержек радиосигналов. В каждый момент времени в алгоритме обрабатывается более 1500 линий связи приёмник-спутник. Усовершенствование алгоритма обеспечило получение карт ТЕС с высоким пространственным и временным разрешением. Карты могут строиться с интервалом 5 мин и пространственным разрешением 1°, что позволяет проводить исследования тонкой структуры ионосферы и её динамики во времени.

В Западном отделении ИЗМИРАН проводятся многолетние исследования реакции ионосферы на геомагнитные возмущения с использованием GPS измерений [Shagimuratov et al., 2002, 2009]. Описанная выше методология определения TEC и создания карт TEC была использована нами для исследования особенностей реакции ионосферы на магнитную бурю 1 ноября 2012 г.

Магнитная буря началась в предвосходное для европейского сектора время. Минимальная величина индекса Dst = -60 нTл зарегистрирована в 12 ч мирового времени (UT), амплитуда изменения Dst на интервале 20 ч составила 100 нTл. Максимальное значение индекса Ae = 1200. Данную бурю можно классифицировать как умеренную. Вариации параметров космической погоды для 30 октября – 2 ноября 2012 г. представлены на рис. 1.

Отличительной особенностью данной бури являлось очень сильное позитивное возмущение ионосферы, несмотря на то, что буря была относительно малой и носила кратковременный характер. На рис. 2 представлена динамика суточных вариаций Тес и критической частоты foF2 по станции Калининград за период 30 октября — 2 ноября 2012 г. В целом проявляется хорошее согласие в поведении двух параметров. Для них выделяется характерное, ярко выраженное повышение в районе 12UT на стадии максимальной фазы бури.

На рис. За представлены суточные вариации Тес на станциях, размещённых в диапазоне широт 40...70° N на долготе около 20° N. Для наглядности кривые смещены одна относительно другой. Здесь также выделяется положительный всплеск в день бури на всех широтах. Анализ показал, что фактор отношения величины Тес в день бури к предшествующему спокойному дню спадает от высоких широт к низким. Максимальная его величина приходилась на широты $50...55^{\circ}$ N и достигала значения 2,1, временное положение максимума всплеска изменяется с широтой. На графике (рис. 36) представлено положение максимума в зависимости от широты. Наблюдается чёткое запаздывание максимума от высоких широт к низким. Запаздывание на широте 30° N по отношению 65° N составило около 145 мин, что соответствует скорости перемещения около 350 м/с. Эта величина соответствует скорости движения крупномасштабного перемещающегося ионосферного возмущения (ПИВ).



Рис. 1. Вариации параметров космической погоды для 30 октября – 2 ноября 2012 г.



Рис. 2. Суточные вариации Тес и частоты foF2 во время бури



Рис. 3. Суточные вариации Тес на разнесённых по широте станциям (*a*); широтное положение максимума TEC (*б*)



И.И. Шагимуратов и др. Исследования по физике ионосферы в Западном отделении ИЗМИРАН

Рис. 4. Карты ТЕС над Европой во время бури



Рис. 5. Широтные разрезы ТЕС на долготе 20° Е

Для анализа реакции ионосферы на данное геофизическое событие по многостанционным GPS измерениям строились карты TEC с разрешением по времени 1 ч. Развитие ионосферной бури в целом носило классический характер — положительная фаза на стадии развития и отрицательная на фазе восстановления. Несмотря на сравнительно небольшую интенсивность геомагнитного возмущения, вызванные им изменения в ионосфере были достаточно существенны. На рис. 4 представлены карты ТЕС для спокойного дня (31 ноября) и возмущённого (1 ноября 2012 г.). Карты иллюстрируют пространственно-временную динамику ТЕС над Европой в диапазоне 40—75° N (значения шкалы в каждом элементе слева), при этом долготные пределы составляют $-10...+40^{\circ}$ (значения в каждом элементе снизу). Для спокойных суток вариации ТЕС показывают типичный суточный ход с дневным максимумом и ночным минимумом. На картах ТЕС спокойного дня в ночное время просматривается структура главного ионосферного провала [Krankowski et al., 2009]. На рис. 5 представлены широтные разрезы на долготе 20° Е, позволяющие оценить эволюции главного ионосферного провала во время бури.

Анализ реакции ионосферы на геомагнитную бурю показал что, несмотря на сравнительно небольшую интенсивность геомагнитного возмущения, при определённых условиях вызванные им изменения в ионосфере могут быть достаточно существенны, и могут влиять на системы точного позиционирования, использующие сигналы спутников GPS/ГЛОНАСС.

2.3. Реакция ионосферы на солнечное затмение

Солнечное затмение является своего рода естественным экспериментом, который позволяет исследовать физико-химические процессы в ионосфере Земли в период кратковременного выключения главного источника ионизирующей солнечной радиации в условиях сформировавшейся дневной ионосферы. Это также даёт возможность для тестирования различных моделей верхней атмосферы. Реакция ионосферы на солнечное затмение зависит от многих факторов, в частности от местного времени, сезона, уровня солнечной активности.

Затмение Солнца 4 января 2011 г. было частичным на всей территории его наблюдения. Максимальный коэффициент покрытия диска Солнца составлял ~0,86 над Скандинавией. Для обсерватории Калининграда коэффициент покрытия диска Солнца был так же значителен ~0,79. Освещённость поверхности Земли при максимальном покрытии диска Солнца уменьшилась более чем в пять раз. Затмение проходило при низкой солнечной активности в спокойных геомагнитных условиях на стадии перехода от ночной ионосферы к дневной. Таким образом, наблюдаемые нами ионосферные эффекты вызваны изменением потока ионизирующего излучения Солнца и сопутствующими процессами.

Локальные эффекты затмения анализировались на основе обсерваторских наблюдений станции Калининград. В качестве средств диагностики использовались цифровой ионозонд «Парус» и двухчастотный GPS/ ГЛОНАСС-приёмник, обеспечивавший измерения полного электронного содержания ионосферы TEC. Для анализа пространственно- временной динамики ионосферы по данным одновременных многостанционных GPS/ГЛОНАСС измерений строились карты Тес для европейского региона с 5 мин интервалом.

Над станцией Калининград затмение наблюдалось с 9 ч 17 мин до 12 ч 05 мин местного времени (с 7:17 до 10:05 UT). Максимальное покрытие диска Солнца имело место в 10 ч 39 мин (8:39 UT). Из-за сложных

метеоусловий фоторегистрация солнечного диска не проводилась. Общая продолжительность частичного затмения над точкой наблюдения составила 2 ч 48 мин. Одновременно в обсерватории ЗО ИЗМИРАН проводились непрерывные измерения вариаций магнитного поля Земли. В предшествующие дни и в день затмения существенных вариаций геомагнитного поля зарегистрировано не было.

В период наблюдения солнечного затмения вертикальное зондирование ионосферы осуществлялась с интервалом 5 мин. По ионограммам определялись вариации значений критической частоты слоя F2, действующей высоты максимума слоя, критическая частота слоя E, а также минимальная частота отражений и соответствующая ему действующая высота.

На рис. 6 приведены вариации критической частоты слоя F2 с интервалом 5 мин в период с 6:00 до 11:00 UT во время затмения 4 января 2011 г. (сплошная линия) и в контрольный день 5 января 2011 г. (точки). Прерывистой линией отмечены фазы затмения, вертикальная сплошная линия соответствует его максимальной фазе. Период затмения выделен цветовым прямоугольником. Вариация 5 января 2011 г. построена интерполяцией результатов измерений с интервалом 15 мин.

На рис. 6 видна быстрая реакция ионосферы на изменение фаз затмения Солнца. Наблюдается плавное изменение значений критической частоты foF2, соответствующее изменению электронной концентрации в максимуме слоя. Критическая частота слоя уменьшилась в 1,6 раза. Запаздывание точки с минимальным значением электронной концентрации относительно момента максимальной фазы затмения составило около 10 мин.

До начала затмения действующая высота максимума слоя F2 находилась на высоте ~350 км, при foF2 = 4,72 МГц, наблюдался также слой E с fo > 2 МГц. В момент времени, практически совпадающий с максимальной фазой затмения, заметно уменьшилась критическая частота E-слоя. Спустя некоторое время после наступления максимальной фазы концентрация в максимуме слоя F2 уменьшилась примерно в 2,6 раза. Примерно через 20...25 мин после окончания затмения концентрация в максимуме ионизации достигла регулярных дневных значений. Вариации полного электронного содержания над точкой наблюдения также представлены на рисунке (фрагмент в центре). Уменьшение TEC, вызванное затмением, регистрировались на фоне суточной вариации (левый фрагмент). Максимальное абсолютное значение вариации TEC составило ~2 TECU. Задержка минимального уровня регистрируемого TEC относительно максимальной фазы затмения составляла более 10 мин.

Пространственно-временная картина реакции ионосферы на затмение анализировалась на основе карт Тес, сформированных для европейского региона.

Реакция ионосферы начала проявляться после 08 UT на широтах ниже 50° N. Максимальный эффект наблюдался в юго-восточной части Европы. Ионосфера восстановилась до регулярного состояния после 10:30 UT. Детальная картина реакции Тес ионосферы анализировалась на основе пятиминутных карт сформированных, для интервала времени, когда наблюдался максимальный эффект затмения (рис. 7).



Рис. 6. Вариации критической частоты слоя F2 (*a*) и полного электронного содержания (*б*) во время частичного затмения Солнца 4 января 2011 г. и в контрольный день, а также разница между Тес в эти дни (правая панель)



Рис. 7. Динамика Тес над Европой во время затмения и контрольного дня 5 октября

Максимальная депрессия Тес составляла 3...4 ТЕСU для юго-восточной части Европы, что составляло около 30 % от уровня Тес контрольного дня. Важной особенностью реакции ионосферы является перестройка во время затмения пространственно-временной структуры ионосферы, что наглядно показывают карты. Во время затмения существенно изменилась структура пространственных градиентов Тес. На картах на интервале 08:20–08:35 UT хорошо проявляется ложбинообразная депрессия, с максимальными градиентами в юго-восточном направлении. Уменьшение значений Тес наблюдалось и на большем удалении от области максимального затенения. Это свидетельствует о том, что ионосферный эффект солнечного затмения связан не только с уменьшением потока ионизирующего излучения, но и с динамическими процессами в верхней атмосфере.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Математическое моделирование ионосферы

В 1970–1980-х гг. математические модели, основанные на численном решении уравнений, описывающих ионосферу как физическую среду, стали

наиболее мощным инструментом теоретических исследований. Под математической моделью ионосферы принято понимать совокупность уравнений динамики ионосферной плазмы с соответствующими начальными и краевыми условиями и алгоритмом решения этих уравнений. В наиболее полной постановке математические модели ионосферы должны учитывать комплексы фотохимических и динамических процессов, протекающих в слабоионизованной атмосферной плазме, взаимосвязь различных областей околоземного космического пространства как по вертикали (ионосферные слои – протоносфера – магнитосфера), так и по горизонтали (широтные области ионосферы), включать в самосогласованное описание электрическое поле. В качестве уравнений динамики среды традиционно применяются системы гидродинамических уравнений для различных компонент ионосферной плазмы. В книге [Брюнелли, Намгаладзе, 1985], во многом опирающейся на опыт авторов в теоретических исследованиях, с применением ионосферных моделей выполненных в ЗО ИЗМИРАН, подробно обсуждаются основные вопросы, связанные с выбором моделирующих уравнений, учётом многомерности, описанием фотохимических и динамических процессов, выбором начальных и граничных условий.

Важная тенденция в развитии ионосферного моделирования в начале 1980-х гг. проявилась в попытках создания глобальных моделей ионосферы, которые в значительной мере учитывали различные аспекты самосогласованного описания ионосферной плазмы. Такие модели разрабатывались в США [Dickinson et al., 1981], Англии [Fuller-Rowell, Rees, 1980], СССР [Глушаков и др., 1979; Колесник, 1983; Namgaladze et al., 1988]. В этих моделях решалась задача самосогласованного описания глобальной динамики нейтральных и заряженных компонент ионосферной плазмы с учётом химического состава ионов и нейтральных частиц, а также электрических полей. Основные сложности создания глобальных моделей ионосферной динамики определялись развитием вычислительной техники и методов интегрирования систем трёхмерных нелинейных гидродинамических уравнений. Численные методы, применявшиеся в этих моделях, основывались на конечно-разностных аппроксимациях решаемых уравнений. Применение суперкомпьютеров в реализации американской и английской версий модели предопределило их более быстрое развитие и больший объём теоретических исследований, выполненных с их применением. Однако действующие российские версии глобальной модели верхней атмосферы и ионосферы [Намгаладзе и др., 1990, 1996], в основе которых лежит модель [Namgaladze et al., 1988], обладают рядом достоинств, важных для самосогласованного описания динамики среды.

3.2. Глобальная самосогласованная модель верхней атмосферы и ионосферы ГСМ ТИП (ЗО ИЗМИРАН)

К началу 1980-х гг. в ЗО ИЗМИРАН сформировалась научная группа под руководством проф. Намгаладзе А.А., в которой был накоплен значительный опыт разработки и применения в исследованиях численных моделей ионосферы. В соответствии с мировыми тенденциями развития ионосферного моделирования Намгаладзе А.А. сформулировал задачу построения принципиально новой глобальной трёхмерной модели термосферы, ионосферы и плазмосферы, а также электрических полей. Основные подходы к решению этой задачи описаны в работах [Namgaladze et al., 1988]. В конце 1980х гг. в ЗО ИЗМИРАН была первая версия модели ГСМ ТИП (глобальная самосогласованная модель термосферы, ионосферы и протоносферы).

Термосферный блок в модели ГСМ ТИП учитывает основные газовые составляющие верхней атмосферы, для которых решаются уравнения гидродинамики с учётом процессов молекулярной и турбулентной диффузии, диссипативных и нелинейных процессов.

Ионосферный блок модели реализован в виде двух блоков, описывающих динамику нижней и верхней ионосферы. Условие разделения на нижнюю и верхнюю ионосферу определяется выполнением условия замагниченности ионов в магнитном поле Земли при наличии столкновений с нейтральными частицами. В блоке нижней ионосферы ионный состав ионосферы определяется молекулярными ионами, для суммарной концентрации которых решаются уравнения гидродинамики. Уравнения динамики верхней ионосферы интегрируются вдоль силовых линий геомагнитного поля с высоты 175 км и по времени вдоль траекторий электромагнитного дрейфа. Использование геомагнитной системы координат объясняется тем, что в модели принято предположение о замагниченности всех заряженных компонент на высотах выше 175 км. Граничными условиями на высоте 175 км являются условия фотохимического равновесия для концентраций атомарных ионов и решения уравнений для распределений температуры электронов и ионов. Силовые линии с L > 15 считаются разомкнутыми, и на верхних концах этих линий задаются граничные условия в виде нулевых концентраций атомарных ионов и потоков тепла.

В уравнение для расчёта электрического поля решается соответствующее уравнение для потенциала. В качестве источников магнитосферного электрического поля задаются продольные токи зон 1 и 2, совпадающих с геомагнитными параллелями 75 и 65° соответственно.

В последние годы были осуществлены важные модификации модели ГСМ ТИП. В работе [Клименко и др., 2006а, б] была представлена новая модель электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли, которая заменила старый блок расчёта электрических полей в модели. В новом блоке приведение трёхмерного моделирующего уравнения, описывающего закон сохранения плотности полного тока в ионосфере Земли, к двумерному виду осуществляется его интегрированием по толщине токопроводящего слоя ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля, а не по вертикали, как это было ранее. Это позволило корректно описать морфологические особенности электрического поля в ионосфере и, в частности в ионосфере низких и экваториальных широт, в различных геофизических условиях.

Явный вид источников ионизации и нагрева, входящих в уравнения всех блоков модели, приводится в книге [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Скорости фотодиссоциации и фотоионизации рассчитываются с использованием спектров солнечного ультрафиолетового излучения. Скорости корпускулярной ионизации рассчитываются по известным методикам с экспоненциальным энергетическим спектром. Зона высыпаний мягких частиц с характерной энергией 0,2 кэВ принята круговой совпадающей с геомагнитной широтой 80°. Зона высыпаний электронов из плазменного слоя центрирована на полночь и широту 70°. Потоки высыпающихся частиц выбирались в соответствии с геомагнитными условиями, воспроизводимыми в численных расчётах.

В настоящее время реализованы варианты модели ГСМ ТИП с различными шагами по широте 10; 5 и 2° и проведён сравнительный анализ получаемых результатов, который показал высокую степень идентичности всех вариантов. Различные модификации модели ГСМ ТИП с изменением шагов интегрирования, как по широте, так и по долготе разработаны в Полярном геофизическом институте Кольского научного центра РАН (ПГИ КНЦ РАН) — модель UAM (Upper Atmosphere Model) [Намгаладзе и др., 1996]. Все модификации базовой модели показывают качественное и количественное согласие результатов, что демонстрирует хорошие технические характеристики алгоритмов интегрирования уравнений модели.

Результаты многочисленных исследований с применением модели ГСМ ТИП, с анализом адекватности результатов моделирования и новых теоретических результатов по динамике верхней атмосферы и ионосферы представлены в работах [Бессараб, 1996; Карпов, 2003; Клименко, 2008; Кореньков, 2000].

3.3. Современное состояние теоретических исследований

Сейчас не вызывает сомнений то, что глобальные теоретические модели верхней атмосферы и ионосферы являются мощным инструментом исследования структуры и динамики среды. Многочисленные исследования, выполненные с применением таких моделей, показывают их высокую эффективность. К настоящему времени разработаны и успешно применяются в исследованиях модели ГСМ ТИП (ЗО ИЗМИРАН, Калининград), UAM (Мурманский государственный технический университет (МГТУ)), CTIPe (Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics Model), TIME GCM (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Electrodynamics General Circulation Model) (США), GAIA (Япония), в которых газовый и ионный состав, тепловой режим и динамика нейтральной атмосферы и ионосферы, проводимость ионосферы и электрические поля рассчитываются самосогласованным образом.

Последние модификации модели ГСМ ТИП, включающие новую модель электрического поля, позволяют корректно описывать распределения параметров ионосферы не только на средних и высоких широтах, но и на низких широтах и в области геомагнитного экватора. Кроме того, учёт в модели ГСМ ТИП изменений продольных токов второй зоны при изменении разности потенциалов через полярные шапки в отличие от большинства других моделей (в том числе и СТІРе) позволяет правильно воспроизводить такие явления, как проникновение поля магнитосферной конвекции к низким широтам и эффект сверхэкранирования. В ЗО ИЗМИРАН с использованием модели ГСМ ТИП выполнен целый ряд теоретических исследований по следующим направлениям: 1) глобальный отклик ионосферы и её токовых систем на геомагнитные бури и суббури; 2) сейсмо-ионосферные эффекты перед сильными землетрясениями; 3) крупно- и мелкомасштабная трёхмерная структура экваториальной ионосферы в различных гелиогеофизических условиях; 4) ионосферные эффекты внезапных стратосферных потеплений; 5) глобальный отклик ионосферы на солнечные затмения; 6) проверки точности методов измерений GPS TEC. Большинство этих исследований было выполнено в тесном сотрудничестве с учёными ИЗМИРАН, других институтов России: Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (ИСЗФ СО РАН), Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ), Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), МГТУ, ПГИ КНЦ РАН, а также Бразилии, США, Аргентины, Чехии, Германии, Швейцарии, Китая.

Значительный объём исследований с применением модели ГСМ ТИП связан с моделированием возмущений ионосферы в периоды геомагнитных бурь. Результаты этих исследований дополнили физические представления о роли таких возмущающих факторов, как вариации продольных токов второй зоны, в формировании главного ионосферного провала, авроральных и экваториального электроджетов, экваториальной аномалии, дополнительных слоёв в экваториальной ионосфере.

В последнее десятилетие широкое распространение получили методы экспериментальных исследований, основанные на приёме сигналов навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС. В ЗО ИЗМИРАН были разработаны технологии обработки результатов наблюдений сигналов навигационных спутников, построения глобальных и региональных карт Тес (см. разд. 2), выполнен анализ морфологии ионосферных возмущений в сейсмически активных регионах [Захаренкова, 2007]. Результаты этих исследований позволили сформулировать теоретическую задачу по изучению механизмов формирования таких ионосферных неоднородностей. В работах [Намгаладзе и др., 2009; Klimenko et al., 2011, 2012] с применением модели ГСМ ТИП были исследованы гидродинамический и электродинамический каналы формирования ионосферных предвестников и показаны особенности их проявления в различных регионах Земли. Примеры результатов этих исследований показаны на рис. 8.

В исследованиях структуры и динамики экваториальной ионосферы с применением ГСМ ТИП детально исследована роль неоднородного по высоте ионосферного дрейфа в формировании расслоений экваториального F2-слоя ионосферы и установлены особенности его влияния в условиях повышения солнечной и геомагнитной активности.

В исследованиях структуры и динамики ионосферы всегда уделялось большое внимание изучению физических механизмов обуславливающих связи процессов в различных атмосферных слоях и ионосфере. В настоящее время быстрое развитие экспериментальных методов исследований позволило достоверно выявить ионосферные возмущения, возникающие в периоды внезапных стратосферных потеплений (ВСП). В теоретическом плане физические механизмы, реализующие такие связи, до сих пор остаются недостаточно понятными. Практика применения модели ГСМ ТИП к изучению механизмов формирования ионосферных возмущений показала, что ситуация во время ВСП очень похожа на то, что происходит во время геомагнитных бурь, когда нагрев нейтральной атмосферы приводит к уменьшению отношения n(O)/n(N2).



Рис. 8. Глобальные карты отклонений полного электронного содержания в декартовой географической системе координат для различных моментов мирового времени, полученные в расчётах с учётом и без учёта внутренних гравитационных волн, генерируемых в эпицентральной области (левая панель) и рассчитанные по данным GPS TEC, полученным за день до землетрясения в Греции, и медианным значениям GPS TEC (правая панель). Эпицентр землетрясения отмечен звёздочкой

В периоды ВСП изменения нейтральной температуры на высотах нижней термосферы являются следствием процессов в стратосфере и главной причиной отрицательных возмущений в электронной плотности на высотах F области ионосферы. В исследованиях с применением ГСМ ТИП был выполнен комплекс численных экспериментов по моделированию ионосферных эффектов ВСП, когда основным возмущающим фактором рассматривались изменения структуры приливных и планетарных вариаций параметров нижней термосферы. Результаты экспериментов позволили подробно изучить роль этих механизмов возмущения ионосферы и предложить новые каналы передачи энергии из тропосферы в ионосферу, включение которых позволит улучшить количественное согласие результатов наблюдений и моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [Бессараб, 1996] Бессараб Ф. С. Численное моделирование теплового режима термосферы Земли: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Троицк, ИЗМИРАН, 1996.
- [Брюнелли, Намгаладзе, 1988] *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- [Глушаков и др., 1979] Глушаков М. Л., Дулькин В. Н., Ивановский А. И. Модель суточных вариаций параметров термосферы. 1. Исходные предпосылки и метод решения // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19. № 4. С. 663–671.
- [Захаренкова, 2007] Захаренкова И. Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Калининград: РГУ им. И. Канта, 2007.
- [Карпов, 2003] *Карпов И. В.* Теоретическое исследование приливных вариаций параметров термосферы Земли: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Троицк, ИЗМИРАН, 2003.
- [Клименко, 2008] *Клименко М. В.* Численное моделирование крупномасштабного электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Калининград, РГУ им. И. Канта, 2008.
- [Клименко, 2011] Клименко М. В., Клименко В. В., Захаренкова И. Е., Карпов И. В. Моделирование сейсмоионосферных эффектов, инициированных внутренними гравитационными волнами // Химическая физика. 2011. № 5. С. 75–80.
- [Клименко и др., 2006а] *Клименко В. В., Клименко М. В., Брюханов В. В.* Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли: Постановка задачи и тестовые расчёты // Мат. моделирование. 2006. Т. 18. № 3. С. 77–92.
- [Клименко и др., 20066] Клименко М. В., Клименко В. В., Брюханов В. В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли: Динамо поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 4. С. 485–494.
- [Колесник, Королёв, 1983] *Колесник А. Г., Королёв С. С.* Трёхмерная модель термосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23. № 5. С. 774–781.
- [Кореньков, 2000] *Кореньков Ю. Н.* Математическое моделирование верхней атмосферы Земли как единой системы: автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. Троицк, ИЗМИРАН, 2000.

- [Намгаладзе и др., 1990] *Намгаладзе А.А., Кореньков Ю. Н., Клименко В. В.* и др. Глобальная численая модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 4. С. 612–619.
- [Намгаладзе и др., 1996] Намгаладзе А. А., Мартыненко О. В., Намгаладзе А. Н. Глобальная модель верхней атмосферы с переменным шагом интегрирования по широте // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36. № 2. С. 89–95.
- [Намгаладзе и др., 2009] Намгаладзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Физический механизм и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых в полном электронном содержании // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. № 2. С. 267–277.
- [Шагимуратов и др., 1996] Шагимуратов И. И., Баран Л. В., Ефишов И. И. Абсолютные ионосферные измерения на основе GPS // Проблемы дифракции и распространения электромаг. волн: сб. тр. МФТИ. 1996. С. 111–120.
- [Шагимуратов и др., 2013] Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Якимова Г.А. Использование карт полного электронного содержания для анализа пространственно-временной структуры ионосферы // Журн. физической химии. 2013. Т. 32. № 9. С. 81–88.
- [Dickinson et al., 1981] *Dickinson R. E., Redley E. C., Roble R. G.* Three dimensional general circulation model of the Thermosphere // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 1499–1522.
- [Fuller-Rowell, Rees, 1980] *Fuller-Rowell T.J., Rees D.* A Three dimensional time-dependent global model of the thermosphere // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. P. 2545–2567.
- [Krankowski et al., 2009] Krankowski A., Krypiak-Gregorczyk A., Shagimuratov I. I., Ephishov I. I., Yakimova G. The occurrence of the mid-latitude ionospheric trough in GPS-TEC measurements // Advances in Space Research. 2009. V. 43. No. 11. P. 1721–1731.
- [Namgaladze et al., 1988] *Namgaladze A. A., Korenkov Yu. N., Klimenko V. V., Karpov I. V.* et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH). 1988. V. 127. No. 2/3. P. 219–254.
- [Namgaladze et al., 1991] *Namgaladze A. A., Korenkov Yu. N., Klimenko V. V., Karpov I. V.* et al. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // J. Atmos.Terr. Phys. 1991. V. 53. No. 11/12. P. 1113–1124.
- [Shagimurativ et al., 2002] *Shagimurativ I. I., Baran L. W.* et al. The structure of mid- and high-latitude ionosphere during September 1999 storm event obtained from GPS observations. // Ann. Geophys. 2002. V. 20. No. 1. P. 655–660.
- [Shagimurativ et al., 2009] *Shagimuratov I. I., Zakharenkova I. E., Karpov I. V., Krankowski A., Yakimova G. A.* Storm-time modification of the ionosphere: analysis of GPS TEC maps with high spatialtemporal resolution: abstr. // Proc. 2nd GNSS Vulnerabilities and Solutions 2009 Conf. 2–5 Sept. 2009, Baska, Croatia. 2009. P. 14–18.

THE INVESTIGATIONS ON THE IONOSPHERE PHYSICS IN THE WEST DEPARTMENT OF IZMIRAN

I. I. Shagimuratov, I. V. Karpov, Yu. N. Korenkov, Yu. V. Chernyak

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (WD IZMIRAN)

West Department of IZMIRAN was formed in 1992 on the basis of magneto-ionospheric observatory in Kaliningrad. The regular observations of the ionosphere and geomagnetic field are held in WD IZMIRAN since 1961. The wide range of experimental and theoretical studies on the ionosphere physics is carried out in WD IZMIRAN. The article gives a brief description of the studies performed in WD IZMIRAN currently. An important achievement of experimental studies are unique methods for the analysis of the state of the ionosphere on the basis of observations of GNSS satellite signals. The results of these observations in the periods helio-geomagnetic disturbances and their analysis are summarized in the article. Theoretical studies are carried out by means of mathematical modeling with using the global self-consistent model of the thermosphere, ionosphere and electric fields GSM TIP that developed in WD IZMIRAN. A number of important results concerning the mechanisms of formation of ionospheric disturbances under different geophysical conditions obtained on the basis of these investigations. The paper gives a brief description of the GSM TIP structure and the example of its application to modeling seismic effects in the ionosphere.

Keywords: atmosphere, ionosphere, Earth magnetic field, mathematical modeling, GPS/GLONASS-diagnostic.

Shagimuratov Irk Ibragimovich - director, PhD, shagimuratov@mail.ru

Chernyak Yurij Viktorovich - head of a observatory, PhD, urcherniak@mail.ru

Karpov Ivan Viktorovich – leading scientist, doctor of physical and mathematical sciences, ivkarpov@inbox.ru

Korenkov Yurij Nikolaevich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences, kor_yu@mail.ru