

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫПУСК 23, 1-15, 2019

ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОСФЕР

ISSN 2304-7380

УДК 550.31

Поступила в редакцию 10.08.2019 г. Принята к печати 05.09.2019 г.

СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ЛИДАРНЫХ И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

М.С. Иванов, Б.М. Кирюшов, А.Ю. Репин, В.В. Саморуков, С.Д. Богодяж, В.В. Хлестов, Г.Ф. Тулинов, Поляков Д.И.

Разработана методика расчета возникновения и развития ионосферной неустойчивости. Методика позволяет рассчитывать инкременты неустойчивости в рамках комплекса атмосферно ионосферных моделей. В комплекс методики комплексирования атмосферно-ионосферных моделей входит ряд эмпирических моделей, таких как IRI и MSIS, а также ряд численных моделей, таких как CCSM-WACCM, TIEGCM и модель СибНИГМИ. Выполнено исследование возможности получения результатов измерений состава верхней атмосферы, в расширенном высотном диапазоне при размещении радиочастотных измерительных масс-спектрометров на геофизических ракетах. Исследовано получение высотных распределений параметров верхней атмосферы с помощью метеорологических ракет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА, КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ, ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ИОНОСФЕРНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, ЛИДАРНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ.

1 ВВЕДЕНИЕ

Методика и программные средства сопоставления данных лидарных и масс-спектрометрических измерений температуры и состава верхней атмосферы тесно связаны с методикой комплексирования атмосферно-ионосферных моделей. Измерения температуры нижних слоёв атмосферы, а также измерения массового состава на верхних границах атмосферы являются граничными условиями для ряда моделей.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ЛИДАРНЫХ И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ И МЕТОДИКИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНО-МОДЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Лидарные данные представляют собой высотные профили температуры от 1 до 90 – 100 км. Данные профили суммируются из двух частей: температурного профиля в диапазоне от 1 до 30 км, полученного при помощи Рамановского зондирования, и температурного профиля от 30 до верхней границы зондирования, полученного методом релеевского зондирования. На рисунке 1 приведен профиль температуры, полученный в результате зондирования в ночь с 19 на 20 марта 2015 года. Данный профиль получен в ФГБУ «ИПГ» при помощи синхронных измерений двумя методами (релеевский и рамановский). Накопление данных производилось за всю ночь.

Иванов Михаил Сергеевич, главный специалист, ФГБУ «ИПГ», e-mail: mi_ivanov@list.ru

Кирюшов Борис Михайлович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУ «ИПГ», e-mail: kiryushov@gmail.com;

Репин Андрей Юрьевич, д. ф.-м.н., доцент; директор ФГБУ «ИПГ»

Саморуков Владимир Васильевич, зав. отделом, ФГБУ «ИПГ», e-mail: pt26pr15@mail.ru

Богодяж Сергей Дмитриевич, зав. лаб., ФГБУ «ИПГ», e-mail: kvantnavk@icloud.com

Хлестов Вячеслав Васильевич, ведущий инженер-электроник, ФГБУ «ИПГ»

Тулинов Георгий Филиппович, д.ф-м.н., профессор, зав. лаб., ФГБУ «ИПГ»

Поляков Денис Игоревич, ведущий инженер электроник ФГБУ «ИПГ», e-mail: polyakov@ipg.geospace.ru



Рис. 1. Сумма синхронных температурных профилей (рамановский и релеевский) за 19.03.2015.

Далее лидарный температурный профиль помещается в базу данных, где включается в поле температуры, построенное по данным спутниковых измерений температуры с бортов KA Siber и Aura. Лидарные данные являются уточняющими по сравнению со спутниковыми профилями, так как спутниковые данные имеют заведомо меньшее разрешение и меньшую точность. Для адаптации комплексом моделей температурных данных полученных с помощью лидара и спутников используется разложение по сферическим функциям [1]. Это и позволяет получать из набора точечных профилей непрерывное поле температуры. Такая процедура расчётов обеспечивает необходимую точность восстановления измеряемых параметров и используются не только для визуализации распределений температуры и давления (или геопотенциала) в заданной точке или на заданной высоте, но и для расчёта зональной и меридиональной компонент геострофического ветра, который спутниками не меряется.

После корректировки лидарными профилями поля температуры, полученного при помощи спутниковых измерений, данные адаптируются комплексом моделей. В этом комплексе основную роль играют модели CCSM-WACCM, TIEGCM и модель СибНИГМИ. В зависимости от ситуации и желаемого результата стоит учитывать особенности работы с конкретными моделями, вследствие чего последовательность действий в работе может отличаться.

Модель CCSM-WACCM предназначена для прогноза состояния атмосферы в диапазоне высот от 0 до 150 км. Таким образом, адаптации экспериментальных данных на высотах от тропосферы до мезосферы осуществляется за счет данной модели.

Модель ССЅМ-WACCM формирует граничные поля на нижней границе (90 км) для работы модели TIEGCM – основной модели в диапазоне высот 90 – 600 км, основанной на численном решении уравнений состояния среды. Однако данная последовательность является довольно сложной из-за тяжести самой модели ССЅМ-WACCM, вследствие чего, для облегчения процедуры расчета, получаемые экспериментальные поля температуры можно загружать непосредственно в модель TIEGCM. В свою очередь, модель TIEGCM формирует начальные поля для работы модели СибНИГМИ. Данная модель в стандартном случае использует начальные поля из эмпирической модели NRLMSISE-00, в случае использования данной модели в рамках комплекса, начальные поля формируются посредством модели TIEGCM.

В настоящий момент в работе инструментального модельного мониторинга (далее ИММ) используется процедура калибровки данных измерений относительных концентраций ионного состава

2

экзосферы на соответствующие значения их абсолютных концентраций с помощью использования данных измерений электронной концентрации посредством системы спутников COSMIC.

При этом для калибровки используется приближение амбиполярной диффузии, согласно которому сумма концентраций ионов приближённо равна концентрации электронов, и, таким образом, абсолютная концентрация иона вычисляется, как результат произведения его относительной доли в сумме всех ионов на электронную концентрацию. Данные COSMIC для каждого дня года содержат профилей электронной концентрации, приблизительно от 90 до 800 км. около 1100 Эти данные в системе ИММ используются для получения абсолютных значений концентраций ионов на основании данных измерений прибором РИМС по вышеуказанной процедуре. В настоящий момент такой метод оценки абсолютных значений концентрации ионов на данных высотах является наилучшим, однако такой приём не свободен от недостатков, связанных с потерей точности ввиду рассогласования пространственно-временных характеристик в измерениях концентраций ионов (относительных) и электронов (абсолютных). В идеале, нужно мерить и то и другое параллельно с единого объекта. Тогда вышеуказанное произведение будет не оценкой, а вычисленным значением абсолютной концентрации соответствующего иона. В нашем случае использования данных с другого космического аппарата корреляционный анализ показывает практическую независимость ионных и электронных измерений (коэффициент корреляции между ионами O^+ и H^+ близок к 0, что указывает на рассогласование данных разных экспериментов. Имеется теоретическое подтверждение этого тезиса. Согласно современной фотохимической теории, ответственным за образование и исчезновение этих ионов является процесс их взаимной перезарядки на соответствующих нейтральных атомах. Константы прямой и обратной реакции велики (порядка 10⁻⁹ см³с⁻¹) и близки так, что в фотохимическом равновесии (ниже 450 км) поддерживают концентрации ионов пропорциональными концентрациям соответствующих нейтральных компонентов с коэффициентом пропорциональности 9:8 [H⁺]/[O⁺]=(9/8)([H]/[O]).

Выше 450 км возрастает роль диффузионных процессов и коэффициент антикорреляции уходит от значения -1 в сторону меньших модулей. Результаты сопоставления данных РИМС с соответствующими значениями хорошо известной модели IRI, основанной на усреднённых экспериментальных данных, даёт разумное сходство коэффициентов корреляции по модулю (0.6-0.8 у РИМС и 0.9-0.97 у IRI). Ослабление антикорреляции для данных РИМС можно объяснить особенностями методики измерений, имеющими значение для быстролетящего носителя прибора. Дело в том, что временная задержка относительно начала развёртки каждого цикла измерения пропорциональна измеряемой массе и для имеющейся разницы в 15 а.е.м. составляет величину 10-12 с, за которые спутник пролетает около 100 км, что в условиях высокой изменчивости состояния атмосферы на высотах 800 км уменьшает репрезентативность сопоставления данных. Тем не менее, высокое значение модуля коэффициента корреляции сохраняется. При расчёте абсолютных значений концентраций ионов в нашем случае использовались ближайшие по пространству и по времени данные по электронной концентрации с другого космического аппарата (десятки градусов по пространству и полусутки по времени), что внесло значительный шумовой эффект в наше сопоставление, практически устранив антикорреляцию [3]. Полученные результаты позволяют, с одной стороны, оценить уровень изменчивости ионного состава верхней атмосферы на 800 км и, с другой стороны, подтверждают известный тезис о необходимости параллельных измерений относительного ионного состава (РИМС) и электронной концентрации (зонд Ленгмюра) с борта одного космического аппарата для повышения репрезентативности данных для расчёта абсолютных значений состава ионосферы на этих высотах.

Альтернативными вариантами для данного анализа может стать использование относительно гладких профилей электронной концентрации, полученных с помощью моделей. Так, использование климатической справочной эмпирической модели IRI даёт довольно согласованные результаты корреляционного анализа как при использовании собственных значений ионных концентраций O⁺ и H⁺, так и для спутниковых данных.

В системе ИММ имеется также возможность калибровки данных РИМС с помощью одной из рабочих моделей. Модель СибНИГМИ рассчитывает абсолютные значения иона O⁺, концентрация которого подвержена незначительных вариациям (основной ион как правило отслеживает значение электронной концентрации). Как показывает анализ, наиболее интересным с точки зрения вариативности на высоте измерений РИМС является ион H⁺. В невозмущённой ионосфере его ожидаемая концентрация в несколько раз меньше концентрации O⁺. Таким образом области доминирования H⁺ над O⁺ по данным РИМС указывают на существование в этом месте возмущения ионосферы. Природа таких возмущений может быть различной: антропогенное загрязнение всплытие атмосферы водородом как компонентом топлива ракетных двигателей, диффузионное всплытие

сейсмически обусловленных выбросов нейтрального водорода из недр планеты и другие. Исследование такого важного параметра как абсолютная концентрация H⁺ получает альтернативную возможность расчёта с использованием модельных данных по абсолютной концентрации O⁺.

В данном случае при расчете абсолютных значений концентрации H⁺ по модельной концентрации O⁺ необходимо учитывать связь экспериментальных и модельных данных посредством цепочки: лидар, а также температурные данные со спутников Siber и Aura – модель CCSM - модель TIEGCM - модель СибНИГМИ – РИМС. Таким образом, эта цепочка позволяет следить за возмущениями ионосферы с появлением аномально высоких значений концентрации H⁺ на высотах экзосферы, желательно с использованием лидарных измерений температуры на высотах нижней и средней атмосферы, когда они имеются в наличии. По этой цепочке инструмент-модели-инструмент и осуществляется методика сопоставления данных лидарных и масс-спектрометрических измерений температуры и состава верхней атмосферы в рамках системы ИММ.

З ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ЛИДАРНЫХ И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ И МЕТОДИКА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНО-МОДЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Использование программных средств сопоставления данных лидарных и массспектрометрических измерений температуры и состава верхней атмосферы и заложено с основу методики осуществления инструментально-модельного мониторинга.

К числу таких программных средств относится программное обеспечение работы с базой данных лидарных и масс-спектрометрических измерений с разработанным интерфейсом, обеспечивающим управление базой данных и визуализацией результатов. А также в состав ИММ включены, как сказано выше, кроме двух справочных ещё три численные модели, данные которых используются в ИММ:

а) Численная модель общей циркуляции – CCSM-WACCM. В настоящее время в базу данных включены результаты прогона модели на 50-летний период (1955–2004г.)

б) Численная модель ионосферы – TIEGCM. В настоящее время в базу данных включены результаты прогона модели на 30-дневный период (март 2002 г.). Выбор указанных периодов для обеих моделей объясняется тем, что для этих периодов уже имелись входные параметры (в том числе, начальные и граничные условия). В дальнейшем при подготовке входных данных, можно будет осуществлять расчеты для любого заданного периода. Имеющиеся в настоящее время результаты модельных расчетов были использованы для отладки ПО ИММ.

в) Численная полуэмпирическая модель ионного состава СИБНИГМИ. Модель СИБНИГМИ (как и эмпирическая модель IRI) непосредственно включены в базу данных, так как они позволяют оперативно получать данные параметров ионосферы при заданных входных параметрах.

В состав ИММ также включено программное обеспечение (ПО), представляющее собой: набор скриптов, написанных на языке python, позволяющих выбирать раздел базы данных из выше перечисленных и получать из него информацию о состоянии средней и верхней атмосферы в требуемом виде. Это может быть (в зависимости от типа данных):

- значение параметра в заданной точке (долгота, широта, высота),

- вертикальный профиль данного параметра при заданной долготе и широте,

- широтно-долготное распределение параметра на заданной высоте,

- временной ход данного параметра.

ПО также включает в себя возможность дополнительной обработки, получаемых временных рядов с помощью алгоритма DRAS, который позволяет выделять участки временного ряда с аномальным поведением параметра.

В заключение необходимо подчеркнуть, что численные модели CCSM-WACCM и TIEGCM основаны на решение уравнений среды с параметром времени, направленным в будущее, и, следовательно, могут быть использованы для прогноза состояния средней и верхней атмосферы [2].

4 БЛОК-СХЕМА ПРОГРАММЫ СРАВНЕНИЯ ЛИДАРНЫХ ДАННЫХ И ДАННЫХ РИМС

Лидарное зондирование позволяет получить профили температуры до высот не менее 90 км. Данные прибора РИМС-М - это значения ионных токов на высотах проведения измерений 800 км. Связать значения температуры на 90 км с данными РИМС на 800 км можно с помощью численных моделей и данных спутникового зондирования. Блок схема этой процедуры показана на рис. 2.



Рис. 2 Блок-схема программы сравнения лидарных данных и данных РИМС.

Примечания:

- 1. Были проведены предварительные расчеты для выяснения влияния замены в модели МСИС части параметров в составе модели СибНИГМИ данными из модели TIEGCM, полученными с использованием лидарных данных. Это влияние оказалось существенным.
- Также возникает вопрос какими данными об электронной концентрации пользоваться для получения абсолютных значений концентраций ионов, измеряемых РИМС, либо экспериментальными данными комплекса COSMIC, либо данными модели СибНИГМИ. Этот вопрос будет решен в дальнейшем путем сравнений этих данных между собой и с данными РИМС-М.

5 АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ИММ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Апробация работы системы инструментально-модельного мониторинга в экспериментальном режиме проводилась с помощью различных запросов к системе. Ниже приведены примеры реализации некоторых из них: профили одного сеанса работы прибора РИМС-М за один виток для O⁺ с фильтрацией старшей гармоники.

Для экспресс-анализа оценки состояния ионосферы по данным прибора РИМС предполагается создание файлов сжатой информации из вышеописанных файлов состава в виде системы индексов (рис 3–9). В качестве количественной оценки характера изменчивости для каждого компонента предлагается вектор индексов вариативности, в качестве которого используется относительная флуктуация соответствующего средневзвешенного значения ионного тока. Вычисление проводится по стандартным формулам математической статистики. Относительная флуктуация (в наших терминах индекс вариативности) есть отношение среднеквадратического отклонения данного от его математического ожидания (среднеарифметического по данным) к самому математическому ожиданию, причём среднеквадратическое отклонения есть корень квадратный из дисперсии (среднеарифметического от математического ожидания).

Этот индекс даст информацию о степени разброса данных измерений по каждому компоненту.



Рис. 3. Суточный ход О⁺ 2011.02.08. О⁺ (синяя кривая), Н⁺ (зеленая кривая) и N⁺ (красная кривая). Наблюдается монотонное уменьшение, наклон кривой основной гармоники – заметен.



Рис. 4. Суточный ход О+ 2011.02.09. Наблюдается монотонное уменьшение наклона кривой основной гармоники, – распределение О+ стало однороднее.

6 ПОСТРОЕНИЕ ДЛИННЫХ НОРМАЛИЗОВАННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПО ДАННЫМ РИМС-М, ПОЛУЧЕННЫМ В ЗАДАННОЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

Ниже представлены конкретные расчёты временных рядов для относительных и абсолютных концентраций для О⁺ и H⁺.

Рассматривается временной ряд в Индийском океане в 2012 году. Все рисунки относятся к широте 0 ±5 градусов и к долготе 80 ±30 градусов.

Как видно из расчётов, корреляция между абсолютными значениями ионных компонентов практически отсутствует. Возможной причиной этого может быть рассогласование в пространстве и во времени измерений как электронной концентрации с другого спутника, так и разных ионных компонентов в соответствии с методикой РИМС. Обоснование подобного эффекта подробно описано в пункте 4 настоящего отчета.



Рис. 5. Временной ход относительной концентрации О⁺ (синяя кривая), H⁺(зеленая кривая) и N⁺(красная кривая). Данные осреднены за 1-ю половину суток (4–8ч.) Коэффициент корреляции О⁺ и H⁺ с = -0.6574 (антикорреляция).



Рис. 6. Временной ход относительной концентрации О⁺ (синяя кривая), Н⁺ (зеленая кривая) и N⁺ (красная кривая). Данные осреднены за 2-ю половину суток (16–20ч.). Коэффициент корреляции О⁺ и H⁺ с = -0.87 (антикорреляция)



Рис. 7. Временной ход электронной концентрации среди измерений за 1-ю половину суток (4–8ч.) в точке максимально близкой к широте 0 градусов и к долготе 80 градусов.



Рис. 8. Временной ход электронной концентрации среди измерений за 2-ю половину суток (16–20ч.) в точке максимально близкой к широте 0 градусов и к долготе 80 градусов.



Рис. 9. Временной ход абсолютной концентраций О⁺ осредненных за 2-ю половину суток (16-20ч.) (синяя кривая) и Н⁺ (зеленая кривая) Коэффициент корреляции О⁺ и Н⁺ с = 0.166

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова



Рис. 10. Временной ход абсолютной концентраций O⁺ осредненных за 1-ю половину суток (4-8ч.) (синяя кривая) и H⁺ (зеленая кривая). Коэффициент корреляции O⁺ и H⁺ с = -0.0395 (корреляция отсутствует)

7 ГОДОВЫЕ ПРОФИЛИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРРЕЛЯЦИИ ОДНОГО СЕАНСА (АМПЛИТУДА/ШИРОТА):

На представленных ниже (рис. 10–18) даны распределения коэффициентов корреляции массивов значений относительного состава О⁺ и массивов значений соответствующих широт на одном витке КА.

Поскольку значения широты ложатся на синусоиду с максимумом в крайней северной точке, то и высокая корреляция профиля O⁺ означает приближение к такому же гладкому распределению, характерному для северного лета, то есть относительные значения O⁺ имеют гладкое распределение с минимумом вблизи южного полюса и максимумом вблизи северного полюса. Если бы полушария были в этом смысле равноценны, то южным летом наблюдалась бы антикорреляция с максимумом O⁺ вблизи южного полюса, то есть относительные значения O⁺ имели бы гладкое распределение с максимумом вблизи южного полюса и минимумом вблизи северного полюса. Однако это не так, южным летом большой разброс небольших по модулю коэффициентов корреляции, то есть чётко выраженная ожидаемая антикорреляция со значениями широты практически отсутствует. Можно предположить в качестве гипотезы, что источником нестабильности в экзосфере является приток энергии снизу с суши северного полушария, причём летом этот источник энергии блокируется.

На всех трёх рисунках видно, что северным летом в середине года коэффициент корреляции стабилен и близок 0.8, а значит ионные кривые практически распределены в соответствии с синусоидальным законом изменения широты с возрастанием амплитуды от южного полюса к северному; в остальное же время размах нестабильности достигает половины шкалы с модулем такого же порядка. Зеркально симметричная картина распределения ионных кривых южным летом не наблюдается. На этом обзор временных рядов закончен.

Разработана система адаптации дополнительных экспериментальных данных, таких как КА (изм. температуры). Температурные профили, полученные на лидарах или метеорологических ракетах, также адаптируются и вносят коррективы в эту систему.

Разработана система использования данных полученного выше распределения температуры (с учетом лидара) в качестве входных параметров более высокой модели.

Пример: модель TIEGCM с добавлением входных данных: год, день, время суток, широта, долгота, высота, индексы солнечной и геомагнитной активности, может построить выходные данные: численный состав основных компонентов атмосферы, температура, значения компонентов зонального и меридионального ветра.



Рис. 11. Сезонный ход коэффициента корреляции широта - О⁺ в 2011г. Синяя кривая состоит из точек, каждая из которых есть коэффициент корреляции массива значений относительного содержания О⁺ по данным РИМС с соответствующим массивом значений широты в точке измерения. Красная кривая – главная гармоника синей кривой по результатам регрессионного анализа, описанного выше применительно к суточному ходу распределений ионных концентраций.



Рис. 12. Сезонный ход коэффициента корреляции широты - О+ в 2012г.



Рис. 13. Сезонный ход коэффициента корреляции широты - О+ в 2015г.

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

Также полученные данные на верхней границе этой модели передаются в качестве входных параметров в наиболее высотную модель СибНИГМИ, в которой получается распределение геофизических параметров: температуру ионов и электронов, зональный и меридиональный ветер и концентрации ионов О₁, О₂, N₁, N₂, NO, включая О₁ из ионного состава атмосферы на высотах 800 км.

8 РАСЧЕТ ИОННОГО СОСТАВ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ НЕВОЗМУЩЕННЫХ И ВОЗМУЩЁННЫХ УСЛОВИЙ НА ВЫСОТЕ 800 КМ

Результаты расчетов значений электронной концентрации на 800 км по модели СибНИГМИ.

Менялось давление на нижней границе – 120км. Выяснилось, что изменение давления на нижней границе никак или почти никак не влияет на верхнюю границу. Влияние на электронную концентрацию оказывают изменения градиентов давления на нижней границе. Эти градиенты в модели считаются как разность давлений в двух соседних точках по широте (широтный градиент при $\Delta \theta = 10^{\circ}$) или по долготе (долготный градиент при $\Delta \lambda = 15^{\circ}$). Также выяснилось, что влияние градиентов тем больше, чем больше значение индекса F10.7. Кроме того это влияние меняется в течение суток.

Ниже приведены рисунки, иллюстрирующие влияние градиентов давления на электронную концентрацию. Во всех случаях базовый градиент, который считался по модели МСИС, увеличивался в 2 раза, F10.7=180. Широта и долгота, для которых проводились расчеты, равнялись соответственно 47 и 45 градусов.

Таким образом, созданная система базы данных позволяет проводить моделирование процессов непосредственно не имеющих отношение к нашим экспериментальным измерениям.

Удобной системой индексов являются индексы мажоритарности, несущие информацию об относительном доминировании каждого компонента в пространстве, прилегающем к траектории спутника. Поскольку измерения проводятся с постоянной скважностью во времени и при постоянной скорости спутника, процент точек измерений по каждому иону, являющемуся доминирующим (имеющим максимальное значение ионного тока в приборе РИМС) совпадает с относительной долей пространства его преобладания. Условно витки, где главный ионосферный на этой высоте ион О, доминирует на уровне выше среднестатистического (рассчитанного для временных рядов наших измерений) можно считать соответствующими «невозмущённой» ионосфере; витки такого же преобладания иона Н можно считать «возмущёнными». Относительная доля, как показывают расчёты, настолько мала (в пределах 1%), что временные ряды индексов мажоритарности для ионов О и Н практически имеют строгую антикорреляцию (графики антисимметричны).



Рис. 14. Временной ход электронной концентрации на 800км. Базовый вариант – синяя кривая, красная кривая – электронная концентрация при изменении долготного градиента давления.



Рис. 15. Временной ход электронной концентрации на 800км. Базовый вариант – синяя кривая, красная кривая – электронная концентрация при изменении широтного градиента давления.



Рис. 16. Высотный ход электронной концентрации. Базовый вариант – синяя кривая, красная кривая – электронная концентрация при изменении долготного градиента давления.



Рис. 17. Высотный ход электронной концентрации. Базовый вариант – синяя кривая, красная кривая – электронная концентрация при изменении широтного градиента давления.



Рис. 18. Распределение индексов мажоритарности для О+.



Рис. 19. Распределение индексов мажоритарности для Н⁺ в зависимости от дня 2015 года.

Примеры по дням с начала 2015 года до настоящего времени приведены на рис. 18 и рис. 19. Видно, что картина с «невозмущённой» (полное доминирование O⁺) сменилась на «возмущённую» (доминирование H⁺ скачком с уровня вблизи 0% переходит на уровень порядка 10%) после первой сотни дней (первая половина апреля). Зелёной линией отмечена граница разделения областей на «невозмущённую» и «возмущённую».

В целом создана система ИММ, отвечающая заданным требованиям.

Рекомендуем использовать ее в рамках гелиогеофизической службы ИПГ.

9 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика измерений температурных профилей верхней атмосферы до высот 80-90 км на основе лидарных измерений. Созданная методика состоит из набора процедур, включающих собственно проведение зондирований, а также выделения полезного сигнала и расчета температурных профилей с помощью специального ПО. Достигнута высота зондирований более 80 км. Дополнительно намечены пути повышения эффективности зондирований, для чего впоследствии была изготовлена многозеркальная приемная система и модернизирована система фильтрации приемного сигнала. Подготовлена к эксплуатации дополнительная станция лидарного зондирования в районе Звенигорода.

Проведены экспериментальные исследования вертикального распределения температуры в слое от 1 до 80–90 км (диапазон многофункционального лидара высотного зондирования, в дальнейшем МЛВЗ, был увеличен от 1 до 90–100 км), не менее чем двумя лидарами, для получения пространственно-динамических характеристик. Для проведения этого эксперимента были выбраны

синхронные измерения вертикальных профилей температуры в Москве (ИПГ) и в Обнинске (Тайфун). Полученные данные были включены в набор также синхронно полученных температурных профилей спутника SABER. В результате были получены поля коррекции пространственного распределения температуры в области проведения лидарных зондирований. Отмечено, что лидарные данные хорошо согласуются со спутниковыми и друг с другом. Отмечена квазиволновая динамика температурных поправок по вертикали.

Выполнено исследование возможности получения результатов измерений состава верхней атмосферы в расширенном высотном диапазоне при размещении радиочастотных измерительных масс-спектрометров на геофизических ракетах. Исследовано получение высотных распределений параметров верхней атмосферы с помощью метеорологических ракет. Рассмотрены общие вопросы методики проведения измерений на движущихся носителях. Представлено экспериментальное исследование газодинамических характеристик манометрических и масс-спектрометрических преобразователей. Приведены данные экспериментов на ракетах MP-12. Представлен обзор методов использования масс-спектрометров в космических экспериментах в мире; перечислены типы приборов, цели и методики.

Представлен комплекс атмосферно-ионосферных моделей для определения характера изменений температуры и состава верхней атмосферы в диапазоне высот 50-800 км. На АРМ установлены и функционируют эмпирические модели MSIS и IRI, полуэмпирическая модель СибНИГМИ, а также численные модели TIEGCM для верхней атмосферы и CCSM-WACCM для нижней и средней атмосферы. Созданы базы данных, полученных приборами РИМС на КА «Метеор-М» 1 и 2, также создана база данных лидарных зондирований. Создан развитый экранный интерфейс, позволяющий запускать различные модели, задавать необходимые входные параметры. Осуществлена возможность проводить выборки материалов из баз данных и проводить с ними требуемые процедуры.

Разработаны методики и программные средства сопоставления данных лидарных измерений температуры и масс-спектрометрических измерений состава верхней атмосферы для выявления зависимостей. Обеспечена визуализация получаемых результатов измерений прибора РИМС и лидара МЛВЗ. Разработана схема ассимиляции данных лидарного зондирования. Подготовлено и установлено на АРМ ПО для построения пространственных температурных полей по данным лидарных зондирований, включенных в температурные поля спутников SABER. Скорректированные по лидарным данным температурные поля спутников SABER используются в качестве начальных полей в численной модели средней атмосферы ССЅМ-WACCM. Полученные данные ассимилируются в модель СибНИГМИ, которая рассчитывает поля данных до высот полета приборов РИМС. Полученные ряды измерений РИМС сопоставляются с полученными рядами данных РИМС [5].

Разработана методика расчета возникновения и развития ионосферной неустойчивости. Данная методика позволяет рассчитывать инкременты неустойчивости в рамках комплекса атмосферно ионосферных моделей.

Разработана методика комплексирования атмосферно-ионосферных моделей. В комплекс входит ряд эмпирических моделей таких как IRI и MSIS, а также ряд численных моделей таких как CCSM-WACCM, TIEGCM и модель СибНИГМИ.

Выполнено исследование возможности получения результатов измерений состава верхней атмосферы в расширенном высотном диапазоне при размещении радиочастотных измерительных масс-спектрометров на космических аппаратах [4]. Исследовано получение высотных распределений параметров верхней атмосферы с помощью космических аппаратов. Рассмотрены вопросы исследования верхней атмосферы на орбите МКС и измерение параметров собственной внешней атмосферы МКС. Исследована возможность получения высотного профиля параметров атмосферы в интервале высот 250-500 км с помощью КА «ПРОГРЕСС» на этапе спуска. Рассмотрены общие методики проведения измерений на движущихся носителях. Представлено вопросы экспериментальное исследование газодинамических характеристик манометрических и массспектрометрических преобразователей. Приведены предложения по размещению.

Перечень задач, решаемых с помощью ИММ:

1. Получение распределения концентрации основного ионосферного иона О⁺ на высоте 800 км вдоль орбиты полёта спутника «Метеор-М» в заданное время (год, день, утро/вечер).

2. Получение графиков профилей температуры по лидарным измерениям в заданное время (год, день, время).

3. Получение распределения концентрации основного ионосферного иона О⁺ на высоте 800 км вдоль орбиты полёта спутника «Метеор-М» в заданное время (год, день, утро/вечер).

4. Построение длинных нормализованных временных рядов по данным РИМС-М, полученные в заданной географической зоне.

5. Получение годовых профилей изменчивости ионных составляющих на основе расчета коэффициентов корреляции одного сеанса (амплитуда/широта).

6. Проведение сравнительного модельного анализа ионных составов и электронных концентраций ионосферы для невозмущенных и возмущённых условий на высоте 800 км.

7. Получить временной ряд индексов мажоритарности для различных сортов ионов.

Назначение и область применения результатов проекта:

1) Созданная система ИММ готова к внедрению, полученные результаты используются в рамках гелиогеофизической службы ФГБУ «ИПГ».

2) Созданная система ИММ позволяет проводить оперативную обработку результатов экспериментальных измерений, которые в дальнейшем будут включены в состав данных федерального геофизического центра, созданного в ФГБУ «ИПГ».

3) Созданные в ИПГ комплексы аппаратуры, МЛВЗ и РИМС, должны быть доведены до эксплуатационного уровня, с созданием службы проведения лидарных зондирований в ночное время, а также со службой оперативной первичной обработки получаемой информации. Информация по МЛВЗ может быть обработана сразу же после окончания зондирования (восход солнца), примерно за час. Информация измерений РИМС-М приходит дважды в день утром и вечером с двух спутников с задержкой не более 30 минут.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т., Жалковская Л.В. Динамические модели свободной атмосферы. // Новосибирск: Наука, 1987. 290 с.
- 2. D. Bilitza (ed.), International Reference Ionosphere 1990, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
- 3. Richards, P.G., Fennelly, J.A., Torr, D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations, J. Geophys. Res. 99 (1994), 8981 8992.
- 4. Похунков А.А., Похунков С.А. Тулинов Г.Ф. «Радиочастотная масс-спектрометрия в исследованиях состава верхней атмосферы» // Мир измерений. 2013, №11, С.10-18.
- 5. М.Мак-Ивен, Л.Филлипс // Химия атмосферы. «Мир», М.:1978

MAPPING LIDAR AND MASS SPECTROMETER MEASUREMENTS OF TEMPERATURE AND COMPOSITION OF THE UPPER ATMOSPHERE

Ivanov M. S., Kiryushov B. M., Repin A. Y., Samorukov V. V., Bogodiash S. D, Hlestov V. V., Tulinov, G. F., Poliakov D.I.

The method of calculation of occurrence and development of ionospheric instability is developed. The method allows to calculate the increments of instability within the complex of atmospheric ionospheric models.

The complex methods of integration of atmospheric-ionospheric models included a number of empirical models such as IRI and MSIS, as well as a number of numerical models such as CCSM-WACCM, and TIEGCM model Shinigmi. The possibility of obtaining the results of measurements of the composition of the upper atmosphere in the extended altitude range when placing radiofrequency measuring mass spectrometers on geophysical rockets is investigated. The obtaining of high-altitude distributions of the upper atmosphere parameters by means of meteorological rockets is investigated.

KEYWORDS: UPPER ATMOSPHERE, A CORRELATION, AN EMPIRICAL MODEL OF THE IONOSPHERIC INSTABILITY, LIDAR SENSING.