

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена исследованию свойств захваченных атмосферных мод, простирающихся на большие высоты. Описание таких мод может быть получено с помощью диссипативного решения над источником (ДРНИ) [Руденко, Дмитриенко, 2015]. Действительно, ДРНИ удовлетворяет верхнему граничному условию для захваченных мод — непоступлению энергии сверху, а так как источник в задаче о захваченных модах отсутствует, ДРНИ справедливо во всей атмосфере. ДРНИ может принимать на поверхности Земли, вообще говоря, произвольные значения. Таким образом, задача поиска решений для захваченных мод сводится к задаче выбора ДРНИ, удовлетворяющих нижнему граничному условию для захваченных мод — нулевой вертикальной скорости на поверхности Земли; это граничное условие определяет дисперсионное уравнение для захваченных мод.

Мы рассматриваем ВГВ-моды волновода, создаваемого температурной стратификацией нижней атмосферы. Такие моды даже без учета атмосферной диссипации не могут описываться решениями с действительными собственными значениями вследствие подбарьерного просачивания из волновода. Так что, строго говоря, рассматриваемые захваченные моды являются не отдельными дискретными модами, а коллективными. Однако с точки зрения нашей задачи это обстоятельство существенно только тем, что мы должны строить решение над источником с комплексными частотой или волновым числом — в отличие от [Руденко, Дмитриенко, 2015], где для расчетов использовались действительные параметры частоты и волнового числа. Мы в настоящей работе полагаем заданной действительную частоту и находим соответствующее ей комплексное горизонтальное волновое число, при котором ДРНИ удовлетворяет нижнему граничному условию. Такое ДРНИ и представляет собой волноводную моду. Согласно [Руденко, Дмитриенко, 2015], ДРНИ образуется посредством соединения трех решений: аналитического решения для верхней части атмосферы (RI), рассматриваемой в рамках изотермического приближения и численных решений для реальной неизотермической диссипативной атмосферы в средней части (RII) и для реальной неизотермической в рамках приближения малой диссипации в нижней части (RIII). Таким образом, получаемые для волноводных мод решения дают связь их амплитуды и других параметров в нижней атмосфере с их параметрами в верхней изотермической атмосфере.

Возможность описания амплитудных характеристик волноводных мод на больших высотах является крайне важной, прежде всего с точки зрения их экспериментального обнаружения. Несмотря на то что энергия волноводных мод в основном сосредоточена на низких высотах в области их захвата, в силу экспоненциального роста относительных величин возмущений, связанного с падением атмосферной плотности, мы имеем лишь опосредованную возможность их наблюдения преимущественно в верхней части атмосферы. В этой области относительные значения возмущенных величин велики по

сравнению с их значениями в нижней части атмосферы и на тех высотах, где возмущения еще не совсем подавлены диссипацией, они могут приводить к значительным возмущениям заряженной компоненты ионосферы. Именно благодаря «невидимому» распространению ВГВ внизу мы наблюдаем весьма распространенное явление перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

Работа организована следующим образом. В секции 1 описана применяемая для расчетов модель атмосферы. Секция 2 посвящена построению и анализу волноводных мод спектрального диапазона ВГВ. Мы сравниваем решения волноводной задачи, построенные с помощью ДРНИ, с решениями для бездиссипативного приближения, полученными как ВКБ-методом, так и численными методами. Такие сравнения преследуют сразу две цели. Во-первых, они позволяют достичь ясности в понимании влияния диссипации на основные характеристики волноводного распространения: дисперсионные соотношения, волноводное просачивание и горизонтальное затухание волноводных мод. Во-вторых, они являются дополнительными тестами к тестам [Руденко, Дмитриенко, 2015] как метода получения ДРНИ, так и соответствующих кодов. Мы получаем дисперсионные свойства и полное описание высотной структуры всех компонент возмущения. В полученном волноводном решении присутствуют все характерные особенности захваченных ВГВ в реальной атмосфере: локализация вследствие температурной стратификации; просачивание через область непрозрачности; качественные изменения волновой структуры, связанные с диссипативным характером распространения возмущения в верхней атмосфере. Мы получаем полную информацию о всей высотной структуре волноводных мод, которая непосредственно может быть использована для установления количественного соответствия ВГВ-мод с ПИВ. Мы показываем, что наши волноводные решения хорошо согласуются с основными характеристиками ПИВ, следующими из наблюдений: соотношениями периодов с пространственными масштабами, горизонтальным затуханием, величинами полной фазовой скорости распространения, наклонами фазовых фронтов.

Следует отметить, что волноводные моды исследовались в давних работах [Francis, 1973a, b] и их результаты широко используются и в теоретических работах, и в интерпретации наблюдений различных возмущений, в том числе и в верхней атмосфере [Shibata, Okuzawa, 1983; Afraimovich et al., 2001; Vadas, Liu, 2009; Vadas, Nicolls, 2012; Idrus et al., 2013; Heale et al., 2014; Hedlin, Drob, 2014 и др.]. В работах [Francis, 1973a, b] были получены дисперсионные характеристики и вертикальные структуры волноводных мод. В работе [Francis, 1973b] было показано, что одна или две нижние ВГВ-моды способны за счет волноводного просачивания присутствовать на ионосферных высотах. Метод Фрэнсиса может рассчитывать достаточно хорошо структуру волновых возмущений в нижней части атмосферы и дисперсионные характеристики захваченных

неоднородностями нижней атмосферы мод. Детально метод Фрэнсиса с точки зрения его применимости в верхней атмосфере обсужден в [Руденко, Дмитриенко, 2015]. Здесь мы отметим только то обстоятельство, что особенности метода Фрэнсиса, состоящие в использовании всюду понижения порядка дифференциальных уравнений, допустимого только при слабой диссипации, в действительности не позволяют получить правильного описания возмущений в верхней атмосфере. В отличие от метода Фрэнсиса в нашем методе построения ДРНИ мы используем понижение порядка волновых уравнений до второго (в собственном варианте) только для области высот малой диссипации, где это вполне оправданно. Поэтому наш метод, в отличие от метода Фрэнсиса, позволяет адекватно описывать верхнеатмосферные возмущения.