

Внутренние гравитационные волны в тропосфере

В.Б. Кашкин*

Сибирский федеральный университет
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82

Поступила в редакцию 2.07.2013 г.

Обсуждается технология пассивной космической локации атмосферы в инфракрасном и микроволновом диапазонах. По результатам локации в тропосфере обнаружены проявления акустических колебаний — внутренних гравитационных волн (ВГВ) в интервале высот от поверхности до границы тропопаузы. В настоящее время для экспериментального изучения доступна мода ВГВ с частотой менее $4 \cdot 10^{-5}$ Гц. В начальном участке тропопаузы обнаружена волна, являющаяся зеркальным отражением ВГВ, — зеркальная волна (ЗВ). Сформулированы условия возникновения ЗВ. Выполнено моделирование ВГВ и ЗВ. Причиной возникновения ВГВ и ЗВ могут быть метеорологические явления, взрывы и сейсмическая активность. Приведены графики ВГВ и ЗВ, наблюдавшихся в период катастрофического землетрясения в марте 2011 г. в Японии. Найден район высокой сейсмической активности, откуда в атмосферу поступали инфразвуковые колебания перед землетрясением.

Ключевые слова: космические технологии, вертикальные профили атмосферы, политропная атмосфера, внутренние гравитационные волны, точка росы, температурная инверсия, зеркальная волна, внутренние волны в океане, землетрясение в Японии 2011 г.; space technologies, vertical profiles of the atmosphere, the polytropic atmosphere, internal gravitational waves, dew point, temperature inversion, mirror wave, interval waves at the ocean, an earthquake in Japan 2011.

Современные космические технологии позволяют не только наблюдать поверхность планеты, но и исследовать ее атмосферу. Появилась возможность получать карты вертикального распределения температуры, влажности и точки росы в тропосфере и стратосфере для всего земного шара. Эти данные используются в метеорологии и авиации. Кроме того, по ним можно оценить тропосферную задержку сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS [1], контролировать пожарную опасность в лесу на территориях, не охваченных сетью метеорологических станций. Наконец, эти данные позволяют наблюдать интересные геофизические явления [2, 3].

При дистанционном зондировании вертикальной влажностной и температурной структуры атмосферы спутниковые сенсоры регистрируют ИК и микроволновую радиацию, излучаемую подстилающей поверхностью и атмосферой. Интерпретация результатов измерений уходящего теплового излучения основана на ряде известных фактов из физики атмосферы [4–6].

Происходит радиационный перенос тепла от подстилающей поверхности в атмосферу, элемент которой поглощает, излучает, рассеивает эту энергию во всех направлениях. Излучаемая энергия зависит от температуры и близка к поглощаемой при наличии локального термодинамического равновесия.

В инфракрасном участке оптического диапазона наиболее заметными поглотителями являются диок-

сид углерода CO_2 и водяной пар H_2O . Двоокись углерода поглощает излучение в полосе около 15 мкм и на длине волны 4,3 мкм, водяной пар — на участке около 6,3 мкм и в области 3–3,7 мкм [6]. В микроволновом диапазоне эффективными поглотителями служат кислород O_2 и водяной пар. Для температурного зондирования используются область между 50 и 70 ГГц и линия 119 ГГц. Для определения содержания H_2O берутся участки спектра около 22 и 183 ГГц [6]. Распределение CO_2 и кислорода в слоях атмосферы относительно постоянное, но концентрация H_2O изменчива во времени и пространстве.

При дистанционном зондировании тропосферы и стратосферы ключевым моментом является использование зависимости ширины линии излучения (поглощения) от давления [7]. Поэтому данные о вертикальном распределении температуры и влажности привязаны не к высоте, а к изобарическим уровням атмосферы. Уходящее излучение состоит из суммы вкладов от подстилающей поверхности и от слоев атмосферы. В каждом спектральном интервале излучение разных слоев имеет разный удельный вес, что учитывается при обработке данных.

Методы измерений

В настоящее время основная информация о вертикальных профилях атмосферы поступает с полярно-орбитальных спутников NOAA серии POES (США) [8], которые снабжены комплексом инструментов ATOVS, позволяющим восстанавливать вертикальные

* Валентин Борисович Кашкин (rtcvbk@rambler.ru).

профили температуры и влажности воздуха в поле обзора 2250 км с пространственным разрешением 20 км в ИК-диапазоне и 50 км в микроволновом, при вертикальном разрешении 2–3 км. На спутниках установлен также сканер AVHRR. В данной задаче он оценивает температуру подстилающей поверхности и облаков. Наличие только двух аппаратов NOAA с периодом обращения 102 мин, в принципе, дает возможность мониторинга всей атмосферы Земли через каждые 3 ч. Аналогичная аппаратура применяется на спутнике METOP Европейского космического агентства. На спутниках серии EOS Terra и Aqua (США) функционирует прибор MODIS, также позволяющий оценивать вертикальные профили атмосферы. На российском космическом аппарате Метеор-М № 1 установлен микроволновый модуль температурного и влажностного зондирования МТВЗА. На новом метеорологическом спутнике NPP (США) для этих целей используются микроволновый радиометр ATMS и радиометр ИК-диапазона CrIS.

Комплекс ATOVS содержит сканирующий спектрофотометр HIRS/3 или HIRS/4, имеющий один спектральный канал в видимой области спектра и 19 каналов в инфракрасной области. При отсутствии облачности спектрофотометр позволяет определять вертикальные профили температуры и влажности от поверхности Земли до высоты 40 км. Сканирующий радиометр AMSU-A микроволнового диапазона позволяет определять вертикальные профили температуры и влажности от поверхности Земли до высоты 45 км при наличии облачности. Имеет 15 частотных каналов на интервале от 23,8 до 89 ГГц [9].

Данные ATOVS доступны для всех станций, принимающих сигналы спутников NOAA в режиме HRPT. В Сибирском федеральном университете для этого используется станция АЛИСАTM [10], что дает возможность выполнять температурно-влажностное зондирование атмосферы над территорией Центральной Азии и части Дальнего Востока. Прием сигналов со спутника NPP в СФУ осуществляется станцией УниСКАН-36 [10].

Для дешифрирования телеметрических данных ATOVS используется программный продукт AAPP [11]. При запуске AAPP из сети Интернет скачиваются файлы прогностической модели GFS и орбитальных данных спутника. Вертикальные профили температуры и влажности атмосферы вычисляются с помощью программного комплекса IAPP [12]. Наблюдаемые значения интенсивности излучения зависят от значений температуры на различных изобарических уровнях, от концентрации поглощающих (излучающих) газов в атмосфере.

Восстановление профилей является обратной некорректной задачей. Для ее решения в качестве первого приближения используется глобальная прогностическая модель GFS, разрабатываемая в центрах прогнозов окружающей среды США NCER и NOAA. Модель GFS запускается четыре раза в сутки, рассчитывает прогнозные профили температуры и влажности воздуха на период 7 дней. Наличие такой модели является вторым ключевым моментом в зондировании атмосферы комплексом ATOVS.

Третьим ключевым моментом служит использование весовых функций, описывающих относительный вклад излучения с различных изобарических уровней в значение интенсивности излучения, регистрируемого каждым спектральным каналом ATOVS [13]. Результатом работы пакета IAPP является вычисление вертикального распределения температуры воздуха и точки росы, температуры и давления на уровне поверхности Земли и другие параметры. Поле вертикальных профилей атмосферы определяется на неравномерной сетке точек (до 600), выбираемых из условия получения заметной разницы в значениях между соседними точками. Стандартное отклонение данных ATOVS по температуре от показаний радиозондов составляет 1,3 К, кроме уровней, близких к поверхности Земли и уровней выше 200 гПа [14]. Помимо программного комплекса IAPP известен более совершенный программный продукт, разработанный в Институте оптики атмосферы СО РАН под руководством В.В. Белова [15, 16].

Профили температуры

Ниже использованы данные, полученные с помощью станции АЛИСАTM, а также информация с сайта Air Recourse Laboratory NOAA по вертикальному распределению температуры и влажности на сетке $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе. По территории США эти данные заданы также на сетке 12×12 км [17].

На рис. 1 показаны зависимость температуры от давления для стандартной атмосферы и профили температуры и относительной влажности в точке с координатами 56° с.ш., 94° в.д. 15 мая 2010 г. в 06:02 UTC, спутник NOAA-19.

Для стандартной тропосферы принят постоянный вертикальный градиент температуры $\alpha = 0,65$ К/100 м, зависимость температуры от высоты z над уровнем моря имеет вид $T = T_0 - \alpha z$, $T_0 = 288,15$ К. При этом зависимость давления p от высоты описывается барометрической формулой для политропной атмосферы [4]:

$$p = p_0 \left[(T_0 - \alpha z) / T_0 \right]^{g/(R_c \alpha)},$$

где $p_0 = 1013,25$ гПа; g – ускорение свободного падения; $R_c = 287$ м²/(с² · К) – удельная газовая постоянная сухого воздуха. Зависимость температуры от давления нелинейная:

$$T = T_0 (p/p_0)^{(R_c \alpha)/g}. \quad (1)$$

Из рис. 1 видно, что в профиле стандартной атмосферы *A* при снижении давления до 226,14 гПа наблюдается уменьшение температуры до $-56,5$ °С, что соответствует 216,65 К, далее в тропопаузе температура постоянная.

Температурный профиль *B*, в отличие от профиля *A*, показывает, что в реальных условиях температура вначале уменьшается, но при давлении менее 250 гПа происходит ее рост. С другой стороны, на кривой *B*, начиная с изобарического уровня 250 гПа,

наблюдается резкое уменьшение влажности, которая достигает нулевого уровня при 150 гПа. Это свидетельствует о конденсации водяного пара, которая сопровождается выделением тепла и инверсией хода температуры, отмеченной на кривой *Б*.

На рис. 2 показаны вариации температуры на трех изобарических уровнях над сушей за май–июнь 2012 г. (точка с координатами 52° с.ш., 96° в.д.), графики построены на основе временных рядов, взятых с сайта [17], в которых выборка осуществляется с шагом 3 ч. Кривые отражают медленные волнообразные изменения температуры в инфразвуковой области спектра с частотой $4 \cdot 10^{-5}$ Гц и менее. Рассмотренные изобарические уровни попадают в интервал от 850 до 250 гПа, где происходит монотонное изменение температуры (см. рис. 1).

На рис. 2 по горизонтальной оси отложены даты за май–июнь 2012 г., давление является параметром.

Если в качестве параметра взять температуру, то можно видеть изменение давления с течением времени. Наконец, можно выбрать модель атмосферы, например модель политропной атмосферы, тогда и температура, и давление будут заданы как функции времени, параметром станет высота.

Особенностью рассмотренных колебаний является их сравнительно слабое затухание с расстоянием. На рис. 3 показано изменение температуры на изобарическом уровне 400 гПа в четырех географических точках вдоль Енисейского меридиана. Самой южной точкой выбран пункт в Туве с координатами 52° с.ш., 96° в.д., севернее находится Красноярск с координатами 56° с.ш., 93° в.д., пос. Бор находится на 61° с.ш., 90° в.д., Норильск имеет координаты 69° с.ш., 88° в.д. Расстояние между пунктом в Туве и Красноярском составляет 550 км, пос. Бор – 1200 км и Норильском – 2090 км.

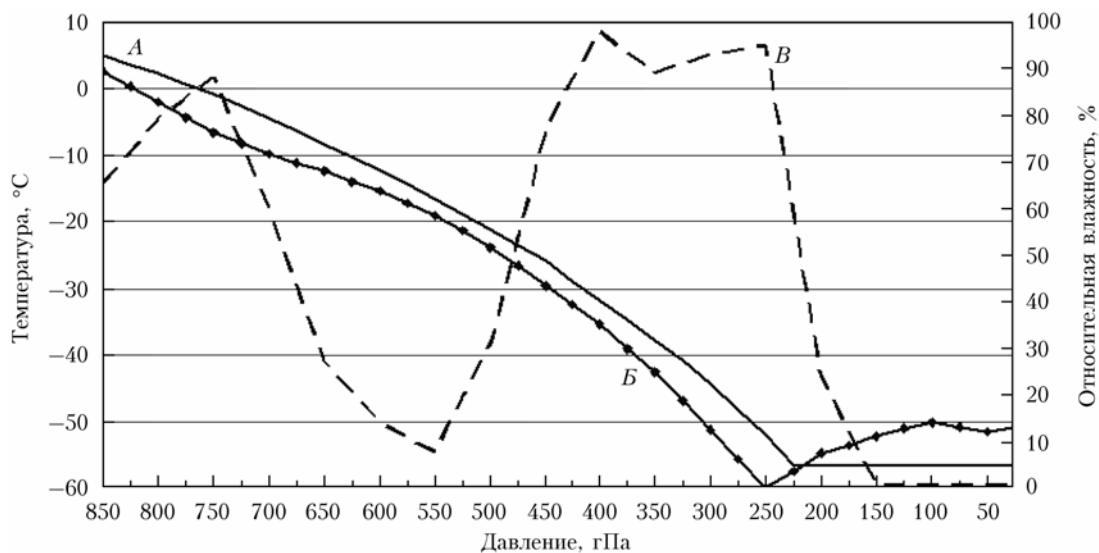


Рис. 1. Зависимость температуры и влажности от давления: *A* – профиль температуры для стандартной атмосферы; *Б* – температурный профиль по NOAA-19; *В* – профиль относительной влажности по NOAA-19

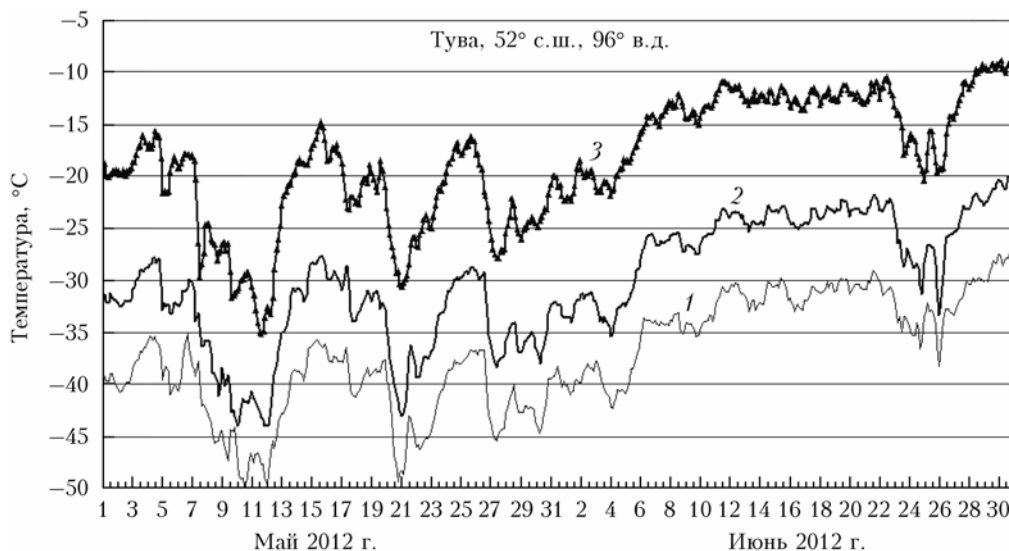


Рис. 2. Температура на трех изобарических уровнях: 350 (1), 400 (2), 500 гПа (3)

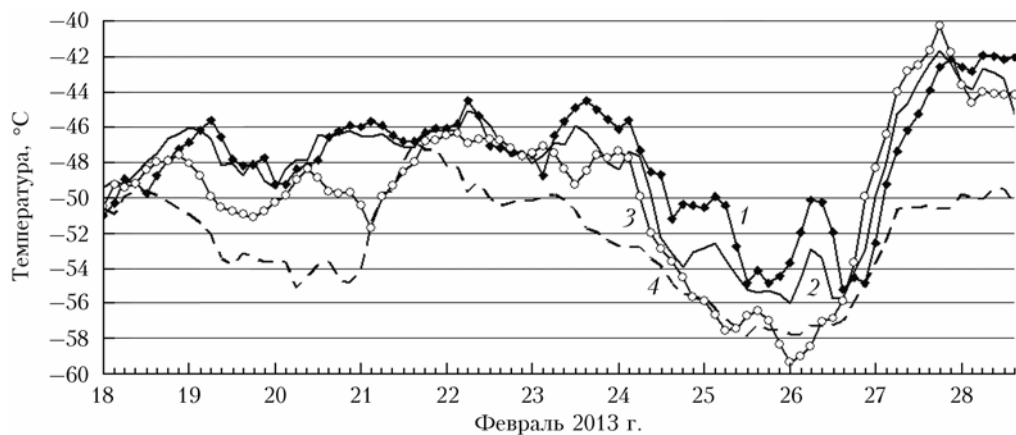


Рис. 3. Флуктуации температуры на изобарическом уровне 400 гПа: 1 – Тува; 2 – Красноярск; 3 – Бор; 4 – Норильск

Из рис. 3 видно, что все четыре графика имеют общий тренд, однако различаются деталями. Более всего похожи временные ряды для Тувы и Красноярска, коэффициент корреляции R между ними за весь февраль 2013 г. равен 0,9348, для Тувы и Бора он составляет 0,7330. Временные ряды для Тувы и Норильска менее схожи, тем не менее $R = 0,5277$.

Причинами рассмотренных волновых флуктуаций температуры (давления) могут быть изменения метеорологических параметров в приземном слое и на различных высотах, а в сейсмически активных районах – медленные подвижки земной коры. Авторы [18] приводят обзор предполагаемых механизмов образования волн в нижней атмосфере. На первое место ставится орография, так как воздушное течение над холмами и горами у земной поверхности может генерировать бегущие волны. К другим механизмам относятся влияние фронтальных погодных систем, турбулентность, геострофическое приспособление в процессе стремления атмосферных движений к геострофическому равновесию и т.д. В качестве механизмов могут выступать наземные и подземные химические и ядерные взрывы, вулканические явления и цунами.

В сейсмически активных регионах с ярко выраженным блоковым строением земной коры при подготовке и при возникновении землетрясения возбуждаются интенсивные сейсмогравитационные колебания, имеющие период до 1–3 ч. Воздействуя на атмосферу в вертикальном направлении подобно поршню большой площади, колебания способны генерировать волны в атмосфере [19, 20].

Нами было проведено исследование связи метеорологических факторов с наблюдаемыми колебаниями температуры (давления). Использованы данные метеорологических станций по приземной температуре, давлению, влажности и скорости ветра с сайта [21]. Вычислялся множественный коэффициент корреляции R_{mn} между этими параметрами и температурой на изобарических уровнях 300–500 гПа. Рассмотрены перечисленные выше географические пункты вдоль Енисейского меридиана в феврале и июле. Величина R_{mn} для уровня 400 гПа лежала в интервале 0,57–0,64 и лишь для Норильска

достигла 0,83 в феврале 2013 г. Наибольший вклад в R_{mn} дали приземное давление и температура, а приземные влажность и скорость ветра на R_{mn} практически не влияли. По-видимому, необходимо учесть влияние орографии, для этого следует использовать информацию о скорости ветра на высоте 1,5–2 км, получаемую с помощью доплеровских метеорологических радиолокаторов, а также содаров.

Внутренние гравитационные волны в тропосфере

Современная литература по волновым процессам в атмосфере и атмосферной акустике содержит большое количество публикаций, посвященных акустическим гравитационным волнам (АГВ) и внутренним гравитационным волнам (ВГВ). АГВ и ВГВ – это специфические звуковые волны в поле тяжести Земли, результат воздействия упомянутых выше механизмов на атмосферу.

Классическим примером возникновения ВГВ являются процессы в морях, океанах и крупных озерах. В.В. Шулейкин писал: «Теория внутренних волн разработана давно, причем она может быть применена не только к водной среде, но и к атмосфере, в которой также нередко возникают мощные слои воздуха различной плотности, движущиеся один относительно другого. Хорошим индикатором таких волн в атмосфере могут служить волнистые облака» [22]. Здесь имеются в виду волны в тропосфере. Однако случилось так, что основное направление исследований АГВ и ВГВ в атмосфере посвящено ионосфере.

Наиболее подробно изучены вариации электронной концентрации в ионосфере, которые вызваны волнами, возбуждаемыми землетрясениями и взрывами. Для наблюдения таких вариаций, в основном, используются навигационная аппаратура потребителей и спутники ГЛОНАСС/GPS. Фиксируются результаты воздействия АГВ и ВГВ на ионосферу [19].

Известно значительное число теоретических работ, в которых решаются задачи о возбуждении АГВ и ВГВ и влиянии их на ионосферу, например [18, 23–25].

Отмечено, что нахождение точного аналитического решения нелинейных уравнений атмосферной акустики для стратифицированной атмосферы является сложной задачей. Наибольший успех достигнут при численном решении этих уравнений. Например, в [26] рассмотрен посекундный сценарий распространения АГВ и ВГВ вплоть до ионосферы при взрывах, землетрясениях, вариациях температуры и давления в приземном слое.

Тем не менее даже в упрощенном, линейном двумерном приближении удается найти основные типы волн и описать их важнейшие свойства [27]. Земля предполагается плоской, ее вращение не учитывается, атмосфера считается изотермической и стационарной в отсутствие волн, без диссипации, ускорение свободного падения g не зависит от высоты. За время прохождения волны состояние среды не успевает заметно измениться, поэтому используется адиабатическое приближение. Рассматривается система уравнений гидродинамики, решение ищется в виде плоских волн $\exp\{i(k_x x + k_z z - \omega t)\}$. Результатом является дисперсионное уравнение

$$\omega^4 - \omega^2 c^2 (k_x^2 + k_z^2) + \frac{\omega^2 \gamma^2 g^2}{4c^2} + (\gamma - 1)g^2 k_x^2 = 0. \quad (2)$$

Здесь ω — угловая частота; c — скорость звука; γ — отношение удельных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме; k_x и k_z — горизонтальные и вертикальные волновые числа. Уравнение (2) относительно ω^2 имеет два действительных корня, откуда следует, что возможны два типа волн. Первый корень при $\omega > \omega_a$ соответствует АГВ, второй при $\omega < \omega_g$ — ВГВ:

$$\omega_a = \gamma g / (2c), \quad \omega_g = (g\sqrt{\gamma - 1}) / c,$$

где ω_a — частота отсечки для акустической моды, ниже которой волна не может распространяться; ω_g — частота плавучести (частота Бранта–Вайсяля), т.е. частота вертикальных движений элементарного объема воздуха, выведенного из состояния равновесия и свободно колеблющегося в атмосфере [24]. Частоты ω_a и ω_g близки по величине, их периоды лежат в интервале 5–15 мин [28]. Периоды ВГВ существенно больше, чем периоды АГВ, и, по литературным

данным, варьируются от 5 мин до 3 ч [29]. Для ВГВ в средней атмосфере горизонтальная длина волны составляет от 10 до 100 км, а вертикальная — менее 10 км. В таких волнах при $\omega \ll \omega_g$ фаза волны распространяется почти вертикально, а частицы движутся практически горизонтально.

Принципиальное различие между ВГВ и АГВ заключается в том, что последние являются продольными, а ВГВ вертикально-поперечными [27]. АГВ и ВГВ распространяются в атмосфере по различным траекториям [29]. Низкочастотные ВГВ преломляются вокруг сферической Земли гравитационным полем и могут наблюдаться на больших расстояниях от места генерации АГВ. Высокочастотные АГВ удаляются от поверхности Земли, причем их амплитуда растет с высотой. На высоте 300–500 км АГВ вызывают значительные колебания ионосферной плазмы и возбуждают ее. В настоящее время закономерности распространения АГВ и ВГВ в изотермической атмосфере исследованы подробно [24, 29]. Известны многочисленные обобщения, учитывающие слоистый характер атмосферы, вязкость, изменение температуры и скорости звука с высотой и т.д., например [30–32].

Регистрация волн с частотой менее $4 \cdot 10^{-5}$ Гц и слабое затухание на значительном расстоянии дают возможность утверждать, что в наших исследованиях наблюдаются внутренние гравитационные волны. Кривые на рис. 2 и 3 — это реальная визуализация инфранизкочастотных ВГВ, каков бы ни был механизм их возникновения.

Однако этим не исчерпываются интересные особенности наблюдаемых явлений. На рис. 4 показано, как изменялась температура на изобарических уровнях 200 и 400 гПа в районе г. Красноярск в июле 2012 г.

Кривые на рис. 4 почти зеркально отображают друг друга. Коэффициент корреляции R между временными рядами температуры на изобарических уровнях 400 и 200 гПа за период с 1 по 31 июля составляет $-0,8801$.

Происхождение зеркальных волн (ЗВ) нетрудно понять, если обратиться к рис. 1. Здесь на участке от 850 до 250 гПа температура монотонно убывает до некоторой высоты z_1 : $T = T_0 - \alpha z$, коэффициент

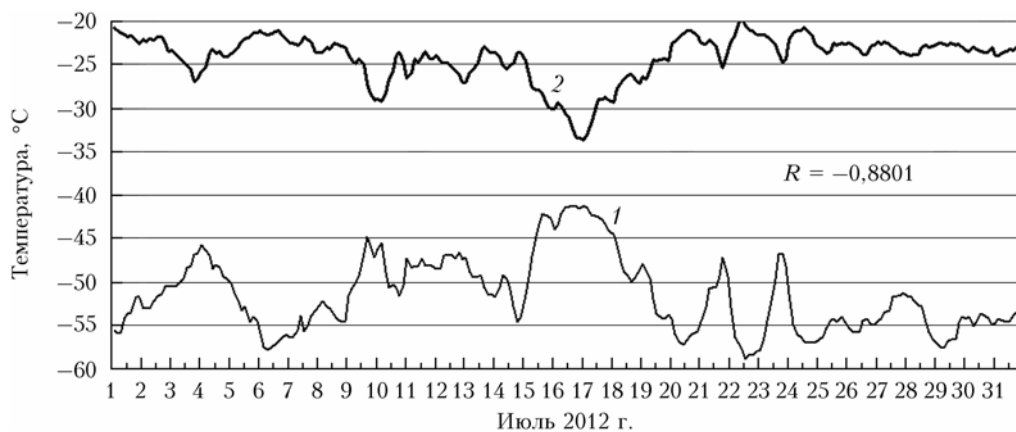


Рис. 4. Изменение температуры на изобарических уровнях 200 (1) и 400 гПа (2) (Красноярск)

$\alpha > 0$. Начиная с уровня 250 и до 150 гПа, происходит конденсация водяного пара, что сопровождается выделением тепла. На участке от 250 до 100 гПа температура возрастает: $T = T_1 + \beta(z - z_1)$, где $\beta < 0$, поэтому здесь фаза волны меняется на противоположную. Вместо (1) имеем

$$T = T_1(p/p_1)^{-(R_c|\beta|)/g} = T_1(p_1/p)^{(R_c|\beta|)/g}, \quad (3)$$

где T_1 и p_1 – температура и давление на высоте z_1 .

Рассмотрим возможную модель возбуждения волн в тропосфере. Пусть давление на уровне Земли изменяется по гармоническому закону: $p'_0 = p_0 + P \cos(\omega t)$, например, из-за влияния метеорологических факторов или из-за подвижек земной коры (P – амплитуда колебания давления). Предполагается, что инфразвуковые волны, возбуждаемые при изменении давления, движутся со скоростью звука, причем за время прохождения волны состояние среды не успевает измениться (адиабатическое приближение). Положим $\omega \ll \omega_a, \omega_g$, это позволяет использовать уравнения статики атмосферы, к которым относятся (1) и (3).

Используем модель атмосферы, приведенную на рис. 5, а. Зависимость температуры от высоты изображена здесь в виде двух прямых: AB , где температура линейно уменьшается с высотой, и BC , где она линейно увеличивается, имеем два участка политропной атмосферы. Потребуем, чтобы в точке излома B температура T_1 и давление p_1 для этих участков совпали. Температура на изобарическом уровне p определена выражением (1). На рис. 5, б (кривая 1) иллюстрируется зависимость от времени модельной инфразвуковой волны на уровне $p = 400$ гПа, описывающей, в некотором приближении, внутреннюю гравитационную волну. Здесь T_0, p_0 и α взяты такими же, как и для стандартной атмосферы. Показан также «всплеск» температуры, моделирующий сейсмическое событие.

Пусть в точке B задана температура T_1 , тогда давление в этой точке

$$p_1 = p'_0 (T_1/T_0)^{g/(R_c\alpha)}.$$

На участке BC температура равна

$$\begin{aligned} T &= T_1(p/p_1)^{-(R_c|\beta|)/g} = T_1(p_1/p)^{(R_c|\beta|)/g} = \\ &= T_1(p'_0/p)^{(R_c|\beta|)/g} (T_1/T_0)^{|\beta|/\alpha}. \end{aligned} \quad (4)$$

С использованием (4) для $T_1 = 213,15$ К, $p = 200$ гПа, $\beta = -4$ построена зеркальная волна (рис. 5, б, кривая 2).

Предложенная модель носит приближенный характер. При возбуждении ВГВ не учитываются изменения приземной температуры, влияние орографии при обтекании ветром земного рельефа. Не учитывается, что ЗВ зависит не только от ВГВ, но и от состояния водяного пара в тропосфере. Водяной пар крайне изменчив, влажность и точка росы претерпевают значительные вариации. Тем не менее кривые на рис. 5 качественно правильно отражают наблюдаемые явления. Использование данных зондирования

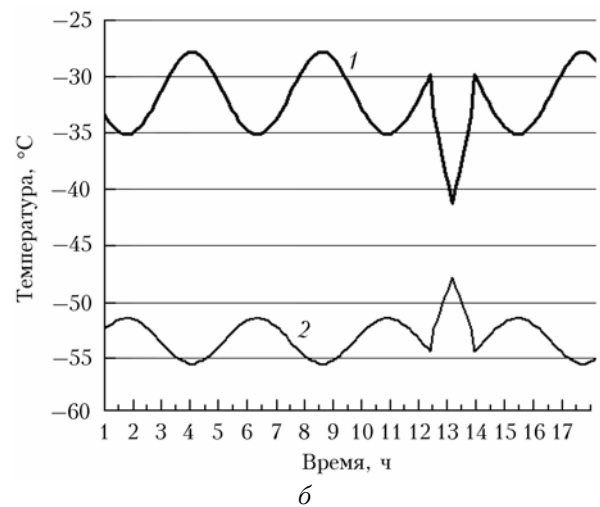
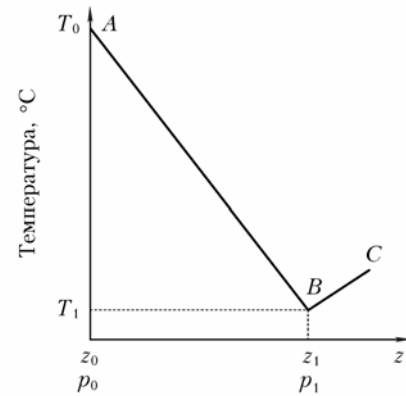


Рис. 5. Моделирование внутренней гравитационной (1) и зеркальной (2) волн

атмосферы позволяет оценить связь ЗВ и влажности. В частности, для Красноярска в июле 2012 г. коэффициент корреляции между рядами температуры и относительной влажности на уровне 200 гПа достаточно велик по модулю и был отрицательным: $R = -0,854$.

Волны в атмосфере, изображенные на рис. 4 и 5, являются аналогом волн в стратифицированном океане, о которых писал В.В. Шулейкин. На границе «вода–воздух» существуют поверхностные волны, возбуждаемые ветром. Частицы воды в них совершают движение по эллиптическим траекториям («вверх–вниз» и «вперед–назад» одновременно). В океане средняя плотность воды увеличивается по направлению ко дну, существует граница раздела вод разной плотности. При движении поверхностной волны вверх–вниз на границе возникает либо некоторое разрежение, либо избыточное давление. В силу условия сохранения гидростатического равновесия (условия неразрывности) на границе происходит движение частиц воды вверх под подошвой поверхностной волны и вниз под ее гребнем. В океанологии возникающую вновь волну принято называть внутренней (гравитационной) волной [22]. Поверхностная и внутренняя волны движутся в противофазе. В тропосфере ВГВ является аналогом поверхностной, а ЗВ – аналогом внутренней волны.

Волны в тропосфере при землетрясении в Японии в марте 2011 г.

Возбуждение ВГВ и ЗВ в атмосфере наблюдается при серьезных сейсмических событиях. На рис. 6 показано изменение температуры атмосферы на изобарических уровнях 450 и 200 гПа в период с 1 февраля по 13 апреля 2011 г. в Тихом океане, точка с координатами 38° с.ш., 142° в.д. вблизи эпицентральной области сильнейшего землетрясения 11 марта 2011 г. в Японии [33]. Стрелками показан момент основного толчка магнитудой $M = 9$ и афтершока с $M = 7$. Коэффициент корреляции между временными рядами температуры на уровнях 450 и 200 гПа за период с 1 февраля по 14 апреля составляет $-0,76$. Наибольший отрицательный коэффициент корреляции приходится на период с 27 февраля по 28 марта и равен $-0,86$. По-видимому, в это время из эпицентральной области в атмосферу поступали интенсивные ударно-акустические колебания, которые возбудили внутреннюю гравитационную и зеркальную волны.

Для сравнения на рис. 7 приведен «фонный» график для этой же точки за июль 2011 г., когда сейсмические события практически утихли. Здесь можно

видеть внутренние гравитационные волны малой амплитуды на трех изобарических уровнях. Зеркальная волна отсутствует. Парные коэффициенты корреляции для рядов на упомянутых уровнях положительные и лежат в интервале $R = 0,26-0,75$. Ряды температуры на рис. 7 похожи друг на друга и, по-видимому, отражают только метеорологические процессы в атмосфере. Известно [23, 34], что морское волнение (кроме волн типа цунами) не может возбудить волны в атмосфере. В рассмотренной точке отсутствуют орографические явления, в то время как на суше они могут иметь место, это причина отличия графиков на рис. 2–4 и рис. 7.

Таким образом, можно утверждать, что вариации температуры на рис. 6 вызваны именно сейсмической активностью. Редкий шаг выборки не позволил обнаруживать моменты сейсмических ударов, но хорошо видны инфразвуковые колебания в атмосфере после землетрясения и перед ним.

Существует мнение, что инфразвуковые колебания земной коры являются одним из предвестников землетрясения, однако возникают значительные трудности в обнаружении таких колебаний [35]. Приведенные выше результаты показывают, что атмосфера может служить антенной, принимающей эти колебания, а космические технологии – средством регистрации. Правда, при современном уровне развития эти

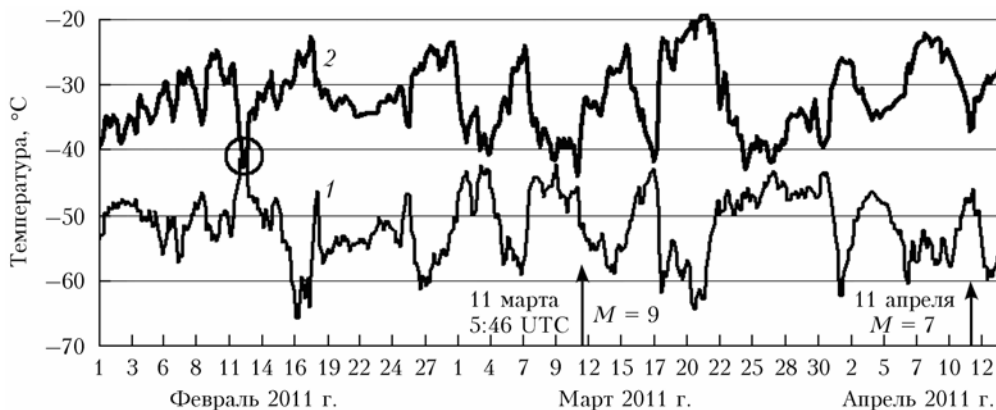


Рис. 6. Изменение температуры на изобарических уровнях 200 (1) и 450 гПа (2)

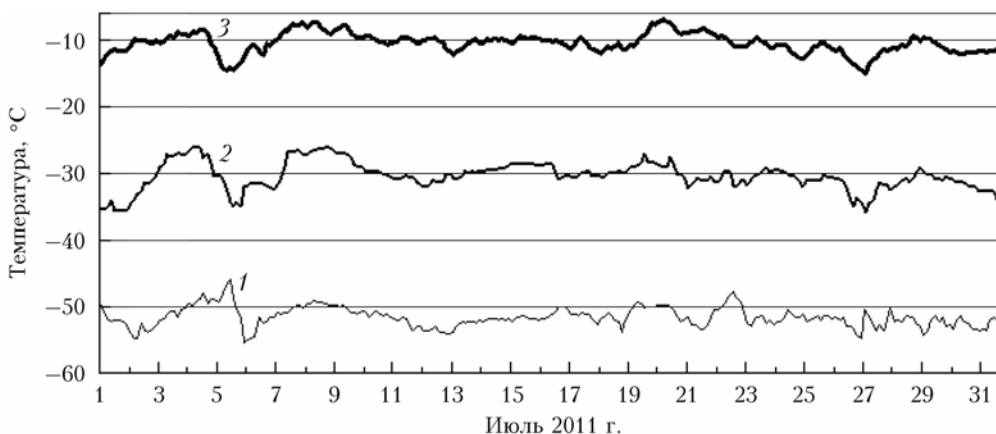


Рис. 7. Вариации температуры на изобарических уровнях 200 (1), 300 (2) и 450 гПа (3) в атмосфере Тихого океана, точка с координатами 38° с.ш., 142° в.д., июль 2011 г.

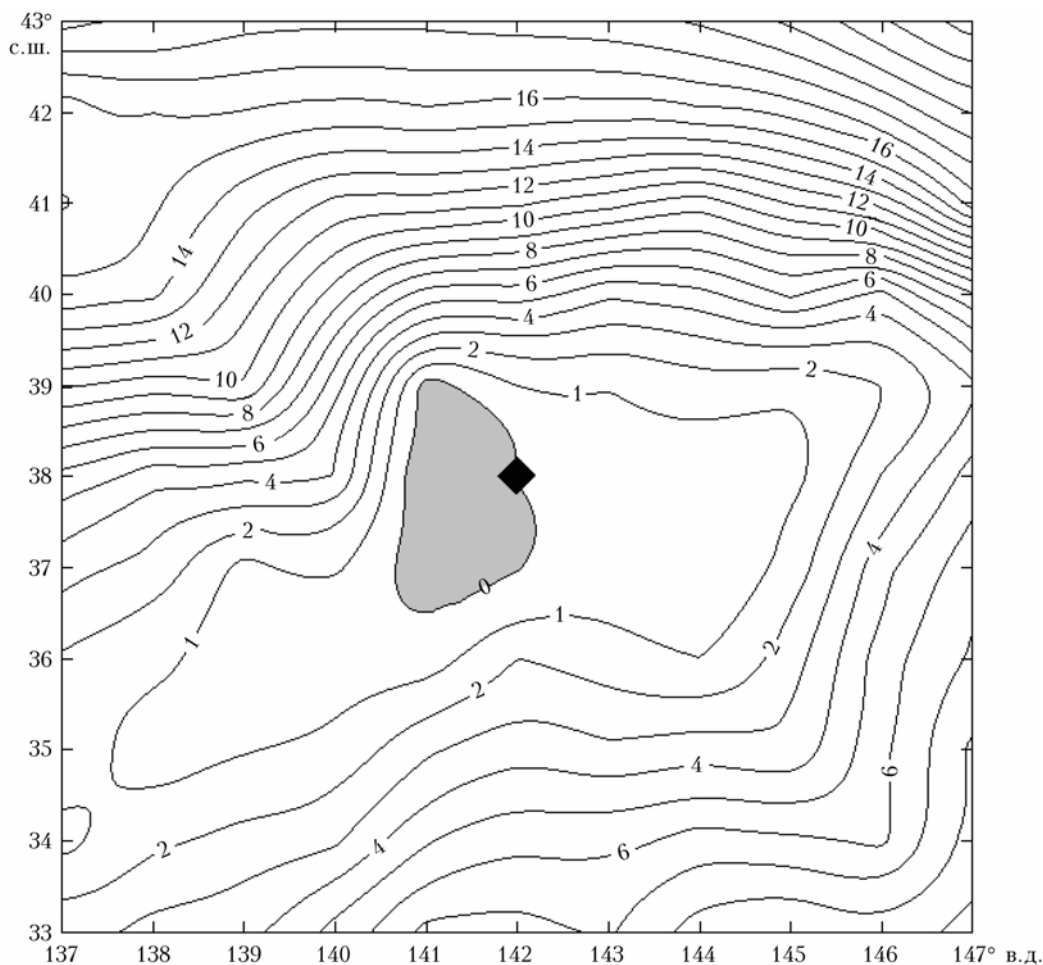


Рис. 8. Карта разности температурных полей на изобарических уровнях 450 и 200 гПа 12 февраля 2011 г.

методики не позволяют давать надежные краткосрочные прогнозы землетрясений, как не позволяют сделать это и другие методы сейсмического контроля.

Тем не менее с использованием данных ATOVS возможно очертить район наивысшей сейсмической активности. Из рис. 6 видно, что 12 февраля, за месяц до основного удара, на короткое время (3–6 ч) появились два разнонаправленных «выброса» температуры на уровнях 450 и 200 гПа (они показаны в кружке). Возможно, что это результат подвижки тектонических плит – предвестник главного удара, как и разнонаправленные колебания температуры 2, 7 и 10 марта. Данные ATOVS в фиксированный момент времени и на фиксированном изобарическом уровне позволяют представлять температуру, влажность и точку росы как двумерные числовые поля, зависящие от координат. На рис. 8 показана карта, построенная как разность температурных полей на изобарических уровнях 450 и 200 гПа 12 февраля в 18:00 UTC. Район наивысшей активности выделен серым цветом, ромбом отмечен эпицентр землетрясения, которое произошло через месяц, 11 марта.

Работа выполнена в Сибирском Федеральном университете в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ.

1. *Кашкин В.Б., Петров Е.В.* Оценка тропосферной задержки сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS с использованием спутниковых данных ATOVS о вертикальных профилях атмосферы // Изв. вузов. Физ. 2010. № 9(2). С. 27–29.
2. *Кашкин В.Б., Симонов К.С., Григорьев А.С.* Космический мониторинг: атмосферные отклики сильных землетрясений, обнаруживаемые космическими средствами дистанционного зондирования Земли // Инж. экол. 2011. № 2. С. 38–54.
3. *Кашкин В.Б., Романов А.А., Григорьев А.С., Баскова А.А.* Тропосферные эффекты землетрясений в Туве, наблюдаемые с искусственных спутников земли // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2012. № 2. С. 200–228.
4. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 752 с.
5. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 256 с.
6. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
7. *Лаврентьева Н.Н.* Уширение, сдвиг и интерференция колебательно-вращательных линий атмосферных газов: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: Томск, 2005. 236 с.
8. *Goodrum G.* NOAA KLM user's guide / Goodrum G., Kidwell K., Winston W. // National Ocean and Atmosphere Administration [Электронный ресурс]. URL: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/>

9. URL: ncdc.noaa.gov/docs/klm/index.htm
10. *Каталог станций приема спутниковой информации компании «СканЭкс»* [Электронный ресурс]. URL: <http://scanex.ru/ru/stations>
11. ATOVS and AVHRR Pre-processing Package [Электронный ресурс]. URL: www.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/aapp/
12. International ATOVS Processing Package [Электронный ресурс]. URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>
13. Li J., Wolf W., Menzel P. Global Soundings of the Atmosphere from TOVS Measurements: The Algorithm and Validation // J. Appl. Meteorol. 2000. V. 39, iss. 8. P. 1248–1268.
14. Ahn M.-H., Kim M.-J., Chung Ch.-Y., Suh A.-S. Operational Implementation of the ATOVS Processing Procedure in KMA and Its Validation // Adv. Atmos. Sci. 2003. V. 20, N 3. P. 398–414.
15. Белов В.В., Белобородов В.Е., Кабанов Д.М., Огреб С.М., Пискунов К.Т., Сакерин С.М., Тарасенков М.В. О возможности прогноза аэрозольной оптической толщи атмосферы по данным измерений радиометра Cimel CE-318 // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 80–86.
16. Афонин С.В. Апробация способа восстановления АОТ над сушей по спутниковым измерениям MODIS в ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 703–705.
17. URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html>
18. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
19. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ЗВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
20. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Электронный журнал «Российский журнал наук о Земле». Т. 2, № 2, апрель 2000. URL: <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/>
21. URL: <http://rp5.ru>
22. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: Наука, 1968. 1090 с.
23. Голицын Г.С., Кляцкин В.И. Колебания земной атмосферы, вызываемые движениями земной поверхности // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1967. Т. III, № 10. С. 1044–1052.
24. Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофиз. 1999. Т. XLII, № 1. С. 3–20.
25. Собисевич А.Л., Гусев В.А. Низкочастотные волновые процессы в геосферах, предшествующие сильным сейсмическим событиям: Коллективная монография // Экстремальные природные явления: Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 65–78.
26. Ахмедов Р.Р. Численное моделирование генерации акустико-гравитационных волн и ионосферных возмущений от наземных и атмосферных источников: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2004. 131 с.
27. Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. 1960. V. 38, N 11. P. 1441–1481.
28. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
29. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 268 с.
30. Голицын Г.С., Романова Н.Н. Вертикальное распространение звуковых волн в атмосфере с переменной по высоте вязкостью // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1968. Т. 4, № 2. С. 210–214.
31. Григорьев Г.И., Савина О.Н. Акустико-гравитационные волны в атмосфере с кусочно-линейным профилем // Изв. вузов. Радиофиз. 2002. Т. XLVI, № 8. С. 664–670.
32. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Внутренние гравитационные волны в неоднородных средах. М.: Наука, 2005. 195 с.
33. URL: <http://www.nature.com/nature/Posted online 19 May 2011 | Nature | doi: 10.1038/news.2011.305>
34. Голицын Г.С., Романова Н.Н., Чунгузов Е.П. О генерации внутренних волн в атмосфере морским волнением // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1976. Т. 12, № 6. С. 669–673.
35. Беседина А.Н., Кабыченко Н.В. Исследование сейсмических колебаний в длиннопериодной части спектра // Тр. МФТИ. 2011. Т. 3, № 3. С. 51–55.

V.V. Kashkin. Inner gravity waves in the troposphere.

The technique of passive space infrared and microwave atmospheric sounding is discussed. A result of analysis of the sounding is discovery of tropospheric inner gravity waves (IGW). It is possible to investigate now the infrasonic IGW with frequency of $4 \cdot 10^{-3}$ Hz or less. A wave, looking like mirror of IGW, is found in the initial part of the tropopause, the wave is named mirror wave (MW). MW origin is discussed, a simulation of IGW and MW is realized. The meteorologic events, explosives and seismic activity may excite IGW and MW. Diagrams of IGW and MW during the Japan catastrophic earthquake of 2011 are shown. The before-earthquake region with large seismic activity is found.