

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ОТ НАГРЕВНОГО СТЕНДА

О.П. Попова, Ю.С. Рыбнов

Представлены результаты измерений акустико-гравитационных волн вызванных работой нагревного стенда «Сура». Измерения проводились на разных эпицентральных расстояниях в широтном и меридиональном направлениях. Анализ показал, что начало работы стенда, сопровождается возбуждением акустико-гравитационных волн, которые регистрировались на поверхности земли. Установлено, что начальная фаза колебаний имеет стабильную длительность, которая зависит от расстояния до пункта регистрации.

Введение

Исследования процессов нелинейного взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с ионосферной плазмой, проводились с начала 70-х гг. Для этого в различных странах были разработаны и построены специализированные

нагревные стенды. На указанных стендах проводились исследования по возбуждению искусственной турбулентности ионосферы, возникающей в поле мощных радиоволн [Бахметьева и др., 2007]. Было установлено, что при воздействии мощных радиоволн в нижней ионосфере возрастает температура нейтральной компоненты. Если нагрев нейтралов достаточно интенсивен, то это приводит к «всплыванию» прогреваемой массы газа, развитию конвективной неустойчивости и, как следствие, турбулентности. При этом были выявлены перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые в заряженной ионосфере проявляются в виде акустико-гравитационных волн (АГВ) [Blanc, 1984; Francis, 1973; Hines, 1960].

Исследования показали, что в процессе такого взаимодействия проявляется широкий спектр физических и геофизических явлений, которые имеют как локальный, так и глобальный характер и могут иметь последствия для всей системы атмосфера-ионосфера.

В данной работе представлены результаты измерений пульсаций атмосферного давления в приземном слое атмосферы, вызванных работой нагревного стенда «Сура».

Предварительные результаты измерений

Из известных работ по измерению АГВ от нагревных стендов можно отметить [Minami et al., 1999]. Измерения проводились на расстоянии ≈ 35 км от нагревного стенда HIPAS (США, Аляска) и показали, что в атмосфере возбуждаются низкочастотные колебания с периодом ≈ 10 мин и амплитудой менее 1 Па. Скорость распространения была равна ≈ 210 м/с, а источник находился на высоте ≈ 90 км.

Эксперименты по прямым измерениям (in-situ) пульсаций атмосферного давления от нагревного стенда «Сура» проводились в ИДГ РАН с 2006 г. На первом этапе измерения проводились в п. Новая Жизнь, расположенном приблизительно в ≈ 30 км от стенда в широтном направлении. Для измерений использовался микробарометр с полосой пропускания $0,02 \div 20$ Гц. Так на рис. 1 приведена волновая форма акустического сигнала, записанного 19.09.2006 г. приблизительно через 6,5 мин после включения стенда.

Акустический импульс длительностью ≈ 40 с надежно идентифицировался на фоне акустического шума вызванного ветровой турбулентностью. Максимум спек-

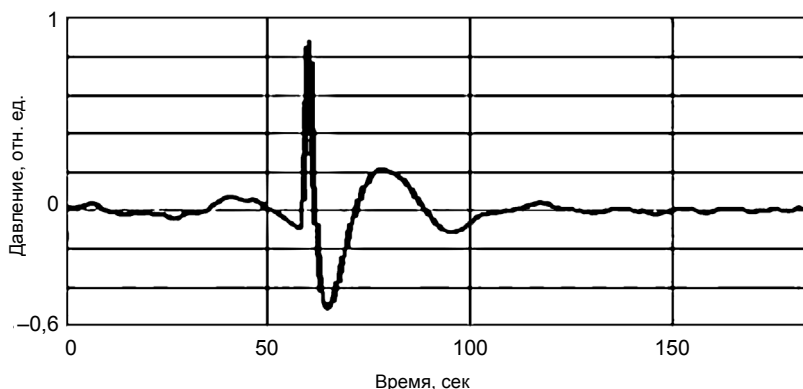
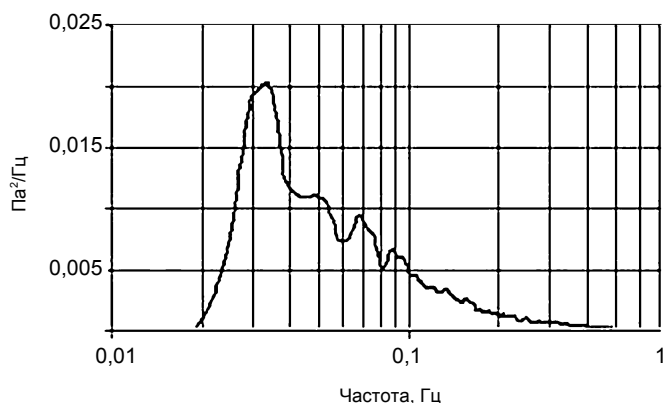


Рис. 1. Акустический сигнал от работы стенда

тральной плотности акустического сигнала находится на частоте $\approx 0,033$ Гц (см. рис. 2). По данным ионосферного зондирования, предоставленных НИРФИ, была оценена высота источника равная ≈ 100 км и скорость распространения равная ≈ 260 м/с.

Рис. 2. Спектр сигнала



Проведенный эксперимент показал принципиальную возможность обнаружения микропульсаций атмосферного давления в приземном слое атмосферы вызванных работой нагревного стенда наземными микробарометрическими средствами измерения.

В дальнейшем измерения проводились как в п. Новая Жизнь, так и в выносном пункте (ВП), расположенном на расстоянии ≈ 480 км в меридиональном направлении от стенда. Для измерения АГВ использовались широкополосные микробарометры с полосой пропускания $2 \cdot 10^{-4}$ Гц $\div$ 20 Гц.

Измерения в п. Новая Жизнь

Измерения проводились 18, 19 и 20 сентября 2007 г. и в период с 06 по 10 июля 2009 г. Стенд работал с 11:00 по мск. Так, 18, 19 сентября и 06–09 июля были зарегистрированы колебания давления, которые можно интерпретировать как сигналы от работающего стенда. На рис. 3 приведены волновые формы некоторых зарегистрированных сигналов (колебания синхронизированы по времени вступления).

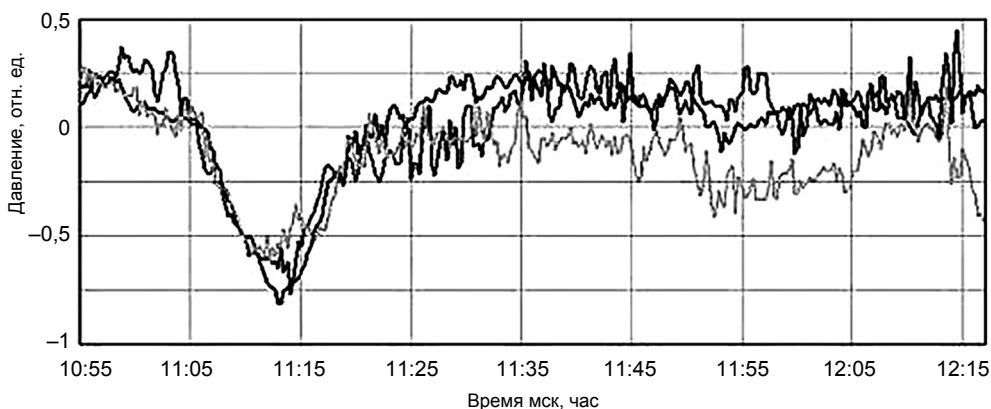


Рис. 3. Волновые формы сигналов в ближней зоне

Из рисунка видно, что через несколько минут после начала работы стенда регистрируются низкочастотный импульс давления. Для анализа на рис. 4 приведен суммарный сигнал.

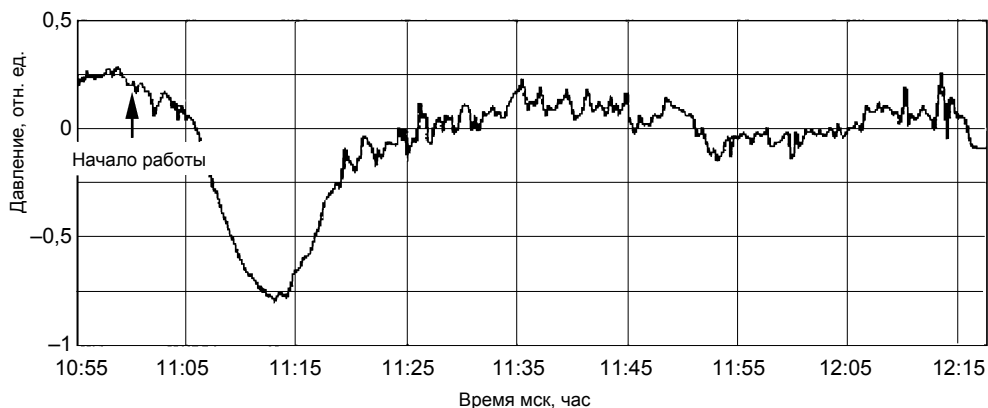


Рис. 4. Волновая форма суммарного сигнала

По данным ионосферного зондирования, предоставленных НИРФИ, отражающий слой находился на высоте ≈ 100 км.

Анализ материалов регистрации показал следующее:

- колебания начинаются в среднем через $5,5 \div 6,5$ мин после начала работы стенда;
- длительность импульса давления равна $\approx 15 \div 17$ мин;
- скорость распространения равна $\approx 260 \div 300$ м/с.

Измерения в выносном пункте

Измерения проводились в период с 21 по 25 сентября 2009 г. Стенд работал с 09:00 по мск. На рис. 5 приведены низкочастотные колебания давления, зарегистрированные 21, 22 и 25 сентября.

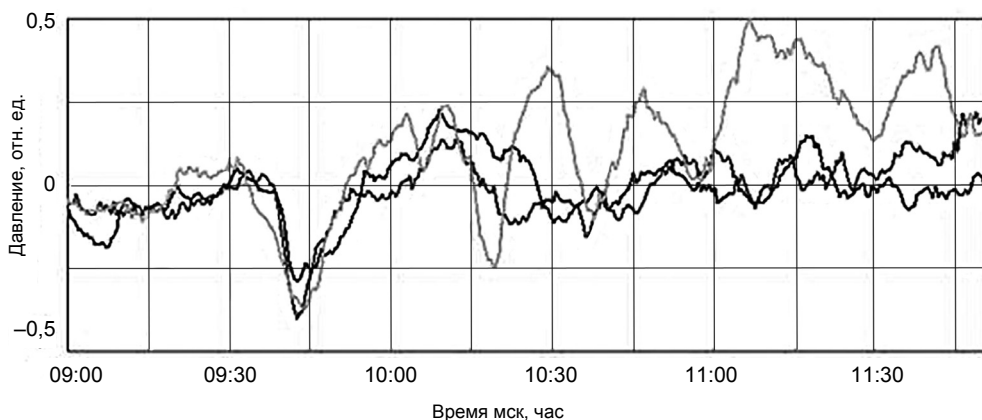


Рис. 5. Колебания давления в дальней зоне

Особый интерес представляет начальная фаза колебаний. Для анализа на рис. 6 приведен суммарный сигнал. Видно, что волновая форма начальной фазы совпадает с низкочастотным импульсом давления, зарегистрированным в п. Новая Жизнь.

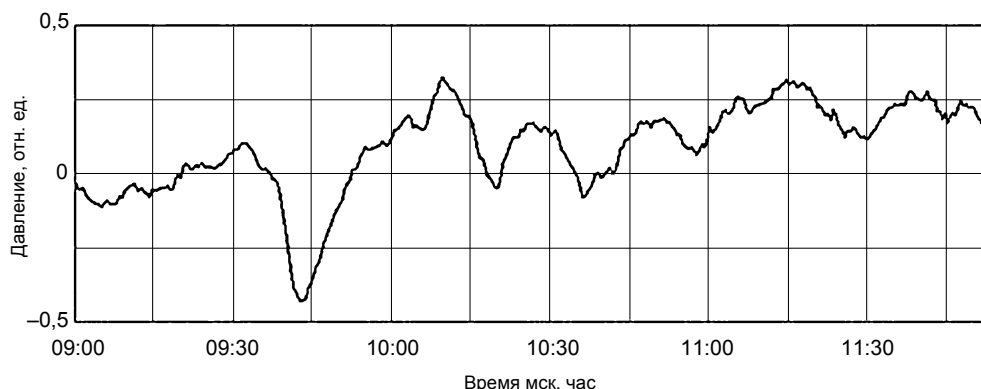


Рис. 6. Волновая форма суммарного сигнала

Анализ материалов регистрации показал следующее:

- колебания приходят в пункт регистрации в среднем через $\approx 32 \div 34$ мин;
- длительность начальной фазы равна $\approx 36 \div 37$ мин;
- скорость распространения равна $\approx 235 \div 250$ м/с.

Сравнительный анализ волновых форм суммарных сигналов показал следующее:

- начало работы стенда сопровождается характерным импульсом давления (начальная фаза) как для сигналов в ближней зоне, так и в дальней;
- наблюдается увеличение длительности импульса с расстоянием;
- в ближней зоне регистрируется только импульс давления (см. рис. 4);
- в дальней зоне после импульса в течение нескольких часов наблюдаются затухающие колебания (см. рис. 6).

Поэтому можно предположить, что начальная фаза колебаний может являться характерным признаком начала работы нагревного стенда.

Рассмотрим причины, по которым микропульсации атмосферного давления в приземном слое атмосферы не всегда были зарегистрированы в пунктах наблюдения. Наиболее вероятная причина – состояние ионосферы. Как показано в [Blanc, 1984; Francis, 1973; Hines, 1960] колебания наиболее эффективно возбуждаются на высотах $\approx 90 \div 110$ км (D-область и E-слой). Анализ данных ионосферного зондирования, предоставленных НИРФИ, показывает, что не всегда существует устойчивый отражающий (поглощающий) слой на указанных высотах. Обычно данный слой наблюдается в утренние часы, и тогда колебания уверенно регистрируются. Отсутствие слоя не создает условия по возбуждению искусственной турбулентности в ионосфере (нагрев ионосферы) и возникновению колебаний. По данным НИРФИ это характерно в дневные и вечерние часы.

Заключение

За период 2007–2009 гг. было проведено тринадцать наблюдений за работой стенда «Сура» на разных эпицентральных расстояниях как в широтном (35 км), так и в меридиональном (480 км) направлениях.

Были обнаружены девять сигналов (~69%), которые соответствовали начальной стадии работы стенда. В п. Новая Жизнь было зарегистрировано шесть сигналов (~75%) и три (~60%) в выносном пункте. Видно хорошее совпадение результатов, полученных в разных экспериментах.

Показано, что начальная фаза колебаний имеет практически стабильную длительность, которая зависит от расстояния до пункта регистрации и может являться характерным признаком работы нагревного стенда.

Литература

Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Касан Л.М., Понятов А.А., Толмачева А.В. Исследование атмосферы Земли методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы // Федеральное государственное научное учреждение: Научно-исследовательский радиофизический институт. Вестник РФФИ. май–июнь 2007. № 3 (53).

Blanc E. Interaction of an Acoustic Wave of Artificial Origin with the Ionosphere as Observed by HF Sounding at Total Reflection Levels // *Radio Science*, 19,653, 1984.

Francis S.H. Acoustic-gravity modes and large-scale traveling ionospheric disturbances of a realistic dissipative atmosphere // *J. Geophys. Res.*, 1973, v. 78, № 13, p. 2278–2301.

Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.*, 1960, v. 38, № 11, p. 1441–1481.

Minami S., Nishino M., Suzuki Y., Sato S., Tanikawa T., Nakamura Y., Wong A.Y. and UCLA HIPAS Group. Ionospheric stimulation by high power radio waves // *Adv. Space Res.* 1999. Vol. 24, №. 8, p. 997–1001.