

Рис. 4. Результаты радиоимпедансного зондирования байкальских дюн: геоэлектрический разрез, обозначения: 1 – сухой песок; 2 – влажный песок; 3 – кристаллические породы. Слева – усредненный разрез дюн

Предложен радиофизический метод обследования тектонических разломов, перекрытых слоем эоловых песков, основанный на комплексировании радиоимпедансного и георадарного зондирования. На широко распространенных на берегах Среднего Байкала дюнах проведена количественная интерпретация слоисто-неоднородной среды в ОНЧ-НЧ и ОВЧ-УВЧ диапазонах на глубину до 100 м. Определены УЭС и толщины слоев эоловых песков. Комплексная интерпретация георадарного и радиоимпедансного зондирования позволила определить геометрию зоны разлома.

Библиографические ссылки

1. Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э. Л. Афраймович и др. ; отв. ред. Г. А. Жеребцов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012.
2. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «Око-2» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.logsys.ru/>.
3. Ангархаева Л. Х. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002620893.

Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования. М. : Роспатент, 2002.

References

1. Afraimovich E. L. et al. Seismoionospheric and seismoelectromagnetic processes in the Baikal rift zone (Seismoionospheric seismoelectromagnetic and processes in the Baikal rift zone). Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2012, 304 p.
2. Radiotekhnicheskii pribor podpoverkhnostnogo zondirovaniya (georadar) OKO-2 (Radio Engineering of subsurface sensing device (GPR) OKO-2). Available at: <http://www.logsys.ru/>.
3. Angarkhaeva L. Kh. Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programmy dlya EVM № 2002620893. Paket programm "Impedans" dlya reshenia zadach radioimpedansnogo zondirovaniya (The certificate of official registration of the computer number 2002620893. The software package "Impedance" to solve problems Radioimpedance sensing). Moscow, Rospatent, 06.06.2002.

© Хаптанов В. Б., Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г., 2013

УДК 551.507:550.34

ОБНАРУЖЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ И ТРОПОСФЕРНЫХ ОТКЛИКОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

А. С. Григорьев, В. Б. Кашкин

Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: rtcvbk@rambler.ru

Обнаружено проявление акустических и внутренних гравитационных волн в тропосфере в период повышенной сейсмической активности. Проведено сравнение влияния сейсмического события на тропосферу и ионосферу. Результаты могут быть использованы для кратковременных прогнозов землетрясений.

Ключевые слова: тропосфера, волны в тропосфере, профили атмосферы, пассивная локация, зондирование атмосферы, прогноз землетрясений.

**DETECTION OF IONOSPHERE AND TROPOSPHERE RESPONSE
TO SEISMIC ACTIVITY ACCORDING TO SATELLITE DATA**

A. S. Grigoriev, V. B. Kashkin

Siberian Federal University

79 Svobodny prospect, 660041, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: rtcvbk@rambler.ru

The authors present a review of the detected show of the acoustic and inner gravitational waves in troposphere during increased seismic activity. The comparison of seismic impact on the troposphere and ionosphere is made. The results obtained can be used for short-term earthquake prognosis.

Keywords: troposphere waves, atmosphere profiles, passive location, satellite data, earthquake prognosis

Атмосфера является чувствительным индикатором различных возмущений на поверхности и в недрах Земли. Атмосфера имеет слоистую структуру, атмосферное давление и плотность воздуха постепенно убывают с высотой. При подъеме в тропосфере температура уменьшается до высоты 10–12 км, в стратосфере температура, наоборот, увеличивается с высотой. Между тропосферой и стратосферой на высоте 12–18 км лежит слой с практически постоянной температурой – тропопауза. С высоты около 50 км температура уменьшается вновь и достигает минимума в мезосфере. Выше 60 км находится ионосфера [1].

В настоящее время важным методом исследования ионосферы стала радиофизическая технология, использующая сигналы спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS и навигационную аппаратуру потребителей [2]. В Сибирском федеральном университете для приема сигналов используется двухчастотная аппаратура МРК-33 собственной разработки.

В отечественной и зарубежной литературе опубликовано большое число работ по влиянию на ионосферу наземных и подземных взрывов, цунами, изменения давления и температуры в нижней части атмосферы. В сейсмически активных регионах с выраженным блоковым строением земной коры при подготовке и при возникновении землетрясения возбуждаются интенсивные сейсмо-гравитационные колебания, имеющие период до 1–3 ч. Воздействуя на атмосферу в вертикальном направлении подобно поршню большой площади, эти колебания также способны возбуждать акустические гравитационные волны (АГВ) [2].

Возникает и другое явление – генерируются внутренние гравитационные волны (ВГВ). Аналогичные волны встречаются в стратифицированных водах океанов, морей и крупных озер [3]. Описаны и изучены проявления АГВ и ВГВ при землетрясениях в верхней атмосфере – возмущения в ионосфере и серебристые облака в мезосфере [2; 3].

Менее исследовано влияние сейсмических событий на тропосферу. Известны, например, необычные облачные структуры, связанные с землетрясениями [4]. Авторы настоящей статьи по спутниковым данным впервые наблюдали характерные проявления АГВ и ВГВ в тропосфере при сейсмических событиях, результаты опубликованы в [5].

С борта космического аппарата средствами пассивной локации в микроволновом и ИК диапазонах возможно определять вертикальные профили темпе-

ратуры, давления, влажности, направление и скорость геострофического ветра в тропосфере и тропопаузе [4]. Для этого используется аппаратура Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS), установленная на космических аппаратах NOAA и METOP [6] и аналогичная аппаратура на российских спутниках ДЗЗ. Данные ATOVS доступны в реальном времени для станций, принимающих сигналы спутников в режиме HRPT, в СФУ для этого используется станция АЛИСА [7], прием возможен два раза в сутки. При восстановлении профилей решается обратная задача, используется пакет прикладных программ IAPP [8]. По вертикали профили привязаны к уровням давления. Такие же профили тропосферы помещают сайте NOAA Air Resources Laboratory на сетке $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе в виде многомерных временных рядов с глобальным охватом. Ряды содержат выборку данных о температуре, точке росы и геострофическом ветре на 16 изобарических уровнях – от 1000 гПа до 20 гПа с шагом в 3 часа [9]. Пользователям Интернет данные доступны с задержкой в 6 часов относительно времени наблюдения. В настоящей работе использованы оба источника информации.

27 декабря 2011 г. в Восточной Сибири, в Республике Тува (Алтае-Саянская сейсмическая область), произошло землетрясение магнитудой $M = 6,6$, координаты эпицентра $51,86^\circ$ с. ш. и $95,92^\circ$ в. д. 27 и 28 декабря наблюдались афтершоки с $M = 4,6-4,7$ [10]. Следующее сильное землетрясение в том же районе произошло 26 февраля 2012 г. в 06:17 UTC, с $M = 6,5$. Динамика температуры за декабрь 2011 г. – февраль 2012 г. на двух изобарических уровнях 200 и 400 гПа показана на рис. 1.

В событиях конца 2011 г. – начала 2012 г. можно выделить несколько этапов. Первый – это относительно затишье, с 1 по 22 декабря. В этот период коэффициент корреляции между рядами температуры на изобарических уровнях 200 и 400 гПа составил $R = -0,176$, здесь трудно говорить о статистической зависимости между температурными рядами.

Однако уже с 23 декабря по 8 апреля коэффициент корреляции между рядами стал равным $R = -0,695$. С 3 по 29 января графики на рис. 1 почти зеркально отображают друг друга, $R = -0,92$. По-видимому, начиная с 23 декабря, возникли подвижки земной коры, возбудившие противофазные колебания на двух изобарических уровнях в тропосфере. Объяснить это явление можно на примере из гидрофизики [11].



Рис. 1. Динамика температуры в период Тувинского землетрясения

В океане ветер может возбуждать поверхностную волну. Океан стратифицирован – в нем возникают слои с границами раздела. Пусть поверхностная волна совершает движение вверх и вниз. Там, где расположен гребень поверхностной волны, на границе раздела возникает некоторое избыточное давление, там, где подошва волны, появляется разрежение. Вода слабо сжимаема. Поэтому ниже границы под гребнем давление должно уменьшиться, под подошвой волны – увеличиться. Таким образом, ниже границы возникает колебательное движение частиц воды вверх и вниз, которое противофазно по отношению к поверхностной волне. Это движение представляет собой внутреннюю гравитационную волну в океане.

Колебания температуры при 400 гПа, которые можно видеть на рис. 1, есть результат воздействия акустической гравитационной волны на атмосферу. Такие колебания аналогичны упомянутой поверхностной волне в океане [11]. В нашем случае выше уровня 400 гПа лежит тропопауза – граница раздела. Уровень 200 гПа попадает в тропопаузу, колебания температуры при 200 гПа – не что иное, как проявление внутренней гравитационной волны. Здесь физика явления аналогична рассмотренному выше примеру [11].

Источниками АГВ могут быть процессы при обтекании ветром неровностей земной поверхности, колебания приповерхностной температуры и давления [3]. Волны на рис. 1 получены путем выборки с шагом в 3 ч. Таким образом, рис. 1 – это результат регистрации моды с частотой ниже $2,6 \cdot 10^{-5}$ Гц. Такие частоты могут возбуждаться при длиннопериодных колебаниях поверхности Земли в сейсмически-опасных районах.

Представляет интерес сравнение реакции ионосферы и тропосферы при Тувинском землетрясении 27 декабря 2011 г. График вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере и график изменения температуры на двух изобарических уровнях при землетрясении в Туве, момент основного толчка отмечен вертикальной линией. Исследование реакции ионосферы выполнено в СФУ И. Н. Сушкиным приведен на рис. 2.

Вариации ПЭС возникли за два дня до основного толчка. По сравнению с вариациями ПЭС, изменения

температуры на графике выглядят сильно сглаженными. Вероятнее всего, что реальные изменения температуры также достаточно быстрые, но большой шаг выборки данных по температуре не позволил их заметить.

Катастрофическое землетрясение в Японии в марте 2011 г. магнитудой $M = 9$ является самым разрушительным в XXI в. После главного удара 11 марта с $M = 9$ продолжались афтершоки, наиболее сильный пришелся на 11 апреля с магнитудой $M = 7$ [12].

Нами были использованы спутниковые данные о вертикальных профилях температуры-давления из [10]. Для анализа выбрана точка с координатами 38° с. ш. 142° в. д. вблизи эпицентральной области землетрясения.

На рис. 3 приведен график изменения температуры атмосферы на изобарических уровнях 450 и 200 гПа в период с 1 февраля по 14 апреля 2011 г. Стрелкам отмечены моменты землетрясений 11 марта и афтершока 11 апреля. Было установлено, что уровень 450 гПа лежит ниже тропопаузы, а уровень 200 гПа попадет в тропопаузу. Обращает на себя внимание значительная амплитуда колебаний температуры на каждом уровне. Коэффициент корреляции между рядами температуры на изобарических уровнях 200 и 400 гПа равен $R = -0,76$.

12 февраля появились два кратковременных «выброса» температуры на уровнях 450 и 200 гПа (на рис. 3 показаны в кружке). В 18:00 UTC температура на уровне 400 гПа уменьшилась по сравнению с тем же временем 11 февраля, на $13,3^\circ$, а на 200 гПа – возросла на $9,1^\circ$. По-видимому, 12 февраля, во время подготовки основного толчка, из эпицентральной области в атмосферу поступили ударно-акустические колебания, вызванные подвижками земной коры и возбудившие АГВ и ВГВ. Эти выбросы можно рассматривать как предвестники главного удара, как и похожие колебания температуры 2, 7 и 10 марта.

Результаты измерений ATOVS привязаны к уровням давления. Как функции давления, на рис. 4 показаны средний профиль температуры за ноябрь 2010 – апрель 2011 гг. над эпицентральной областью землетрясения и профиль 12 февраля 2011 г., 18:00 UTC.

Профиль 12 февраля пересекает уровень -42° дважды, что отвечает двум разнонаправленным пикам в кружке. Усредненный график имеет одну точку пересечения при 295 гПа, для него характерно монотонное убывание температуры на интервале от -0° до -60° С при уменьшением давления. График за 12 февраля

расщепился на две ветви – правая характеризует связь температуры и давления для АГВ, а левая – для ВГВ. АГВ вызвала увеличение давления на 144 ± 5 гПа относительно 295 гПа при -42° . Это привело к возбуждению ВГВ, в которой, наоборот, давление уменьшилось на 115 ± 5 гПа.

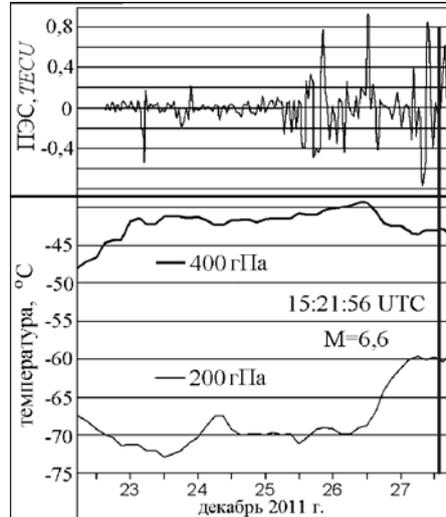


Рис. 2. График вариаций ПЭС и изменения температуры



Рис. 3. Изменение температуры на изобарических уровнях 200 и 450 гПа, землетрясение в Японии, 2011 г.

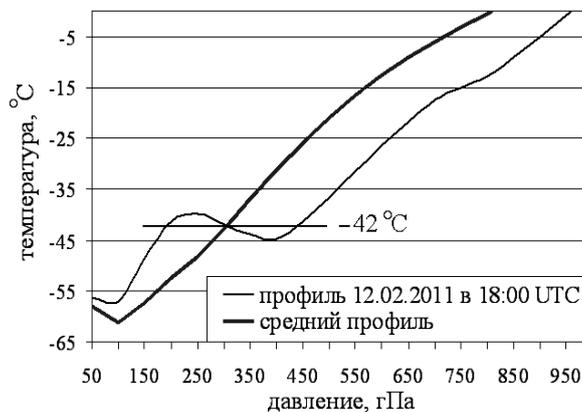


Рис. 4. Профили температуры

Представленные в работе результаты демонстрируют тропосферные эффекты, связанные с сейсмической активностью, которые могут быть использованы для кратковременных прогнозов крупных землетрясений совместно с известными предвестниками сейсмической опасности. Эти результаты показывают также возможность визуализации акустических гравитационных волн и внутренних гравитационных волн в тропосфере с использованием данных зондирования атмосферы с космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1984.
2. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ ЗВХ ВСНЦ СО РАН, 2006.
3. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. М. : Мир, 1978.
4. Кашкин В. Б., Симонов К. С. Космический мониторинг: атмосферные отклики сильных землетрясений, обнаруживаемые космическими средствами дистанционного зондирования Земли // Инженерная экология. 2011. № 2 (98). С. 38–54.
5. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М. : Логос, 2001.
6. Technical Documentation Introduction Page [Electronic resource]. URL: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>.
7. Персональные станции приема, хранения и обработки изображений Земли из космоса – основная продукция Инженерно-технологического центра СканЭкс [Электронный ресурс]. URL: <http://scanex.ru/ru/stations>.
8. Index of /opsats/polar/iapp [Electronic resource]. URL: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>.

9. READY Current & Forecast Meteorology. Forecast Model Graphics [Electronic resource]. URL: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmnet.html>.

10. The old maps and event pages have been replaced [Electronic resource] URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0007dax.php>.

11. Шулейкин В.В. Физика моря. М. : Наука, 1968.

12. News & Comment [Electronic resource]. URL: <http://www.nature.com/nature>.

References

1. Matveev L. T. Fizika atmosfery (Physics of the Atmosphere). Leningrad, Hidrometeoizdat, 1984. 752 p.
2. Afraimovich E. L., Perevalova N.P. GPS-monitoring verkhney atmosfery (GPS-Monitoring of the earth's Upper Atmosphere). Irkutsk, RAS Institute of Solar-Terrestrial Physics, 2006. 480 p.
3. Gossard E. E., Hooke W. H. Waves in the Atmosphere. Elsevier, Oxford-New York, 1975.
4. Kashkin V. B., Simonov K. S. Ingenernaya Ekologiya (Engineering Ecology), 2011, № 2, pp. 38–54.
5. Kashkin V. B., Sukhinin A. I. Distantionnoye zondirovanie Zemly iz kosmosa. Cifrovaya obrabotka izobrazheniy (Remote sensing. Image Processing). Moscow, Logos, 2001. 264 p.
6. Available at: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>
7. Available at: <http://scanex.ru/ru/stations>
8. Available at: <http://cimss.ssec.wisc.edu/opsats/polar/iapp/>
9. Available at: <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmnet.html>
10. Available at: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/usc0007dax.php>
11. Shuleykin V. V. Fizika Morya (Sea Physics). Moscow, Nauka, 1968. 1090 p.
12. Available at: <http://www.nature.com/nature>.

© Григорьев А. С., Кашкин В. Б., 2013

УДК 551.501:537.874.34

ТРОПОСФЕРНАЯ ЗЕНИТНАЯ ЗАДЕРЖКА ПО ДАННЫМ GPS-СТАНЦИЙ ULAZ, IRKT И BADG*

Ю. Б. Башкуев¹, М. Г. Дембелов¹, А. В. Лухнев², В. А. Саньков²

¹Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

²Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128. E-mail: mdembelov@yandex.ru

На основе многолетних измерений радиосигналов на сети постоянно действующих GPS станций ULAZ, IRKT и BADG, разнесенных на расстояние до 230 км, получены оценки тропосферной зенитной задержки (ТЗЗ), определяемой при обработке первичных GPS данных с помощью программного пакета GAMIT. ТЗЗ отражает вариации различных атмосферных процессов. Проведен детальный анализ данных GPS станции ULAZ, полученных за период с 1999 по 2010 гг.

Ключевые слова: GPS, тропосферная зенитная задержка, атмосферные процессы.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ-Сибирь № 12-05-98051 и интеграционного проекта СО РАН № 11.