

УДК 550.343.62

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЛИТОСФЕРНО-АТМОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

*В.И. Нифадьев, В.В. Адушкин, Б.Б. Чен,
С.И. Попель, Г.А. Когай, А.Ю. Дубинский, П. Вайдлер*

Показано, что в системе литосфера-атмосфера в сейсмически активных регионах существуют благоприятные возможности для преимущественной генерации инерционно-гравитационных (внутренних гравитационных) волн, которые можно рассматривать в качестве механизма литосферно-атмосферных связей. Измерения высотных профилей температуры с помощью спутников использованы для экспериментального выявления внутренних гравитационных волн. На примере двух землетрясений (в Узбекистане и Киргизии) показана возможность идентификации внутренних гравитационных волн, источником которых являются сейсмически активные регионы.

Ключевые слова: атмосфера; литосфера; внутренние гравитационные волны; методика; предвестник; землетрясение; идентификация; температура; спутник; длина волны; амплитуда.

СЕЙСМИКАЛЫК АКТИВДҮҮ АЙМАКТАРДАГЫ ЛИТОСФЕРАЛЫК-АТМОСФЕРАЛЫК БАЙЛАНЫШТАРДЫН МЕХАНИЗМИ ЖӨНҮНДӨ

*В.И. Нифадьев, В.В. Адушкин, Б.Б. Чен, С.И.
Попель, Г.А. Когай, А.Ю. Дубинский, П. Вайдлер*

Макалада сейсмикалык активдүү аймактарда литосфера-атмосфера системасында инерциялык-гравитациялык (ички гравитациялык) толкундарды артыкчылыктуу генерациялоо үчүн жагымдуу мүмкүнчүлүктөр бар экендиги көрсөтүлдү, бул толкундарды литосфералык-атмосфералык байланыштар механизми катары кароого болот. Спутниктердин жардамы менен температуранын жогорку көрсөткүчтөрүн өлчөө ички гравитациялык толкундарды эксперименттик аныктоо үчүн пайдаланылды. Эки жер титирөөнүн мисалында (Кыргызстанда жана Эзбекстанда) чыгуу булагы сейсмикалык активдүү аймактар болуп эсептелген ички гравитациялык толкундарды идентификациялоо мүмкүнчүлүгү көрсөтүлдү.

Түйүндүү сөздөр: атмосфера; литосфера; ички гравитациялык толкундар; методика; алдын ала кабарлоочу; жер титирөө; идентификация; температура; спутник; толкундун узундугу; амплитуда.

TO THE ISSUE OF THE MECHANISM OF LITHOSPHERIC-ATMOSPHERIC RELATIONS IN THE SEISMICALLY ACTIVE REGIONS

*V.I. Nifadiev, V.V. Adushkin, B.B. Chen, S.I. Popel,
G.A. Kogai, A.Yu. Dubinskii, P. Weidler*

It is shown that in the lithosphere-atmosphere system in seismically active regions, there are favourable opportunities for preferential generation of inertial-gravity (internal gravity) waves, which can be considered as a mechanism of lithospheric-atmospheric relations. Measurements of altitude temperature profiles using satellites are used to experimentally detect internal gravity waves. Using the example of two earthquakes (in Uzbekistan and Kyrgyzstan), the possibility of identifying internal gravity waves, the source of which are seismically active regions, is shown.

Keywords: atmosphere; lithosphere; internal gravity waves; technique; precursor; earthquake; identification; temperature; satellite; wavelength; amplitude.

Введение. Современная сейсмология может давать надежные долгосрочные прогнозы за несколько лет до землетрясений, достаточно точно указывая места будущих сейсмических событий. При этом такие прогнозы не могут указывать время совершения таких катастрофических природных явлений.

Среднесрочные прогнозы менее достоверны, а краткосрочные, которые имеют очень большое значение для предупреждения населения, в настоящее время практически не развиты. Краткосрочный прогноз землетрясений, основанный на физических предвестниках [1], связан с регистрацией различных аномалий геофизических полей. При этом вопрос о том, что же все-таки является предвестником и какой из них лучше и надежнее, остается пока открытым [2].

Целью данной работы является экспериментальная проверка приемлемой модели механизма литосферно-атмосферной связи в сейсмически активных регионах.

1. Механизмы литосферно-атмосферных связей

В настоящее время на основе многочисленных исследований установлено, что для достоверного и точного прогнозирования землетрясений необходимо иметь большой объем качественной информации о возникающих аномалиях различных параметров в сейсмически активных регионах в период подготовки и протекания сейсмических событий. Так, например, эти аномалии могут проявляться в изменении уровня концентрации радона [3], что дает возможность успешного использования этого параметра как краткосрочного (за 3–4 месяца) предвестника землетрясений. При этом заметим, что практически каждый из предвестников имеет собственную модель и часто для одних и тех же предвестников предлагалось сразу несколько моделей [4]. Хотя даже один, по сути, процесс деформации земной коры и последующего разрыва может вызывать большое разнообразие совершенно различных процессов, описываемых разными моделями. Поэтому при создании модели литосферно-атмосферно-ионосферномагнитосферных связей в [5] с самого начала была поставлена задача описания всех наблюдаемых аномалий в рамках единой концепции подготовки сейсмического события как сложной открытой диссипативной системы, в которой все процессы развиваются в определенной после-

довательности, а аномалии имеют свой источник и сами являются источником для последующей аномалии.

Так, например, на финальной стадии подготовки землетрясения в Аквиле, Италия, 6 апреля 2009 г. были отмечены непрерывность, синхронность и локальность проявления сейсмических [6], геодинамических [7], геохимических [8], поверхностных тепловых [9], а также многочисленных аномалий в атмосфере, ионосфере и магнитосфере [5, 7–14]. Это свидетельствует о том, что все зарегистрированные аномалии являются звеньями одной цепи – сложного комплексного процесса подготовки катастрофического события, которое можно описать в рамках синергетического подхода [15].

Изучение различных предвестников землетрясений позволило сделать следующие основные выводы [3]: 1) время появления предвестника зависит от магнитуды (энергии) будущего землетрясения и увеличивается с увеличением магнитуды; 2) радиус области проявления предвестников землетрясений также увеличивается с увеличением магнитуды; 3) амплитуда предвестников плавно затухает по мере удаления от эпицентра будущего землетрясения [16].

До сих пор не существует общепринятой точки зрения, которая бы позволила интерпретировать наблюдения за атмосферой сейсмически активных регионов, хотя гипотез предостаточно. Так, в статье [17] в результате пассивной космической локации описаны проявления акустических колебаний – внутренних гравитационных волн (ВГВ) в интервале высот от поверхности до границы тропопаузы. В качестве причины возникновения ВГВ названы сейсмическая активность, взрывы, метеорологические явления. Рассматривая гипотезы по интерпретации наблюдений за ионосферой сейсмически активных регионов, авторы в [18] приходят к заключению, что “фактически ни электромагнитная, ни инфразвуковая гипотезы не способны описать весь комплекс экспериментальных результатов, но если допустить присутствие ВГВ, то можно интерпретировать все наблюдения”.

Именно в сейсмически активных регионах существуют благоприятные возможности для преимущественной генерации ВГВ:

- 1) постоянно существующие глобальные колебания, вызванные так называемыми сейсмо-

гравитационными колебаниями, имеющими период порядка 1–3 ч [16], становятся более интенсивными за несколько дней перед сильными землетрясениями. Длиннопериодные колебания выступают как источник сопутствующих им колебаний атмосферы и, воздействуя на атмосферу подобно “поршню”, способны генерировать ВГВ [19];

- 2) аномалии потока уходящего от Земли инфракрасного излучения, которые являются механизмом преимущественной генерации ВГВ в сейсмически активных регионах непосредственно перед землетрясениями [20]. Как правило, в месте пересечения разломов возникают аномалии нестационарных тепловых потоков, которые имеют повышенную на несколько градусов температуру, время жизни порядка 2–10 дней и площадь порядка 10^4 м², и могут быть связаны с локальным парниковым эффектом, обусловленным интенсификацией дегазации литосферных газов (СН₄, СО₂) перед землетрясениями. Эти нестабильные тепловые аномалии могут рассматриваться как источники ВГВ [19–22]; нестационарный приток массы литосферных газов. Известно [23], что перед землетрясением наблюдается изменение динамики выхода литосферных газов за счет высокой проницаемости разломных зон сейсмически активных регионов. Разгрузки природных газов в периоды подготовки тектонических землетрясений создают в приземной атмосфере аномальные эффекты в виде сверхфоновых концентраций отдельных газов, преимущественно углеродистых: СО₂, СН₄ и его гомологов [23]. Особенностью динамики выхода газов является нестационарность дегазации. Низкочастотная нестационарность притока литосферных газов в приземную атмосферу в периоды подготовки землетрясений приводит их к сверхфоновым концентрациям.

Сравнение эффективности указанных выше механизмов генерации ВГВ показывает [18], что поток энергии при генерации ВГВ собственными колебаниями Земли – порядка $2 \cdot 10^{-3}$ эрг/см², а при генерации ВГВ притоком газов – порядка $2 \cdot 10^{-1}$ эрг/см²-с, т. е. на два порядка эффективнее.

Таким образом, в системе литосфера-атмосфера в сейсмически активных регионах су-

ществуют благоприятные возможности для преимущественной генерации ВГВ, которые можно рассматривать в качестве механизма литосферно-атмосферных связей. На стадии подготовки землетрясения сами волны могут генерироваться в таких регионах преимущественно в результате выхода литосферных газов в приземную атмосферу [18]. При этом необходимость нахождения новых предвестников грозящих стихийных бедствий, которые можно было бы использовать для оперативного мониторинга методами дистанционного зондирования, все еще остается актуальной.

2. К методологии идентификации ВГВ в сейсмически активных регионах

Прежде всего, необходимо отметить ряд исследований по выявлению ВГВ, выполненных в прошлом столетии, в которых приводятся данные о возможности обнаружения ВГВ с помощью спектроскопической термометрии, что, в свою очередь, позволяет определять потоки энергии волн в верхнюю атмосферу и выявить возможные их источники [например, 24, 25].

К настоящему времени в литературе существуют описания дистанционных методов обнаружения ВГВ в атмосфере [например, 26, 27]. Так, в работе [26] определение волновых возмущений (ВВ) в средней атмосфере и их параметров проводится по результатам восстановления температуры лидарным методом путем идентификации ВВ по относительным флуктуациям температуры, которые выделяются на фоне среднего профиля использованием сглаживающего сплайна. Спектральные характеристики ВВ исследуются с помощью непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Методика позволяет, прежде всего, исследовать спектральные характеристики отдельных волновых пакетов, в виде которых, как правило, наблюдаются ВВ в средней атмосфере. Для выделения ВВ на фоне хаотических флуктуаций температуры использован метод фазовых диаграмм, с помощью которых определяется период и фазовая скорость ВВ с определенной длиной волны.

Но, как показывают экспериментальные данные, во многих случаях вертикальные профили температуры, полученные различными методами (лидар, ракеты, радиозонды, радиолокация), показывают одну доминирующую структуру волны в определенном диапазоне высоты

[28], то есть свидетельствуют о дискретности события.

Для исследования дискретных волновых структур в [27] использованы измерения высотных профилей температуры с помощью метода радиопросвечивания, т. н. радиозатменного метода (Radio occultation (RO) measurements). Метод позволяет получать профили температуры “с глобальным пространственным охватом и высоким разрешением по высоте при любых условиях погоды” [27]. В этой же работе сформулирован критерий идентификации низкочастотной волны (идентификационный критерий ВГВ) и предложен метод определения внутренней частоты и других параметров волны по одному профилю температуры (плотности).

3. Результаты экспериментальной идентификации ВВ

Для идентификации ВГВ, связанной с источником в сейсмически активных регионах, мы подвергли обработке данные спутниковых измерений температуры средней атмосферы, доступные в системе GIOVANNY [29]. Вертикальные профили температуры были восстановлены в течение суток через каждые 3 часа по данным температуры на изобарических поверхностях от 1000 до 0,1 *hPa* над участками с пространственным разрешением 1.25° [29].

Для определения параметров ВВ в основном использовались методы Фурье-анализа [30–32] и реже применялись возможности и преимущества вейвлет-анализа [33]. При этом обычно исследовались усредненные параметры ВВ, и игнорировалась структура ВВ, которые существовали в виде отдельных волновых пакетов на хаотическом фоне флуктуаций [34].

Применение метода вейвлет-анализа для выявления и анализа структуры волновых процессов, позволяет получать информацию о частотных параметрах волновых процессов и об их локализации в пространстве [26]. Было использовано непрерывное комплексное вейвлет-преобразование типа Морле 6-го порядка [35]. Численные расчеты были выполнены в соответствии с алгоритмом, приведенным в [27]. Информация о сейсмических событиях взята из [36].

Рассмотрены землетрясения, которые произошли в Узбекистане (в 19 км NNE от Булунгура с координатами 39.956°N; 67.314°E) 26 мая 2013 года в 06:08:15.9 UTC на глубине 18 км

с $M = 5.7$ и в Киргизии 08 января 2007 года в 17:21:49.9 UTC с координатами 39.803°N; 70.312°E на глубине 16 км с $M = 6$ [36].

Использованы спутниковые извлечения температурных профилей в 06:00 UTC (дневной) и 18:00 UTC (ночной) сроки наблюдений над местом наблюдения – лидарной станцией Теплоключенка. Случайная погрешность температуры составляет $\delta T \approx 1.0$ К, а вертикальное разрешение – $\delta h \approx 200$ м.

Выделение флуктуаций температуры с помощью сглаживающего сплайна проведено как для единичного измерения профиля температуры, так и для измерений в течение суток.

Выявление “волнообразных” колебаний температуры по результатам наблюдений как индуцированной волны проведено по экспериментальному значению относительной пороговой амплитуды a_e . В этом случае наблюдаемые колебания температуры в нижней стратосфере могут быть связаны с ВГВ, если значение относительной пороговой амплитуды a_e подчиняется соотношению [27, 37] $1 > a = a_e > 0$, и которое может являться “необходимым и достаточным условием при идентификации ВГВ, то есть если значение a_e удовлетворяет этому условию, то можно предположить, что наблюдаемые колебания связаны с волной. В противном случае, когда $a_e > 1$, наблюдаемые флуктуации могут быть связаны, например, с турбулентностью” [37]. Сами величины относительного порогового значения амплитуды a_e рассчитывались по выражению [27]:

$$a_e = \frac{2\pi g |T'|}{\lambda_z N^2 \bar{T}} = \frac{2(1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}{1 + (1 - f^2/\omega^2)^{1/2}},$$

где – амплитуда температурных возмущений; N^2 – квадрат частоты Брента–Вяйсяля; f и ω – соответственно инерциальная (Кориолиса) и внутренняя частоты; λ_z – вертикальная длина волны. Параметры в правой части могут быть восстановлены из измерений температуры.

На рисунке 1 приведены распределения величин относительного порогового значения амплитуды. Видно, что действительно колебания температуры в обоих случаях есть не что иное, как индуцированные волны. На рисунках здесь и далее стрелками указано время землетрясений.

Вертикальные длины волн были рассчитаны с помощью вейвлет-анализа единичных

профилей температуры, используя вейвлет Морле 6-го порядка (рисунок 2).

Рассчитанные величины показывают наличие ВГВ в обоих случаях с вертикальными дли-

нами волн более 10 км. Еще Fritts и Alexander [28], рассматривая активность гравитационной волны в средней атмосфере, установили, что волны с вертикальными длинами волн более

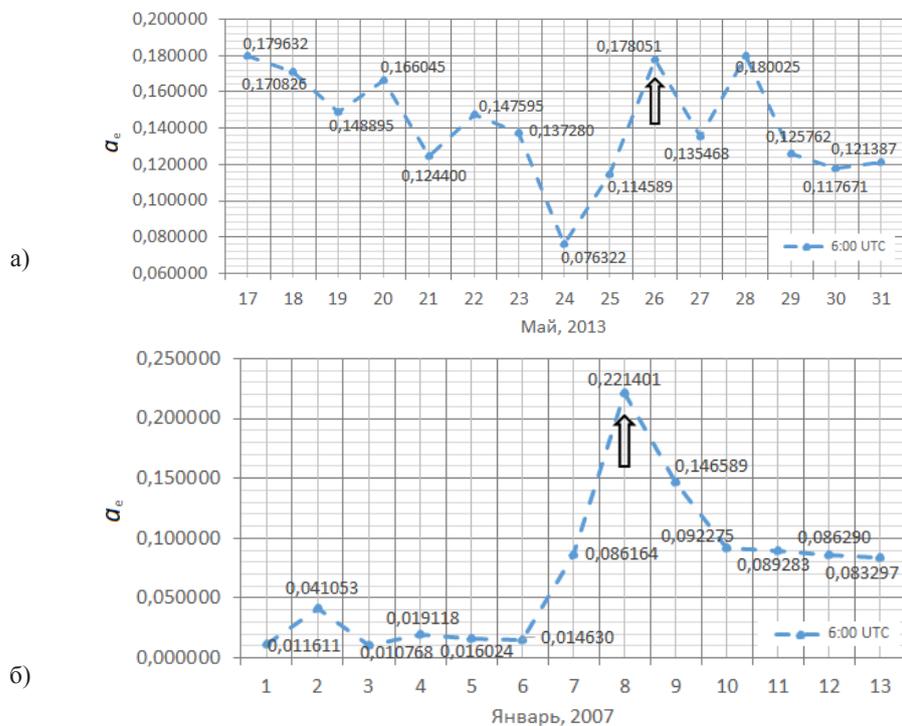


Рисунок 1 – Распределение величины относительного порогового значения амплитуды a_e за 10 дней до и 5 дней после землетрясений в Узбекистане (а) и в Киргизии (б)

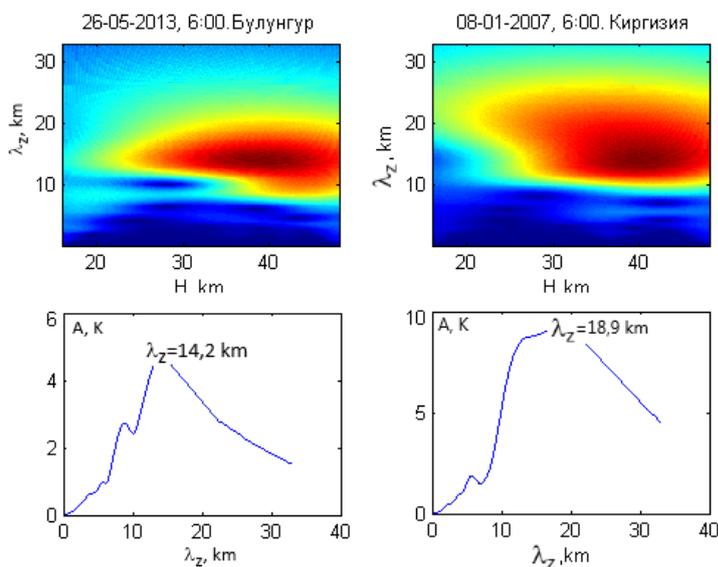


Рисунок 2 – Примеры нахождения длин волн с помощью НВП: Узбекистан, 26.05.2013, 6:00 UTC (а), Киргизия, 08.01.2007, 6:00 UTC (б). На верхних рисунках – экспериментальные вейвлет-спектры

10 км связаны с глубоким конвективным нагревом. Именно конвективные неустойчивости, возникающие в нижней атмосфере при процессах, происходящих в литосфере, выступают в качестве основного источника генерации ВГВ в сейсмически активных районах [см., например, 38 и 39].

Одним из важных свойств ВГВ является то, что, достигая мезосферы, волны могут разрушаться, что приводит к локальному нагреванию и движениям воздуха. Эти области могут генерировать вторичные ВГВ, которые распространяются вверх и вниз из мезосферы [40]. Наши экспериментальные данные подтверждают это, поэтому в данном исследовании рассматривается диапазон высот стратосферы от 16 до 48 км, хотя температура была получена до 63 км. Поиск наличия ВГВ в указанном диапазоне высот в стратосфере проводился еще и потому, что эти волны распространяются, как поперечные, под острым углом к поверхности земли (горизонту).

На рисунке 3 показано, как меняются длины ВВ за 10 дней до и 5 дней после землетрясений

в Узбекистане (а) и Киргизии (б), рассчитанные с помощью НВП.

Следует отметить, что в рассматриваемых случаях до землетрясений длины волн превышают 10 км, пока не наступает активизация процессов в литосфере. В обоих случаях длина волны начинает расти за 5 дней, достигает максимальной величины за 2 дня до землетрясений и резко падает до фоновых величин за сутки перед событиями. При этом после землетрясений наблюдается повторный рост длин волн, связанный, может быть, с последующими процессами, например, с афтершоками. При этом на рисунке (а) наблюдается интересная картина. Мы видим, что до зафиксированного землетрясения в Узбекистане 26 мая, подобная картина наблюдалась в ходе длины волны и до этого, то есть в наблюдаемой ВВ с длиной волны более 12 км 20 мая наблюдается такой же рост, что и при землетрясении 26 мая. Можно предположить, что задолго до 26 мая аналогичный процесс происходил в литосфере, но не был зафиксирован сейсмографическими приборами.

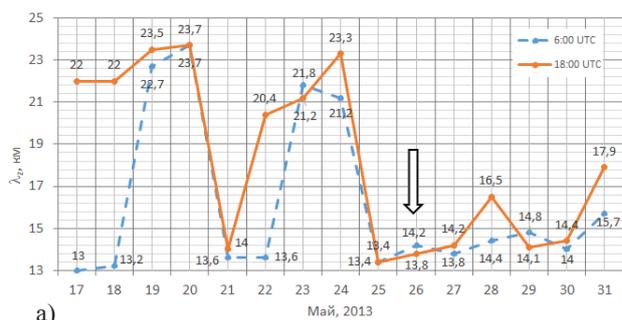


Рисунок 3 – Дневной и ночной ход вертикальной длины волны ВВ за 10 дней до и 5 дней после землетрясений в Узбекистане (а) и в Киргизии (б)

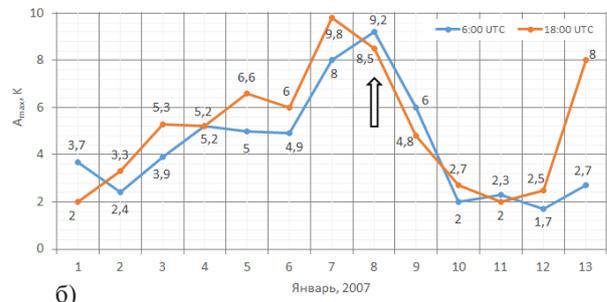
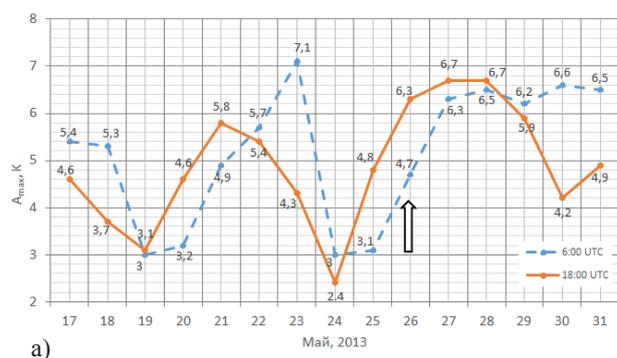


Рисунок 4 – Дневной и ночной ход максимальной амплитуды ВВ за 10 дней до и 5 дней после землетрясений в Узбекистане (а) и в Киргизии (б)

В [28] также отмечено, что амплитуды волн могут вырасти до мезосферных высот, а разрыв или диссипация волн имеет тенденцию происходить только по мере приближения к критическим уровням энергии и импульса.

На рисунке 4 видно, что амплитуды волн, связанные с флуктуациями, начинают расти за два дня до землетрясения в обоих случаях. При этом рост амплитуды достигает максимума в момент землетрясения и составляет 3.7 К ночью, и 5.1 К днем в первом случае, и 7.8 К ночью и 7.2 К днем – во втором. После землетрясения амплитуды резко падают до своих минимальных значений.

Заключение. Установлено, что в сейсмически активных регионах существуют благоприятные возможности для преимущественной генерации ВГВ, которые можно рассматривать в качестве механизма литосферно-атмосферных связей. Для выявления ВГВ использованы измерения высотных профилей температуры с помощью спутников. Идентификация наблюдаемых флуктуаций температуры как индуцированной волны проведена по критерию идентификации волны – относительной пороговой амплитуде.

Проверка метода на двух произошедших землетрясениях в регионе Центральной Азии показала, что длины волн, превышающие, как правило, 10 км до землетрясений, начинают расти за 5 дней, достигают максимальных величин за 2 дня до землетрясений и резко падают до фоновых величин за сутки перед землетрясениями.

Амплитуды волн растут до высот стратосфер, затем происходит разрыв или диссипация волн. При этом амплитуды волн, связанные с флуктуациями, начинают расти за два дня до землетрясения в обоих случаях, и достигают максимума в момент землетрясения и резко падают до своих минимальных значений после землетрясений. Величины роста амплитуд видимо зависят от мощности землетрясений.

Таким образом, методика может быть применена для идентификации ВГВ, источником которых являются сейсмически активные регионы, а характеристики ВВ – для оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

Литература

1. Scholz C.H. Earthquake prediction: A physical basis / C.H. Scholz, L.R. Sykes, Y.P. Aggarwal // Science. 1973. № 4102. P. 803–810.
2. Cicerone R.D. A systematic compilation of earthquake precursors / R.D. Cicerone, J.E. Ebel, J. Britton // Tectonophysics. 2009. V. 476. № 3. P. 371–396.
3. Уткин В.И. Радон и проблема тектонических землетрясений / В.И. Уткин // Соровский образовательный журнал. 2000. Том 6. №12. С. 64–70.
4. Липеровский В.А. Физические модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями / В.А. Липеровский, О.А. Похотелов, К.В. Мейстер, Е.В. Липеровская // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 6. С. 831–843.
5. Ouzounov D. Pre-Earthquake Processes. A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies / D. Ouzounov, S. Pulnits, K. Hattori, P. Taylor. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2018. 384 p.
6. Giuliani G.G. Radon observations by Gamma Detectors “PM'4 and PM'2” during the seismic period (January–April 2009) in L'Aquila Basin / G.G. Giuliani, R. Giuliani, G. Totani, G. Eusani, F. Totani // Abstr. V.1. P.03. AGU Fall Meeting, San Francisco, December 14–18. ID#U14A-03. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFM.U14A..03G>. 2009.
7. Dobrovolsky I.P. Estimation of the size of earthquake preparation zones / I.P. Dobrovolsky, S.I. Zubkov, V.I. Myachkin // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. № 5. P. 1025–1044.
8. Papadopoulos G.A. Real-Time Seismicity Evaluation for Operational Earthquake Forecasting: Recent Experiences from Italy and Greece / G.A. Papadopoulos // Lecture at Chapman University. Dec., 2009. Orange, CA. 2009.
9. Госсард Э.Э. Волны в атмосфере. Инфразвук и гравитационные волны в атмосфере – их возникновение и распространение / Э.Э. Госсард, У.Х. Хук. М.: Мир, 1979. 532 с.
10. Plastino W. Uranium groundwater anomalies and L'Aquila earthquake, 6th April 2009 (Italy) / W. Plastino, P. Povinac, G. De Luca, C. Doglioni, S. Nisi, L. Ioannucci, M. Balata, M. Laubenstein, F. Bella, E. Coccia // J. Environ. Radioactiv. 2010. V. 101. № 1. P. 45–50.
11. Bonfanti P. Evidence of CO₂-gas emission variations in the central Apennines (Italy) during the L'Aquila seismic sequence (March-April 2009) /

- P. Bonfanti, N. Genzano, J. Heinicke, F. Italiano, G. Martinelli, N. Pergola, L. Telesca, V. Tramutoli // *B. Geofis. Teor. Appl.* 2012. V. 53. № 1. P. 147–168.
12. Pergola N. Using RST approach and EOS/MODIS radiances for monitoring seismically active regions: a study on the 6 April 2009 Abruzzo earthquake / N. Pergola, C. Aliano, I. Coviello, C. Filizzola, N. Genzano, T. Lacava, M. Lisi, G. Mazzeo, V. Tramutoli // *Nat. Hazard. Earth Syst.* 2010. V. 10. № 2. P. 239–249. doi:10.5194/nhess-10-239-2010.
 13. Rozhnoi A. Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M = 6.3) on 6 April 2009 / A. Rozhnoi, M. Solovieva, O. Molchanov, K. Schwingenschuh, M. Boudjada, P.F. Biagi, T. Maggipinto, L. Castellana, A. Ermini, M. Hayakawa // *Nat. Hazard. Earth Syst.* 2009. V. 9. № 5. P. 1727–1732.
 14. Anagnostopoulos G.C. Characteristics of flux-time profiles, temporal evolution, and spatial distribution of radiation-belt electron precipitation bursts in the upper ionosphere before great and giant earthquakes / G.C. Anagnostopoulos, E. Vassiliadis, S. Pulinetis // *Ann. Geophysicae.* 2012. V. 55. № 1. P. 21–36.
 15. Давиденко Д.В. Диагностика ионосферных возмущений над сейсмоопасными регионами / Д.В. Давиденко: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Изд-во ФГБУ “ИПП”, 2013. 26 с.
 16. Линьков Г.М. Сейсмогравитационные колебания Земли и связанные с ними возмущения атмосферы / Г.М. Линьков, Л.Н. Петрова, Д.Д. Зурошвили // *ДАН СССР.* 1989. 306 (2). С. 315–317.
 17. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // *Оптика атмосферы и океана* / В.Б. Кашкин. 2013. 26. № 10.
 18. Гохберг М.Б. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование / М.Б. Гохберг, С.Л. Шалимов // *Российский журнал наук о Земле.* 2000. Апрель. Т. 2. № 2. С. 95–108.
 19. Шалимов С.Л. О влиянии длиннопериодных колебаний Земли на верхнюю атмосферу / С.Л. Шалимов // *Изв. РАН. Физика Земли.* 1992. (7). С. 89–95.
 20. Горный В.И. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности / В.И. Горный, А.Г. Сальман, А.А. Тронин, Б.В. Шилин // *ДАН СССР.* 1988. 301 (1). С. 67–69.
 21. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы / Б.Н. Гершман. М.: Наука, 1974.
 22. Гохберг М. Б. О влиянии нестабильного выхода парниковых газов в сейсмически активном регионе на ионосферу / М.Б. Гохберг, А.К. Некрасов, С.Л. Шалимов // *Физика Земли.* 1996. (8). С. 52–55.
 23. Войтов Г.И. Химические и изотопно-углеродные нестабильности потоков природных газов в сейсмически активных регионах / Г.И. Войтов, И.П. Добровольский // *Физика Земли.* 1994. (3). С. 20–31, .
 24. Голицын Г.С., Чунчузов Е.П. Акустико-гравитационные волны в атмосфере / Г.С. Голицын, Е.П. Чунчузов // *Полярные сияния и свечение ночного неба.* 1975. № 23. М.: Наука. С. 5–21.
 25. Чунчузов Е.П. Об интерпретации экспериментальных данных о внутренних гравитационных волнах в верхней атмосфере / Е.П. Чунчузов // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1977. № 11. С. 1202–1203.
 26. Коршунов В.А. Определение параметров волновых возмущений средней атмосферы по данным лидарных измерений / В.А. Коршунов // *Оптика атмосферы и океана.* 2015. Vol. 28. № 11. С. 993–1002.
 27. Gubenko V.N. Determination of the intrinsic frequency and other wave parameters from a single vertical temperature or density profile measurement / V.N. Gubenko, A.G. Pavelyev and V.E. Andreev // *Journal of Geophysical Research.* 2008. Vol. 113.
 28. Fritts D.C. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere / D.C. Fritts and M. J. Alexander // *Rev. Geophys.* 2003. 41(1), 1–64, 1003.
 29. URL: https://giovanny.gsfc.nasa.gov/giovanny/#service=Vt&=MA13CPASmV5_2_0
 30. Gao X. Rayleigh lidar measurements of the temporal frequency and vertical wavenumber spectra in the mesosphere over Rocky Mountain region / X. Gao, J.W. Meriwether, V.B. Wickwar, T.D. Wilkerson, S. Collins // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103. N 6. P. 6405–6416.
 31. Whiteway J.A. Lidar observations of gravity wave activity in the upper stratosphere over Toronto / J.A. Whiteway, A.I. Carswell // *J. Geophys. Res. D.* 1995. V. 100. N 7. P. 14113–14124.
 32. Marsh K.P. Lidar studies of stratospheric gravity wave spectra / K.P. Marsh, N.J. Mitchell, L. Thomas // *Planet. Space Sci.* 1991. V. 39. N 11. P. 1541–1548.
 33. Sato K. Vertical structure of stratospheric gravity waves revealed by the wavelet analyses / K. Sato, M. Yamada // *J. Geophys. Res. D.* 1994. V. 99. N 10. P. 20623–20631.
 34. Alexander M.J. Gravity Waves in the Stratosphere / M.J. Alexander // *The Stratosphere: Dynamics, Chemistry, and Transport* / ed. by L.M. Polvani,

- A. Sobel, D.W. Waugh: *Geophys. Monogr. Ser.* 2010. V. 190. Ch. 5. P. 109–121.
35. *Torrence C. A Practical Guide to Wavelet Analysis / C. Torrence and G.P. Compo // Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1998. V. 79. N. 1. P. 61–78.
36. *Кальметьева З.А. Атлас землетрясений Кыргызстана / З.А. Кальметьева, А.В. Миколайчук, Б.Д. Молдобеков, А.В. Мелешко, М.М. Жантаев и А.В. Зубович. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009.*
37. *Marquardt C. Measurement noise and stratospheric gravity wave characteristics obtained from GPS occultation data / C. Marquardt and S.V. Healy // J. Meteorol. Soc.* 2005. Jpn., 83(3), 417–428.
38. *Fritts D.C. Gravity wave saturation in the middle atmosphere: A review of theory and observations / D.C. Fritts // Rev. Geophys. Space Phys.* 1984. 22, 275–308.
39. *Fritts D.C. Convective and dynamical instabilities due to gravity motions in the lower and middle atmosphere: Theory and observations / D.C. Fritts, and P.K. Rastogi // Radio Sci.* 1985. 20(6), 1247–1277.
40. *Holton J.R. Forcing of secondary waves by breaking of gravity waves in the mesosphere / J.R. Holton, G.L. Millendore, X. Zhou // J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. NO. D7, 10.