

УДК 550.343.62

ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Академик РАН В. В. Адушкин^{1,2}, В. И. Нифадьев³, Б. Б. Чен³, С. И. Попель^{4,5,*},
Г. А. Когай³, А. Ю. Дубинский⁴, П. Г. Вайдлер (P. G. Weidler)⁶

Поступило 15.01.2019 г.

По материалам экспериментальных исследований волновых возмущений в атмосфере Земли до и после землетрясений в Узбекистане 26 мая 2013 г. и в Киргизии 8 января 2007 г. выявлены ранее неизвестные изменения в параметрах внутренних гравитационных волн в течение 5 суток до землетрясения, которые в некоторых случаях могут использоваться для краткосрочной оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

Ключевые слова: землетрясения, краткосрочный прогноз, внутренние гравитационные волны, возмущения температуры, Центральная Азия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873299-303>

Краткосрочный прогноз землетрясений, основанный на физических предвестниках [1], связан с регистрацией различных аномалий и проявлений геофизических процессов в сейсмически активных регионах. Одним из возможных проявлений оказывается генерация внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере над такими регионами. Так, например, в [2] описаны обнаруженные методом пассивной космической локализации ВГВ в интервале высот от поверхности до границы тропопаузы. В качестве причин возникновения ВГВ названы сейсмическая активность, взрывы, метеорологические явления. Рассмотрение гипотез по интерпретации наблюдений за ионосферой сейсмически активных регионов позволяет заключить [3], что фактически ни электромагнитная, ни инфразвуковая гипотезы не способны описать весь комплекс экспериментальных результатов. Поэтому привлечение к анализу этих результатов параметров ВГВ может существенно повысить качество интерпретации проводимых измерений.

Именно в сейсмически активных регионах существуют благоприятные возможности для преимущественной генерации ВГВ. Действительно [4] постоянно возникающие в земной коре глобальные колебания, вызванные так называемыми сейсмогравитационными волнами, способны генерировать ВГВ [5]. Сейсмогравитационные волны оказываются более интенсивными за несколько дней перед сильными землетрясениями [4]. Таким образом, перед такими землетрясениями можно ожидать и генерации ВГВ повышенной интенсивности. Далее существующие аномалии потока уходящего от Земли инфракрасного излучения становятся механизмом преимущественной генерации ВГВ в сейсмически активных регионах непосредственно перед землетрясениями [6]. Как правило, в месте пересечения разломов возникают аномалии нестационарных тепловых потоков, имеющие время жизни на уровне 2–10 дней и площадь порядка 10^4 м²; и они могут быть связаны с интенсификацией дегазации литосферных газов (СН₄, СО₂) перед землетрясениями. В результате эти нестабильные тепловые аномалии могут рассматриваться как источники ВГВ [5–8]. Перед землетрясением наблюдается [9] изменение динамики выхода литосферных газов за счёт повышенной проницаемости разломных зон сейсмически активных регионов. Этот нестационарный приток массы литосферных газов в периоды подготовки тектонических землетрясений создаёт в приземной атмосфере аномальные эффекты в виде сверхфоновых концентраций отдельных газов, преимущественно углеродистых: СО₂, СН₄ и их гомологов. Особенностью динамики выхода газов является нестационарность дегазации. Низкочастотная не-

¹ Институт динамики геосфер
Российской Академии наук, Москва

² Московский физико-технический институт
(государственный университет),
Долгопрудный Московской обл.

³ Кыргызско-Российский Славянский университет
им. Б.Н. Ельцина, Бишкек, Кыргызстан

⁴ Институт космических исследований
Российской Академии наук, Москва

⁵ Национальный исследовательский университет
“Высшая школа экономики”, Москва

⁶ Karlsruhe Institute of Technology, Germany

*E-mail: popel@iki.rssi.ru

стационарность притока литосферных газов в приземную атмосферу в периоды подготовки землетрясений сопровождается их сверхфоновыми концентрациями. Таким образом, в сейсмически активных регионах существуют благоприятные возможности для преимущественной генерации ВГВ. На стадии подготовки землетрясения сами волны могут генерироваться в таких регионах преимущественно в результате выхода литосферных газов в приземную атмосферу [3]. В настоящей работе используется методика измерения высотных профилей температуры с помощью спутников с целью выявления ранее неизвестных изменений в параметрах ВГВ, связанных с землетрясениями, которые могли бы использоваться для краткосрочной оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

Для идентификации ВГВ, связанных с источником в сейсмически активных регионах, обработке подвергались данные спутниковых измерений температуры средней атмосферы, доступные в системе GIOVANNY [10]. Вертикальные профили температуры были восстановлены в течение суток через каждые 3 часа по данным температуры на изобарических поверхностях от 1000 до 0,1 гектопаскалей над участками с пространственным разрешением $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ [10]. Для определения параметров волновых возмущений использовалось непрерывное комплексное вейвлет-преобразование типа Морле 6-го порядка [6]. Численные расчёты выполнялись в соответствии с алгоритмом, приведённым в [11]. Для информации о сейсмических событиях использовались данные Института сейсмологии НАН КР.

Рассматривались землетрясения в Узбекистане (в 19 км от Булунгура с координатами $39,956^\circ$ с.ш., $67,314^\circ$ в.д.) 26 мая 2013 г. в 06:08:15,9 UTC на глубине 18 км с $M = 5,7$, а также в Киргизии 8 января 2007 г. в 17:21:49,9 UTC с координатами $39,803^\circ$ с.ш., $70,312^\circ$ в.д. на глубине 16 км с $M = 6$. Соответственно использовались спутниковые извлечения температурных профилей в 06:00 UTC (дневной) и 18:00 UTC (ночной) сроки наблюдений над местом наблюдения — территорией высокогорного лидарного комплекса Теплоключенка КРСУ в Центральном Тянь-Шане. Случайная погрешность температуры составляла $\delta T = 1,0$ К, а вертикальное разрешение — $\delta h = 200$ м.

Выделение вариаций температуры с помощью сглаживающего сплайна проводилось как для единичного измерения профиля температуры, так и для измерений в течение суток. Выявление возмущений температуры по результатам наблюдений индуцированной волны проведено по экспериментальному

значению относительной пороговой амплитуды a_e . В этом случае наблюдаемые возмущения температуры в нижней стратосфере могут быть связаны с ВГВ, если значение относительной пороговой амплитуды a_e подчиняется соотношению [11, 12]

$$1 > a = a_e > 0, \quad (1)$$

которое является необходимым и достаточным условием для идентификации ВГВ. Таким образом, если значение a_e удовлетворяет условию (1), то можно предположить, что наблюдаемые возмущения температуры связаны с распространяющейся волной. В противном случае, когда $a_e > 1$, наблюдаемые вариации могут быть связаны, например, с турбулентностью [12]. Сами величины относительного порогового значения амплитуды a_e рассчитывались по выражению [11]

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

где $|T'|/\bar{T}$ — относительная амплитуда температурных возмущений, N^2 — квадрат частоты Брента—Вяйсяля, f и ω — инерциальная (Кориолисова) и внутренняя частоты соответственно, λ_z — вертикальная длина волны. Параметры в правой части могут быть восстановлены из измерений температуры.

На рис. 1 приведены примеры высотной зависимости возмущений температуры в дни землетрясений в Узбекистане (а) и Киргизии (б). Расчёт вертикальных длин волн осуществлялся посредством вейвлет-анализа (типа Морле 6-го порядка) единичных профилей температуры. На рис. 2 представлены соответственно вейвлет-спектры экспериментальных профилей возмущений температуры. Максимумам спектров профилей, приведённых на рис. 1а и 1б, соответствуют длины волн $\lambda_z = 14,2$ км и 18,9 км. Отметим, что наиболее интенсивные гармоники имеют вертикальные длины волн, большие 10 км. Известно [13], что гравитационные волны с вертикальными длинами волн более 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, [14]).

Внутренние гравитационные волны, достигая мезосферы, могут разрушаться, что приводит к локальному нагреву и движениям воздуха. При этом возможна генерация вторичных ВГВ, которые распространяются вверх и вниз из мезосферы, попадая

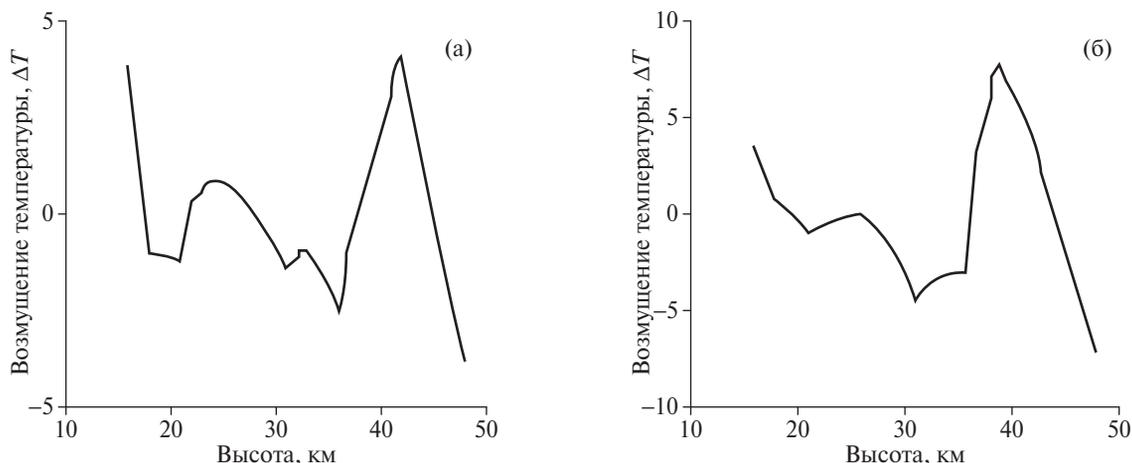


Рис. 1. Примеры высотной зависимости возмущений температуры 26 мая 2013 г. в 6:00 UTC (а) и 8 января 2007 г. в 6:00 UTC (б).

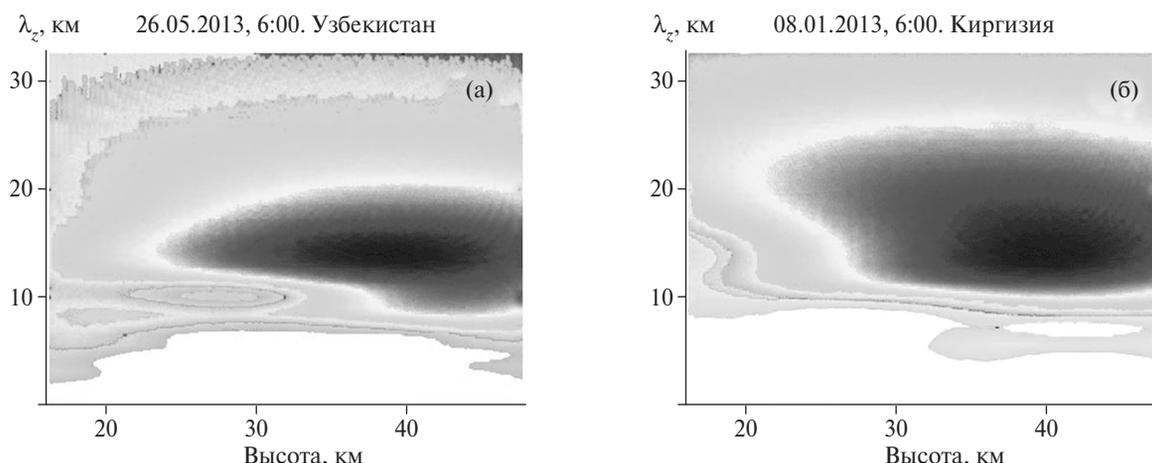


Рис. 2. Вейвлет-спектры экспериментальных профилей возмущений температуры 26 мая 2013 г. в 6:00 UTC (а) и 8 января 2007 г. в 6:00 UTC (б). Наиболее интенсивные гармоники выделены тёмным цветом.

в том числе и в стратосферу. Данный факт подтверждается экспериментальными результатами, полученными в рамках настоящего исследования. В работе рассматривается диапазон стратосферных высот от 16 до 48 км, хотя имеются измерения температуры вплоть до 63 км.

Иллюстрацией изменений характерных длин волн волновых возмущений в течение нескольких дней до и после землетрясений в Узбекистане и Киргизии служат данные, представленные в табл. 1. Для получения этих данных использовалось непрерывное комплексное вейвлет-преобразование. Вычислялись значения λ_z , соответствующие максимумам спектров профилей возмущений температуры.

Отметим, что в рассматриваемых ситуациях длины волн λ_z , как правило, превышают 10 км, что указывает на связь ВГВ [13] с глубоким конвективным нагревом (во всяком случае в течение 5 дней до землетрясения). Далее в трёх ситуациях (выде-

лены полужирным шрифтом в табл. 1) из четырёх, соответствующих измерениям в 6:00 UTC и в 18:00 UTC в мае 2013 г. и в 18:00 UTC в январе 2007 г., длина волны λ_z начинает расти за 4–5 дней, достигает максимальной величины за 2 дня до землетрясения и резко падает до фоновых величин за сутки перед событием. При этом после землетрясений наблюдается повторный рост длин волн, связанный, возможно, с афтершоками.

В табл. 2 представлена эволюция максимальной амплитуды ΔT_{\max} волновых возмущений до и после рассматриваемых землетрясений. Из этой таблицы видно, что амплитуды волн, связанные с вариациями температуры, растут в течение двух дней до землетрясения во всех ситуациях (выделены полужирным шрифтом в табл. 2). Затем ход амплитуд может быть довольно сложным, но за три-четыре дня после землетрясений в трёх ситуациях из четырёх, соответствующих измерениям в 18:00

Таблица 1. Дневные и ночные значения λ_z до и после землетрясений в Узбекистане 26 мая 2013 г. и в Киргизии 8 января 2007 г. Серым выделены строки, соответствующие дням землетрясений

| λ_z , км | | | λ_z , км | | |
|------------------|-------------|-------------|------------------|----------|-------------|
| Дата | 6:00 UTC | 18:00 UTC | Дата | 6:00 UTC | 18:00 UTC |
| 17.05.2013 | 13,0 | 22,0 | 01.01.2007 | 18,8 | 19,6 |
| 18.05.2013 | 13,2 | 22,0 | 02.01.2007 | 18,1 | 9,7 |
| 19.05.2013 | 22,7 | 23,5 | 03.01.2007 | 15,9 | 13,8 |
| 20.05.2013 | 23,7 | 23,7 | 04.01.2007 | 14,4 | 13,6 |
| 21.05.2013 | 13,6 | 14,0 | 05.01.2007 | 14,5 | 14,0 |
| 22.05.2013 | 13,6 | 20,4 | 06.01.2007 | 13,2 | 16,7 |
| 23.05.2013 | 21,8 | 21,2 | 07.01.2007 | 13,8 | 14,0 |
| 24.05.2013 | 21,2 | 23,3 | 08.01.2007 | 18,9 | 13,2 |
| 25.05.2013 | 13,4 | 13,4 | 09.01.2007 | 20,4 | 21,0 |
| 26.05.2013 | 14,2 | 13,8 | 10.01.2007 | 20,8 | 22,0 |
| 27.05.2013 | 13,8 | 14,2 | 11.01.2007 | 22,9 | 20,8 |
| 28.05.2013 | 14,4 | 16,5 | 12.01.2007 | 24,5 | 23,3 |
| 29.05.2013 | 14,8 | 14,1 | 13.01.2007 | 24,9 | 18,1 |
| 30.05.2013 | 14,0 | 14,4 | | | |
| 31.05.2013 | 15,7 | 17,9 | | | |

UTC в мае 2013 г. и в 6:00 UTC и в 18:00 UTC в январе 2007 г., амплитуды падают до своих минимальных (после землетрясения) значений (выделены полужирным курсивным шрифтом в табл. 2). Амплитуды волн растут до высот стратопаузы, затем [13] происходит диссипация волн. Интенсивность

Таблица 2. Дневные и ночные значения максимальных амплитуд волновых возмущений до и после землетрясений в Узбекистане 26 мая 2013 г. и в Киргизии 8 января 2007 г. Серым выделены строки, соответствующие дням землетрясений

| ΔT_{\max} , К | | | ΔT_{\max} , К | | |
|-----------------------|------------|------------|-----------------------|------------|------------|
| Дата | 6:00 UTC | 18:00 UTC | Дата | 6:00 UTC | 18:00 UTC |
| 17.05.2013 | 5,4 | 4,6 | 01.01.2007 | 3,7 | 2,0 |
| 18.05.2013 | 5,3 | 3,7 | 02.01.2007 | 2,4 | 3,3 |
| 19.05.2013 | 3,0 | 3,1 | 03.01.2007 | 3,9 | 5,3 |
| 20.05.2013 | 3,2 | 4,6 | 04.01.2007 | 5,2 | 5,2 |
| 21.05.2013 | 4,9 | 5,8 | 05.01.2007 | 5,0 | 6,6 |
| 22.05.2013 | 5,7 | 5,4 | 06.01.2007 | 4,9 | 6,0 |
| 23.05.2013 | 7,1 | 4,3 | 07.01.2007 | 8,0 | 9,8 |
| 24.05.2013 | 3,0 | 2,4 | 08.01.2007 | 9,2 | 8,5 |
| 25.05.2013 | 3,1 | 4,8 | 09.01.2007 | 6,0 | 4,8 |
| 26.05.2013 | 4,7 | 6,3 | 10.01.2007 | 2,0 | 2,7 |
| 27.05.2013 | 6,3 | 6,7 | 11.01.2007 | 2,3 | 2,3 |
| 28.05.2013 | 6,5 | 6,7 | 12.01.2007 | 1,7 | 2,5 |
| 29.05.2013 | 6,2 | 5,9 | 13.01.2007 | 2,7 | 8,0 |
| 30.05.2013 | 6,6 | 4,2 | | | |
| 31.05.2013 | 6,5 | 4,9 | | | |

роста амплитуд, по-видимому, зависит от интенсивности землетрясений.

Схожая специфика поведения характерных длин волн и амплитуд ВГВ до и после землетрясения наблюдается и для других событий, данные о которых имеются в распоряжении авторов статьи. Для примера в табл. 3 представлены имеющиеся данные по землетрясению, произошедшему в Казахстане (в 60 км на юго-восток от Кегеня с координатами 42,605° с.ш., 79,708° в.д.) 28 января 2013 г. в 16:38:53 UTC.

Ошибка определения λ_z и ΔT_{\max} во всех рассмотренных ситуациях заведомо не превосходит 0,1 км и 0,1 К соответственно. Следовательно, выявлены достоверные тенденции параметров ВГВ до и после землетрясений, проявившиеся в большинстве рассмотренных случаев. Вместе с тем для адекватного понимания имеющихся тенденций, определения возможной ошибки идентификации ВГВ, источником которых являются сейсмически активные регионы, а также оценки влияния расстояния от места события до места наблюдения ВГВ следует тщательно исследовать механизм генерации ВГВ в сейсмически активных регионах. Данное исследование предполагается провести в будущем.

Таким образом, в сейсмически активных регионах существуют благоприятные возможности для преимущественной генерации ВГВ. Для выявления ВГВ использованы измерения высотных профилей температуры с помощью спутников. Идентификация наблюдаемых вариаций температуры как индуцированной волны проведена согласно критерию (1), связанному с определением относительной поро-

Таблица 3. Дневные (6:00 UTC) значения λ_z и ΔT_{\max} до и после землетрясения в Казахстане 28 января 2013 г. Серым выделены строки, соответствующие дням землетрясений

| Дата | λ_z , км | ΔT_{\max} , К |
|------------|------------------|-----------------------|
| 19.01.2013 | 13,4 | 5,7 |
| 20.01.2013 | 15,2 | 3,9 |
| 21.01.2013 | 12,0 | 1,7 |
| 22.01.2013 | 13,8 | 2,5 |
| 23.01.2013 | 9,0 | 1,3 |
| 24.01.2013 | 14,4 | 3,2 |
| 25.01.2013 | 14,6 | 3,9 |
| 26.01.2013 | 10,0 | 3,1 |
| 27.01.2013 | 17,3 | 6,9 |
| 28.01.2013 | 16,5 | 13,8 |
| 29.01.2013 | 16,6 | 8,6 |
| 30.01.2013 | 15,8 | 8,3 |
| 31.01.2013 | 13,4 | 7,5 |
| 01.02.2013 | 14,2 | 5,9 |

вой амплитуды. В рассматриваемых ситуациях вертикальные длины волн ВГВ, как правило, превышают 10 км, что указывает на связь этих волн с глубоким конвективным нагревом. На примере рассмотрения волновых возмущений до и после землетрясений в Узбекистане 26 мая 2013 г. и в Киргизии 8 января 2007 г. выявлена специфика поведения характерных длин волн и амплитуд ВГВ в течение 5 дней до землетрясения (подтверждающаяся и другими данными, например по землетрясению в Казахстане 28 января 2013 г.), которая может использоваться для идентификации ВГВ, источником которых являются сейсмически активные регионы, а в некоторых случаях и для краткосрочной оценки времени наступления предстоящих сейсмических событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ouzounov D., Pulinets S., Hattori K., Taylor P.* Pre-Earthquake Processes. A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies. Hoboken: Wiley, 2018. 384 p.
2. *Кашкин В.Б.* // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.
3. *Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 2. С. 95–108.
4. *Линьков Г.М., Петрова Л.Н., Зурошвили Д.Д.* // ДАН. 1989. Т. 306. № 2. С. 315–317.
5. *Шалимов С.Л.* Атмосферные волны в плазме ионосферы (с геофизическими примерами). М.: ИФЗ РАН, 2018.
6. *Torrence C., Compo G.P.* // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1998. V. 79. № 1. P. 61–78.
7. *Гершман Б.Н.* Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974.
8. *Гохберг М.Б., Некрасов А.К., Шалимов С.Л.* // Физика Земли. 1996. № 8. С. 52–55.
9. *Войтов Г.И., Добровольский И.П.* // Физика Земли. 1994. № 3. С. 20–31.
10. https://giovanny.gsfc.nasa.gov/giovanny/#service=Vt&=MA13CPASmv5_2_0
11. *Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Andreev V.E.* // J. Geophys Res. 2008. V. 113. P. D08109. 9 p.
12. *Marquardt C., Healy S.B.* // J. Meteorol. Soc. Jpn. 2005. V. 83. № 3. P. 417–428.
13. *Fritts D.C., Alexander M.J.* // Rev. Geophys. 2003. V. 41. № 1. P. 1003. 64 p.
14. *Fritts D.C.* // Rev. Geophys. Space Phys. 1984. V. 22. P. 275–308.

VARIATIONS OF THE PARAMETERS OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN THE ATMOSPHERE OF CENTRAL ASIA BEFORE EARTHQUAKES

Academician of the RAS V. V. Adushkin^{1,2}, V. I. Nifadiev³, B. B. Chen³,
S. I. Popel^{4,5}, G. A. Kogai³, A. Yu. Dubinskii⁴, P. G. Weidler⁶

¹*Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow Region, Dolgoprudnyi, Russian Federation*

³*Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan*

⁴*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

⁵*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation*

⁶*Karlsruhe Institute of Technology, Eggenstein-Leopoldshafen, D-76344, Germany*

Received January 15, 2019

Based on the data of experimental studies of wave disturbances in the Earth's atmosphere before and after the earthquakes in Uzbekistan (May 26, 2013) and Kyrgyzstan (January 8, 2007), earlier unknown changes in the parameters of internal gravity waves are revealed. These changes were manifested during the period of five days before the earthquake and in certain cases can be used for short-term prediction of the time when seismic events are to occur.

Keywords: earthquakes, short-term forecast, internal gravity waves, temperature perturbations, Central Asia.