

УДК 551.511/ 31: 550.34 (5)

**ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СТРАТОСФЕРЕ
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РЕГИОНАХ АЗИИ**

Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев

На основе данных спутникового дистанционного зондирования проведено экспериментальное исследование пространственно-временной структуры и динамики волновых процессов в стратосфере, которые наблюдаются перед сильными землетрясениями в Азии. Приведена оценка параметров периодических компонентов температуры стратосферы, выделены локализованные в пространстве и во времени преобладающие по амплитуде колебания, а также определены их энергетические спектры. Вариации температуры стратосферы, синхронизированные с фазой подготовки землетрясений, имеют связь с акустико-гравитационными волнами (АГВ). Полученные результаты свидетельствуют о том, что наиболее вероятным источником этих флуктуаций могут быть землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение; спутниковые данные; стратосфера; вертикальный профиль температуры; градиент; акустико-гравитационные волны; плотность потенциальной энергии.

**АЗИЯ ЧӨЛКӨМҮНДӨГҮ КҮЧТҮҮ ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨР АЛДЫНДА
СТРАТОСФЕРАДАГЫ ГРАВИТАЦИЯЛЫК ТОЛКУНДАР**

Спутниктик аралыктан изилдөөнүн маалыматтарынын негизинде Азиядагы күчтүү жер титирөөлөрдүн алдында байкалган стратосферадагы толкун процесстеринин мезгилдик-мейкиндик түзүмүн жана динамикасын эксперименталдык изилдөө жүргүзүлдү. Стратосферанын температурасынын мезгилдик компоненттеринин параметрлерин баалоо көрсөтүлдү, амплитуда боюнча басымдуу жана убакыт жана мейкиндикте өз алдынча бөлүнгөн термелүүлөр табылды, жана алардын энергетикалык спектрлери аныкталды. Жер титирөөнүн даярдануу фазасы менен синхрондуу стратосферанын температурасынын вариацияларынын акустикалык-гравитациялык толкундар менен байланышы бар. Бул флуктуациялардын божомолдуу булагы катары жер титирөөлөр экенин алынган натыйжалар тастыктайт.

Түйүндүү сөздөр: жер титирөө; спутник маалыматтары; стратосфера; температуранын вертикалдык профили; градиент; акустикалык-гравитациялык толкундар; потенциалдык энергиянын тыгыздыгы.

**GRAVITATIONAL WAVES IN STRATOSPHERE
BEFORE STRONG EARTHQUAKES IN ASIA REGIONS**

L.G. Sverdlik, S.A. Imashev

Based on satellite remote sensing data, an experimental study of the spatial-temporal structure and dynamics of wave processes in stratosphere, which are observed before strong earthquakes in Asia, was carried out. The authors estimated parameters of periodic components of stratospheric temperature, revealed the oscillations prevailed by amplitude and localized in space and time and also determined their energy spectra. Temperature variations of stratosphere, synchronized with earthquakes preparation period are associated with acoustic-gravity waves (AGW). These results suggest that the most likely source of these fluctuations can be earthquakes.

Keywords: earthquake; satellite data; stratosphere; vertical temperature profile; gradient; acoustic-gravity waves; potential energy density.

Введение. Изучение взаимодействия геосфер Земли является одной из важнейших задач геофизики. Широкое применение для исследования природных явлений и динамических процессов, связанных с сейсмической активностью, получил в последние десятилетия спутниковый мониторинг возмущений в различных слоях атмосферы [1, 2]. При отсутствии единого мнения относительно физического механизма формирования сейсмогенных атмосферных эффектов, в ряде публикаций показано, что важная, если не ключевая роль в распространении возмущения от сейсмических источников в атмосферу отводится инфразвуковым колебаниям – акустико-гравитационным волнам (АГВ) [3, 4], которые образуются из-за плотностного расслоения воздуха по вертикали. При прохождении АГВ через границы раздела слоев атмосферы генерируются движущиеся в противофазе внутренние гравитационные волны (ВГВ) [5]. Распространяясь на большие расстояния, гравитационные волны оказывают существенное воздействие на динамику атмосферы, и их кумулятивные эффекты могут нарушить общую циркуляцию, а, соответственно, тепловую структуру атмосферы [6]. Так, результаты анализа данных спутниковых измерений температуры атмосферы [7] показали, что в разделенных тропопаузой слоях атмосферы, характеризующихся различным поведением градиента температуры, динамика флуктуаций температуры имеет достаточно устойчивую связь с сейсмичностью. Вместе с тем, перед сильными землетрясениями были обнаружены проявления аномального поведения температуры в слоях средней атмосферы (стратосфере и мезосфере). Их особенностью является волновая структура вариаций. При изучении и идентификации волновых процессов очевидна необходимость определения параметров периодических компонентов, выделение преобладающих по амплитуде колебаний, их локализации в пространстве и во времени, определение энергетического спектра и их связь с сейсмичностью.

Сейсмические и спутниковые данные. Набор сейсмических событий был сформирован на основе данных сети *KNET* [8] и интерактивного сервиса *IRIS* [9] из числа землетрясений с магнитудами $M > 4.5$ и $M > 6.5$, зарегистрированных в Северном Тянь-Шане и регионах Азии. Эпицентры всего множества произошедших и рассмотренных событий показаны на рисунке 1.

Временные серии температуры $T(t)$ с 3-часовым разрешением по времени ($\Delta t = 3h$) были восстановлены по данным спутниковых измерений на 28 изобарических уровнях от 600 до 0.1 *hPa* (~от 4.0 до 70 км) над каждым участком размером $\pm 1^\circ$ от эпицентров землетрясений. Продолжительность рядов составляла 2–3 месяца до и после событий [10].

Температурные возмущения в стратосфере. Как уже отмечалось ранее, возмущения термодинамического режима перед крупными землетрясениями не ограничиваются областью тропопаузы [11, 12], а, как правило, охватывают весь высотный диапазон от тропосферы до мезосферы (600–0.1 *hPa*). Как пример, на рисунке 2 показаны ночные профили температуры (450–0.3 *hPa*), измеренные за несколько дней до землетрясений в России и Кыргызстане.

Объединяющим все случаи признаком приближающегося землетрясения были наблюдаемые в стратосфере (от 50 до 3 *hPa*) волновые колебания с резкими изменениями температурного градиента ($\gamma = \Delta T/\Delta z$). Подобная вертикальная структура может интерпретироваться как проявление гравитационных волн в стратосфере [13], распространение которых, как считается, связывает верхнюю атмосферу с нижележащими слоями. Определенное различие температурных возмущений во времени и пространстве может быть вызвано изменением фазы гравитационных волн. Одним из наиболее важных параметров при изучении динамики термической стратификации атмосферы является вертикальный градиент температуры. Временные ряды градиента температуры на соответствующих

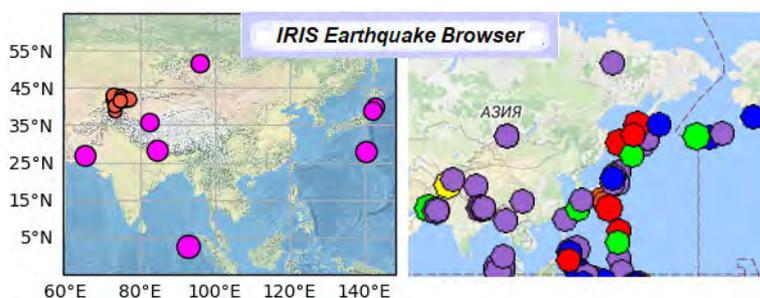


Рисунок 1 – Пространственное распределение эпицентров землетрясений ($M > 6.5$) в сейсмически активных регионах Азии

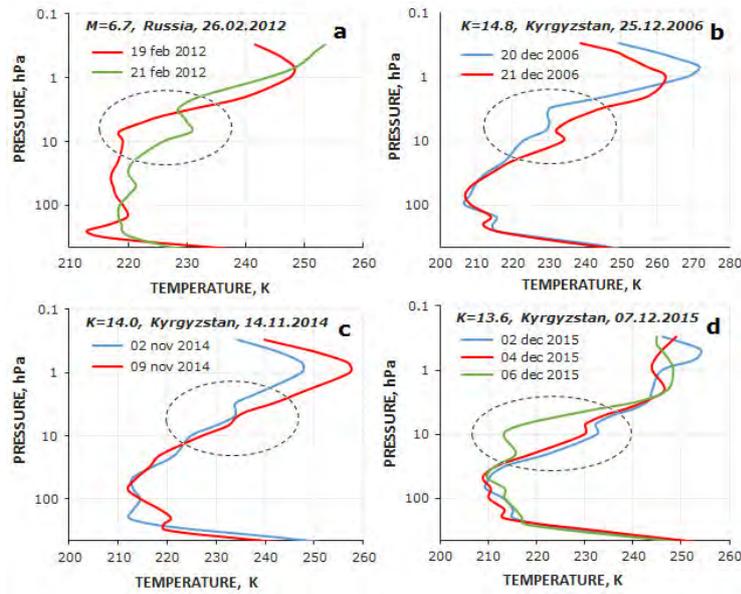


Рисунок 2 – Трансформация вертикальных профилей температуры в стратосфере перед сильными землетрясениями в России и Кыргызстане

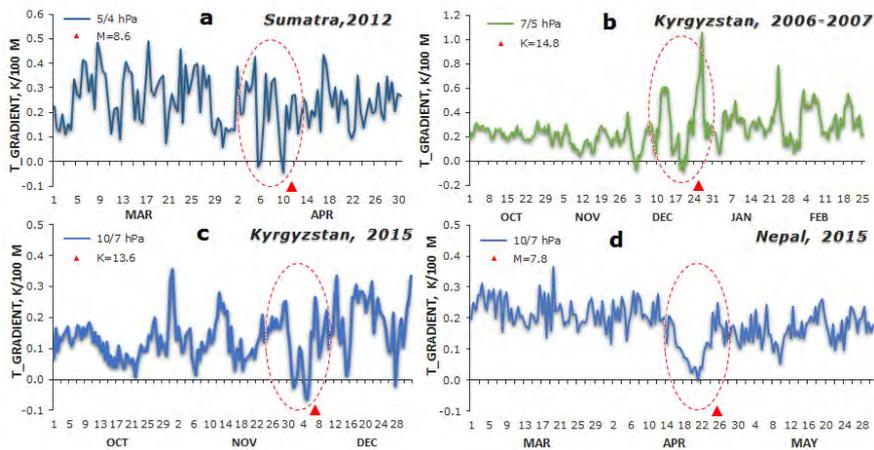


Рисунок 3 – Временные ряды вариаций вертикального градиента температуры ($\gamma = \Delta T/\Delta z$, K/100 m) в стратосфере между изобарическими уровнями от 10 до 4 hPa (a – Суматра; b, c – Кыргызстан; d – Непал)

стратосферных уровнях показали, что моменты смены знака $\gamma(t)$ являлись достаточно кратковременными, но, главное, были точно привязаны к сейсмическим ударам, предворяя их (рисунок 3).

В трехмерном представлении (рисунок 4) отчетливо проявляются значительные изменения поля градиента температуры в стратосфере перед главным сейсмическим событием в Непале ($M = 7.8$; 25.04.2015).

Как эти возмущения проявляются в вариациях температуры, показано на рисунке 5. Временная динамика отклонений ΔT от среднего профиля

на уровнях 20–10 hPa наглядно демонстрирует формирование накануне землетрясения и развитие волнового процесса с возрастающей амплитудой, который обрывается в момент сейсмического удара.

Смена фазы колебаний происходит, как показано на 7-дневном фрагменте (20–26 апреля 2015 г.) графика эволюции высотных профилей $\Delta T(h)$ перед землетрясением $M=7.8$ в Непале 25 апреля 2015 г. (рисунок 6, а). Профиль, соответствующий моменту землетрясения, выделен красным цветом.

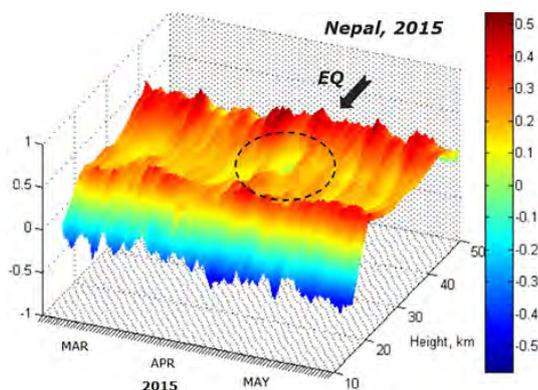


Рисунок 4 – Пространственное распределение вертикального градиента температуры ($\gamma = \Delta T / \Delta z$, K/100 m) в стратосфере (Непал, $M = 7.8$, 25.04.2015)

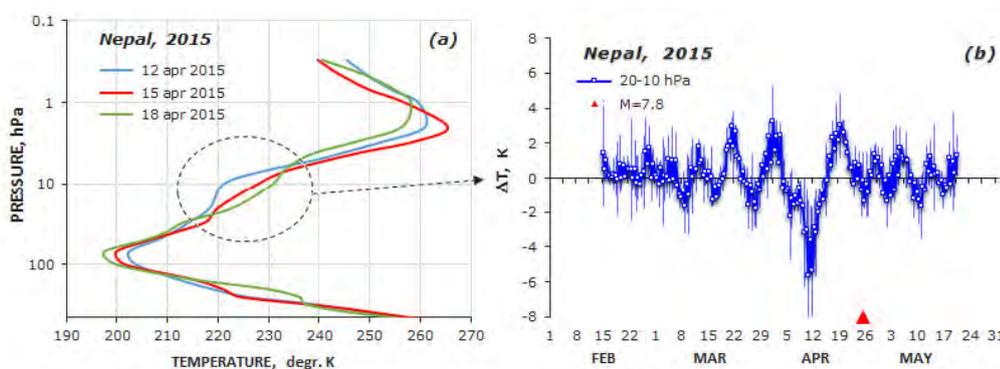


Рисунок 5 – Изменения профилей температуры на уровнях 450–0.3 hPa (a), временная динамика ΔT на уровнях 20–10 hPa (b). Непал, февраль–май 2015

Ограниченное вертикальное разрешение спутниковых измерений не позволяет рассматривать весь достаточно широкий спектр атмосферных волн. Тем не менее данные дистанционного зондирования позволяют выделить часть спектра длинноволновых возмущений [7]. Для этого на основе текущего (T) и невозмущенного или среднего значения (\bar{T}) на фиксированных уровнях атмосферы, используя стандартное выражение, были вычислены профили нормированных флуктуаций температуры:

$$T'(h) / \bar{T}(h) = (T(h) - \bar{T}(h)) / \bar{T}(h).$$

Профили нормированных флуктуаций температуры позволяют оценить длину волны температурного возмущения, наблюдаемого за два дня (23 апреля 2015 г.) до землетрясения $M = 7.8$, составляющую ~ 7.0 – 10.0 км (рисунок 6, b), что может являться признаком гравитационных волн.

Спектральный анализ полученных в наблюдениях временных рядов и профилей флуктуаций температуры атмосферы выполнялся с применением аппарата вейвлет-преобразования (*Continuous*

Wavelet Time-Frequency Spectrum). Были определены частотно-временная локализация, трансформация и характерные параметры волновых процессов [14]. В качестве примера на рисунке 7, а показаны результаты обработки временного ряда нормированных аномалий температуры (ΘT) по данным спутниковых измерений в Непале. Как видно, спектральные компоненты $\Theta T(t)$, синхронизированные с процессом подготовки сильного землетрясения, имеют максимум в области периодов 5–10 дней. Распределение *мощности* в спектре колебаний ΔT в диапазоне высот 8.0–58.0 км (рисунок 7, b) позволяет выделить длину волны с максимальной энергией, составляющую 11.36 км.

Используя данные о флуктуациях температуры, или точнее быстрых изменениях температуры, происходящих в течение темного времени суток, были рассчитаны высотные распределения плотности потенциальной энергии гравитационных волн на единицу массы воздуха (GWPED) [13]:

$$GWPED = \frac{g^2}{2N^2} \overline{(T' / \bar{T})^2},$$

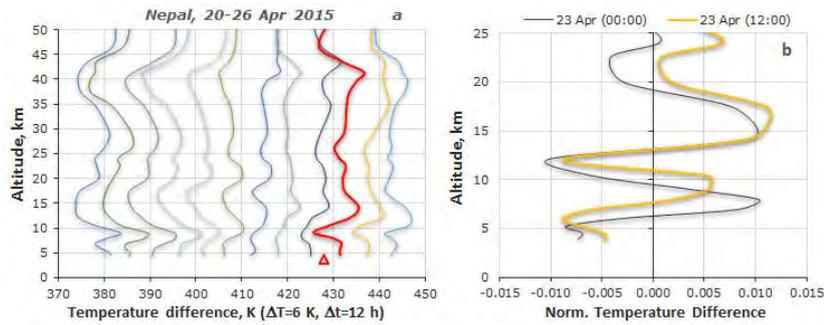


Рисунок 6 – Трансформация вертикальных профилей разности температуры с 20 по 26 апреля 2015 г. (a) и профили нормированных флуктуаций температуры за два дня до землетрясения 23 апреля 2015 г. (b). Маркером отмечен момент землетрясения 25 апреля 2015 г. ($M = 7.8$)

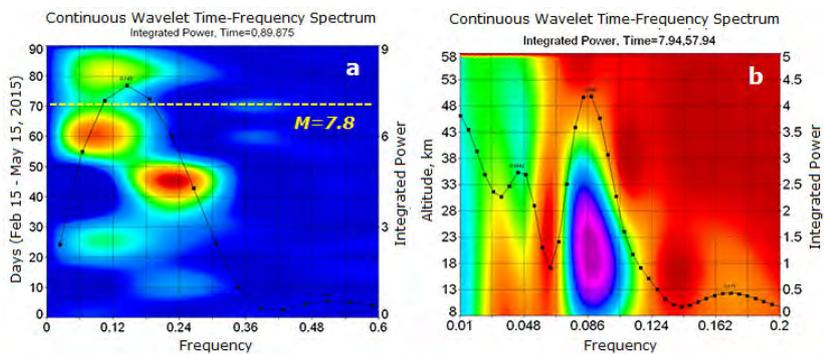


Рисунок 7 – Вейвлет-диаграммы и спектры мощности временного ряда нормированных аномалий температуры на уровне 150 hPa с 15 февраля по 15 мая 2015 г. (a) и температурных флуктуаций в диапазоне высот 8.0–58.0 км для измерения 23 апреля 2015 г. (b) в Непале

где $|T'|/\bar{T}$ – амплитуды нормированных возмущений температуры; g – ускорение свободного падения. Частоту Брента – Вайсяля (N) определяли по измеренным профилям температуры атмосферы:

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right),$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; $g/c_p = 9.8 \times 10^{-3}$ К/м – адиабатический градиент температуры; z – вертикальная координата.

На рисунке 8 показаны результаты расчетов GWPED в периоды подготовки землетрясений в России и Непале. Наиболее интенсивные волновые возмущения наблюдались за несколько дней до землетрясений, главным образом, на границах раздела слоев средней атмосферы.

Температурные возмущения в мезосфере. Не менее выраженная согласованность поведения температуры и сейсмичности наблюдались в мезосфере. Перед двумя крупными землетрясениями в Туве ($M = 6.6$, 27.12.2011 и $M = 6.7$, 26.02.2012)

изменения температуры на уровнях 2–0.1 hPa настолько очевидны, что не требуют применения специальных методов обработки, чтобы показать их синхронизацию с сейсмичностью. Сильные сейсмические удары произошли после резких перепадов температуры порядка 20–30° К (рисунок 9). Исследования в более высоких слоях атмосферы позволили получить дополнительную информацию о возможных причинах, вызывающих аномалии температуры.

В качестве одной из таких причин могут рассматриваться волновые возмущения планетарного масштаба. В их числе мощные солнечные вспышки, вызывающие сильные понижения H -компонента геомагнитного поля в атмосфере на средних и низких широтах Земли. В качестве примера на рисунке 10 показаны результаты, относящиеся к Тянь-Шанскому землетрясению энергетического класса 14.8 ($M = 6.1$), которое произошло 25 декабря 2006 г. Для оценки интенсивности магнитных бурь использовался индекс Dst по данным Мирового центра в г. Киото, Япония [15]. Явно просматривалось влияние магнитной бури на

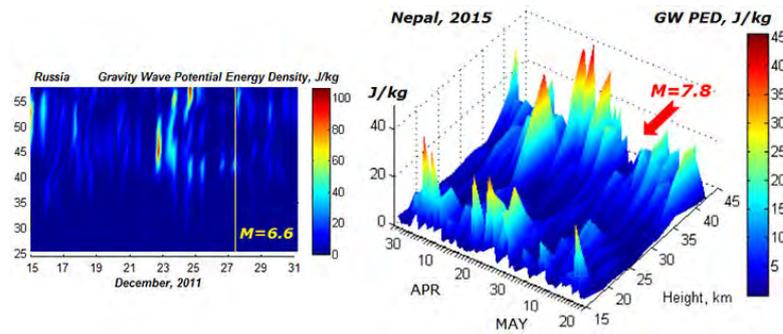


Рисунок 8 – Высотно-временное распределение плотности потенциальной энергии гравитационных волн (GWPED) в России с 15 по 31 декабря 2011 г. (а) и в Непале с 25 марта по 20 мая 2015 г. (б)

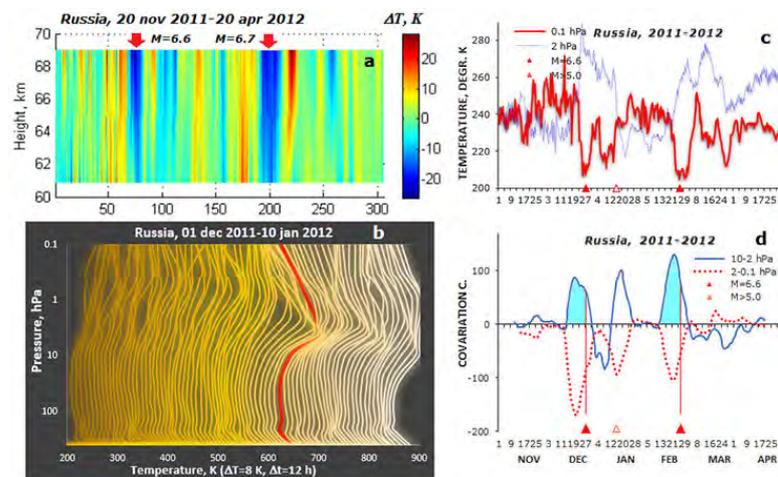


Рисунок 9 – Вариации ΔT (а) и трансформация профилей $T(p)$ (б). Изменения температуры на уровнях 0.1 и 2 hPa (с) и коэффициенты ковариации в ноябре 2011 – апреле 2012 г. в России, Тува (д)

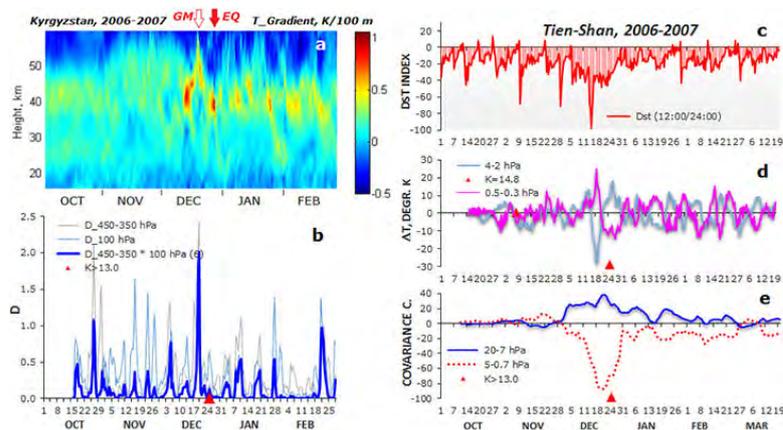


Рисунок 10 – Высотно-временная изменчивость градиента температуры (а) и результаты диагностирования аномалий температуры (б) в период с октября 2006 г. по февраль 2007 г. Временная динамика геомагнитного индекса Dst (с), средних значений ΔT в слоях атмосферы 0.5–0.3 и 4–2 hPa (д); коэффициента ковариации между уровнями 20–7 и 5–0.7 hPa (е)

наблюдаемые изменения температуры во всех слоях атмосферы. Активизация сейсмической активности происходила с задержкой по времени после дня начала магнитной бури.

Выводы. Приведенные примеры показывают, что переход к более высоким слоям атмосферы позволяет получить дополнительную информацию о взаимосвязи изменений температуры с процессами подготовки крупных землетрясений. Несмотря на то, что эти результаты носят предварительный характер и пока преждевременно утверждать, что они распространяются на все крупные сейсмические события, эта область высот несомненно представляет большой интерес и потенциал. Используя и развивая выявленные закономерности поведения температуры в тропосфере, основные усилия, вероятно, следует сконцентрировать на верхних слоях атмосферы и поиске способа не только диагностировать, но и дифференцировать аномалии температуры.

Литература

1. Jiao Z.-H. Pre-seismic anomalies from optical satellite observations: a review / Z.-H. Jiao, J. Zhao, X. Shan // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2018. 18. 1013–1036.
2. Свердлик Л.Г. Динамика температуры тропопаузы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // *Наука и новые технологии.* 2015. № 1. С. 23–27.
3. Свердлик Л.Г. Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // *Вестник КPCY.* 2016. Т. 16. № 5. С. 170–174.
4. Кашкин В.Б. Обнаружение ионосферных и тропосферных откликов сейсмической активности по спутниковым данным / В.Б. Кашкин, А.С. Григорьев // *Вестник СибГАУ.* 2013. № 5. С. 31–34.
5. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере / В.Б. Кашкин // *Оптика атмосферы и океана.* 2013. 26. № 10. С. 908–916.
6. Свердлик Л.Г. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // *Журнал Сиб. федер. ун-та. Серия: Техника и технологии.* 2017. Т. 10. № 6. С. 783–793.
7. Meyer C.I. Intercomparison of AIRS and HIRDLS stratospheric gravity wave observations / C.I. Meyer, M. Ern, L. Hoffmann, Q.T. Trinh, M.J. Alexander // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. 11. P. 215–232.
8. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и Научной станции РАН в г. Бишкеке.
9. The IRIS Earthquake Browser (IEB). URL: <http://ds.iris.edu/>
10. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>
11. Свердлик Л.Г. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // *Наука, новые технологии и инновации.* 2015. № 4. С. 9–14.
12. Свердлик Л.Г. Аномальные вариации электрических характеристик земной коры и термического состояния атмосферы / Л.Г. Свердлик // *Вестник КPCY.* 2018. Т. 18. № 8. С. 187–193.
13. Schmidt T. Global gravity wave activity in the tropopause region from CHAMP radio occultation data / T. Schmidt, A. De la Torre, J. Wicker // *Geophys. Res. Lett.* 2008. 35. L16807. doi:10.1029/2008GL034986.
14. AutoSignal. URL: <http://www.sigmaplot.co.uk>.
15. Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan. URL: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>.