ВАРИАЦИИ УХОДЯЩЕГО ДЛИННОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ПРОТЕКАНИИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В 2008 И 2009 ГОДАХ

Академик В.Г. Бондур, инженер О.С. Воронова

Научный центр аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос» E-mail: office@aerocosmos.info

Аннотация. На основании результатов регистрации из космоса уходящего длинноволнового излучения проведены исследования тепловых аномалий, возникающих при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 годах. Данные об уходящем длинноволновом излучении, регистрировались гиперспектрометром AIRS (спутник AQUA) в инфракрасном диапазоне спектра в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм. Исследования выполнялись на примере землетрясений, произошедших в районе оз. Байкал 27 августа 2008 г. (с магнитудой М=6,3), а также в Охотском море 24 ноября 2008 г. (М=7,3) и 10 декабря 2009 г. (М=6,3). На основании проведенного анализа временных рядов ежедневных космических данных по характеристикам уходящего длинноволнового излучения для исследуемых сейсмоопасных территорий установлено, что в процессе подготовки и протекании землетрясения появляются положительные аномалии такого излучения на верхней границе облачности, которые проявляются за две недели до сейсмического события.

Ключевые слова: космический мониторинг, дистанционное зондирование Земли, сейсмоопасные территории, тепловые предвестники, температура поверхности Земли, уходящее длинноволновое излучение

Abstract. Basing on the results of registration of outgoing longwave radiation, thermal anomaly analysis is conducted. They occur in the period of preparation and behavior of the strong earthquakes on the territory of Russia in 2008 and 2009. Outgoing longwave radiation data was registered by hyper spectrometer AIRS (satellite AQUA) in infrared atmospheric spectral window 8–12 km. The research was carried out basing on analysis of events occurred on Baykal in August,27 2008, M=6.3 and on the Sea of Okhotsk in November, 24 2008, M=7.3 and in December,10 2009, M=6.3. On the base of the daily time series space data it is determined that in the period and preparation of EQ, positive anomalies of outgoing longwave radiation are happened on the cloud top in 2 weeks before seismic event.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing of the Earth, seismic hazard areas, thermal Precursors, land surface temperature, outgoing longwave radiation

Введение. Эффективность использования космических методов для исследования сейсмической активности, а также для проведения непрерывного мониторинга сейсмоопасных территорий с целью прогноза и анализа последствий, сильных и катастрофических землетрясений подтверждена на примерах ряда известных землетрясений, состоявшихся за последние годы в Калифорнии, Китае, Японии, Чили, Гаити, Турции, Пакистане, России, Мексике и др. [1].

Из космоса могут регистрироваться различные аномалии геофизических полей, являющиеся предвестниками землетрясений, к которым, прежде всего, относятся:

вариации электромагнитного поля, приводящие к закономерным флуктуациям ионосферных параметров (вертикальных профилей концентрации электронов, общего электронного содержания — TEC, максимума электронной концентрации в слое F2 и др.) [1–3];

геоморфологические особенности, прояв-

ляющиеся в виде специфических особенностей полей линеаментов, регистрируемых из космоса [4, 5];

деформационные и прочностные свойства земной коры, исследуемые на основе созданных нами геомеханических моделей и результатов измерений с помощью спутниковых навигационных систем [2, 3];

вариации полей температуры земной поверхности и приземного слоя воздуха [1, 6–12];

другие менее информативные сегодня поля (магнитное, гравитационное и др.) [1].

Аномалии этих полей позволяют регистрировать методами дистанционного зондирования из космоса краткосрочные предвестники землетрясений с заблаговременностью от нескольких дней (2–3) до месяца. Одним из таких предвестников являются тепловые аномалии, возникающие в период подготовки к сильным землетрясениям. Развитие методов и средств дистанционного зондирования Земли привело к качественному скачку в исследованиях тепловых полей, в том числе температурных аномалий, возникающих в период подготовки таких природных катастроф, как землетрясения [1].

В настоящей работе исследуются вариации уходящего длинноволнового излучения, измеряемого на верхней границе облачности над сейсмоопасными территориями. При исследованиях тепловых аномалий преимуществом этого подхода является то, что это излучение регистрируется в инфракрасном диапазоне спектра в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм, что позволяет применять эти данные даже при наличии облачности в исследуемом регионе. Для исследования выбраны сейсмические события, произошедшие в районе оз. Байкал 27 августа 2008 г. (М=6,3), а также в Охотском море 24 ноября 2008 г. (М=7,3) и 10 декабря 2009 г. (М=6,3).

Физические особенности возникновения тепловых аномалий, регистрируемых из космоса, перед землетрясениями. В различных работах [8–15] приводятся экспериментальные свидетельства наличия поверхностных тепловых аномалий, возникающих перед землетрясениями. О том, что это не просто изменения поверхностной температуры Земли, свидетельствуют данные о значительных вариациях латентного потока тепла (скрытой теплоты испарения) [9, 10], а также данные о характеристиках уходящего длинноволнового излучения [8, 15, 16].

Тепловые аномалии перед сильными землетрясениями наблюдаются на разных высотах, начиная с поверхности Земли до верхней границы облаков (рис.1). Энергетический подход к изучению этого процесса позволил предложить физический механизм, объясняющий природу таких тепловых аномалий, возникающих перед землетрясениями.

С использованием результатов наземных и спутниковых измерений, а также результатов лабораторных экспериментов предложен следующий физический механизм возникновения тепловых аномалий перед землетрясениями, которые генерируются над областью активных тектонических разломов [1, 8, 16]:

в процессе подготовки землетрясений происходит выделение в атмосферу скрытой теплоты испарения;

эти процессы приводят к изменениям тем-



Рис. 1. Формирование тепловых аномалий перед землетрясениями

пературы и влажности воздуха в приповерхностном слое атмосферы, вызывающих появления тепловых аномалий;

тепловые аномалии приводят к вариациям уходящего длинноволнового излучения, которые регистрируются из космоса над приповерхностным слоем атмосферы на верхней границе облаков;

временной масштаб наблюдаемых аномалий имеет порядок от одной до нескольких недель.

Источником тепла, выделяемого перед землетрясениями над областями их подготовки, являются не только гидрологические эффекты (горячие источники, газы), но и процессы выделения и трансформация тепла в атмосфере.

Методика проведения исследований. С учетом физических особенностей генерации тепловых аномалий в период подготовки и протекания сейсмических событий, для проведения исследований динамики уходящего длинноволнового излучения использовалась специальная методика, суть которой изложен ниже.

В качестве исходных данных для анализа исследуемых сейсмических событий в районе оз. Байкал 27 августа 2008 г. (M=6,3), а также в Охотском море 24 ноября 2008 г. (M=7,3) и 10 декабря 2009 г. (М=6,3) использовались данные об уходящем длинноволновом излучении, полученные с помощью гиперспектрометра AIRS (спутник AQUA), за 20 дней до исследуемых землетрясений и через 7 дней после них. Исходная информация бралась из архива GES Distributed Active Archive Center (GES DAAC). Используемый продукт имеет пространственное разрешение 1°×1°. Исходные данные представляли собой массив, каждое цифровое значение которого соответствует определенной широте и долготе.

Для первичной обработки с целью получения необходимой для анализа информации применялась программа MatLab. В результате преобразований для дальнейших исследований создавалась матрица из 3-х столбцов (значение уходящего длинноволнового излучения, широта и долгота), количество строк в матрице будет зависеть от количества значений в исходном hdf-файле. Для выявления аномалий уходящего длинноволнового излучения в сейсмоопасных регионах осуществлялась нормализация исходных данных, которая заключалась в формировании разностей текущего и среднеарифметического значений и делении их на стандартное отклонение.

$$N = (S_d - \overline{S}_d^*) / \sigma, \qquad (1)$$

где S_d — текущие данные на день исследуемого года; \overline{S}_d — среднее арифметическое за день, прошлых лет. При этом рассматривался аналогичный период исследования 28 дней (20 дней до и 7 после землетрясения); σ — стандартное отклонение, которое вычисляется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (S_i - \overline{S})^2}{n-1}}; S_i$$
 — значение за день (*i*=1,

..., *n*); \overline{S} — среднее арифметическое данных за период исследования.

На следующем этапе обработка данных происходила с использованием программного пакета Surfer. В процессе обработки осуществлялось построение сеточной функции Gridding, заключавшееся в вычислении значений интерполяционной функции в точках регулярной сети по значениям хаотически расположенных экспериментальных точек данных. Исходное множество экспериментальных точек вводились из ХҮГ файла данных. Значения сеточной функции сохранялись в сеточном файле с расширением *.GRD. Сеточная функция строилась методом Криге, геостатическим методом построения сети, включающим линейную модель вариаграммы. Далее сеточная функция использовалась для построения карт изолиний и графиков поверхностей, в которых области между изолиниями заполнялись различными цветами для визуализации данных.

Методика выявления аномальных вариаций уходящего длинноволнового излучения применялась для исследования сильных землетрясений, произошедших на территории России в 2008 и 2009 гг.

Результаты исследований и их анализ. В настоящей работе представлены результаты трех землетрясений, произошедших 27 августа 2008 г. в районе оз. Байкал а также 24 ноября 2008 г. и 10 декабря 2009 г. в Охотском море. Землетрясение, произошедшее 27 августа 2008 г., имело магнитуду 6,3. Его эпицентр находился в оз. Байкал. Глубина очага составляла примерно 16 км. Исходные среднесуточные данные, полученные с помощью гиперспектрометра AIRS, нормализованные по формуле (1) за период с 7 августа по 3 сентября 2008 г., а также за год до сейсмического события (фоновая обстановка) в аналогичный период времени приведены на рис. 2.

Анализ вариаций уходящего длинноволнового излучения показал, что в исследуемый период времени, до землетрясения наблюдалось аномальное повышение интенсивности этого излучения. Первое появление аномалии произошло 13 августа 2008 г., т.е. за 14 дней до сейсмического события. В течении следующих нескольких дней интенсивность аномалии понизилась (см. рис. 2). За 4 дня до землетрясения (23 августа 2008 г.) над эпицентральной областью выявлено аномальное повышение значений уходящего длинноволнового излучения, интенсивность которого понижалась в течении трех последующих дней до подземного толчка. В день землетрясения (27 августа 2008 г.) аномалий уходящего длинноволнового излучения над эпицентром не выявлено.

Второе из исследуемых землетрясений,

произошедшее в акватории Охотского моря 24 ноября 2008 г., имело магнитуду 7,3. Его эпицентр находился в 315 км к западу от Петропавловска-Камчатского. Глубина очага составляла 491 км.

Для исследования данного землетрясения были получены среднесуточные значения уходящего длинноволнового излучения, зарегистрированные гиперспектрометром AIRS. Данные обрабатывались за период с 4 ноября по 1 декабря 2008 г. В качестве фоновой обстановки рассматривались данные за аналогичный период времени, полученные в 2007 г.

На рис.3 представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных при исследованиях в акватории Охотского моря.

За 14, 8 и 2 дня до землетрясения, состоявшегося 24 ноября 2008 г., т.е. 10, 16 и 22 ноября 2008 г. в эпицентральной области наблюдались положительные аномалии уходящего длинноволнового излучения. Причем наиболее сильная аномалия была зафиксирована 22 ноября 2008 г., т.е. за 2 дня до землетрясения (рис.3). За день до землетрясения началось понижение





интенсивности аномалии, которая располагалась южнее эпицентра. В день землетрясения (24 ноября 2008 г.) выявлена очень слабая аномалия, которая наблюдалась только в северной части эпицентральной области. После свершившегося землетрясения аномалия уходящего длинноволнового излучения сохранилась несколько дней.

Третье из исследуемых землетрясений произошло в акватории Охотского моря 10 декабря 2009 г. Его магнитуда составляла 6,3. Глубина очага примерно 656 км. При анализе его особенностей исходные данные, полученные гиперспектрометром AIRS, нормализовались по формуле (1) за период с 20 ноября по 17 декабря 2009 г., а также за аналогичный период времени за год до данного сейсмического события (фоновая обстановка).

Анализ вариаций уходящего длинновол-

нового излучения, приведенных на рис. 4, показал, что первая положительная аномалия появилась за 13 дней до сейсмического события (27 ноября 2009 г.). В следующие несколько дней интенсивность аномалии понизилась, а 5 и 6 декабря 2009 г. наблюдалась положительная аномалия уходящего длинноволнового излучения максимальной интенсивности.

Обстановка в эпицентральной области для землетрясения, состоявшегося 10 декабря 2009 г., показана на рис. 5, на котором приведен график изменения уходящего длинноволнового излучения и стандартного отклонения данных (σ) за период времени с 20 ноября до 17 декабря 2009 г. В трех областях графика выявлены положительные аномалии уходящего длинноволнового излучения, которые проявляются 27, 30 ноября и 5, 6 декабря 2009 г. Наибольшее повышение интенсивности это-

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА, № 1, 2012



Рис. 5. Графики изменения данных уходящего длинноволнового излучения (——) и стандартного отклонения (— —) данных в период исследования с 20 ноября по 17 декабря 2009 г. для землетрясения, произошедшего в Охотском море 10.12.2009 г., М=6,3

го излучения над эпицентральной областью произошло за 5 дней до землетрясения, т.е. 5 декабря 2009 г., состоявшегося 10 декабря 2009 г. Значение интенсивности уходящего длинноволнового излучения в этот день составило 80 Вт/м². До землетрясения в период с 6 по 8 декабря 2009 г. также наблюдалась положительная аномалия, интенсивность которой понижалась за этот период с 79,9 до 26 Вт/м².

Заключение. Приведены результаты исследований аномальных вариаций уходящего длинноволнового излучения на примере трех землетрясений, произошедших на территории Российской Федерации в районе оз. Байкал 27 августа 2008 г. (М=6,3), а также в акватории Охотского моря: 24 ноября 2008 г. (М=7,3) и 10 декабря 2009 г. (М=6,3).

Анализ изменений уходящего длинноволнового излучения в процессе подготовки и протекания исследуемых сейсмических событий позволил выявить последовательное появление положительных аномалий вблизи эпицентральных областей, которые появляются за 13–14 дней до землетрясений. За несколько дней до землетрясения (1–5) происходит понижение интенсивности аномалий вблизи эпицентральной области.

Результаты проведенных исследований продемонстрировали возможность регистрации из космоса вариаций полей уходящего длинноволнового излучения непосредственно перед сильными землетрясениями, что позволит использовать предложенную методику для регистрации тепловых аномалий в процессе космического мониторинга сейсмоопасных территорий. Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. по теме «Исследование из космоса вариаций геофизических полей в сейсмоопасных регионах».

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. –594 с.

2. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженнодеформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии. Доклад Академии Наук, том 430. –№ 3. –20107 –С. 400–404.

3. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапиши В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления. Доклады Академии Наук, том 414. –№ 4. –2007. –С. 540–543.

4. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений. Доклады академии наук, том 402. –№1. –2004. –С. 1–8.

5. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе динамики систем линеаментов. Исследование земли из космоса №3. –2005. –С. 1–16.

6. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли — индикатор сейсмической активности. Доклады АН СССР, т. 301. –№1. –1988. –С. 67–69.

7. *Dey S. and Singh R.* Surface latent heat flux as an earthquake precursor // Natural Hazards and Earth System Sciences 3, 2003, p. 749–755.

8. *Cervone, G., Singh, R.P., Kafatos, M., Yu, C.*, Wavelet maxima curves of surface latent heat flux anomaliesassociated with India earthquakes. Natural Hazards and Earth System Sciences 5 (27), 2005, p.87–99.

9. *Tramutoli V., Bello G., Pergola N., Piscitelli S.* Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas. Annali Di Geofisica. April Vol.44, №2. 2001, p. 295–312.

10. *Tronin A.A.* Atmospherelitosphere coupling. Thermal anomalies on the Earth surface in seismic processes // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling /. by M. Hayakawa, O.A. Molchanov. Tokyo: TERRAPUB, 2002, p. 173–176.

Поступила 14 апреля 2011 г. Рекомендована кафедрой космического мониторинга МИИГАиК