

КОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.А. Тронин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
E-mail: tronin@at1895.spb.edu

В настоящее время представляется перспективным изучение из космоса следующих явлений, связанных с землетрясениями: изменение рельефа поверхности, температура поверхности, газовый состав атмосферы и концентрация аэрозоля, электромагнитные явления в ионосфере. Горизонтальные и вертикальные деформации земной поверхности после землетрясения достигают десятков сантиметров и метров, что легко фиксируется методом космической дифференциальной интерферометрии. Деформации до землетрясения значительно меньше — несколько сантиметров. На сегодня известны только случаи восстановления деформаций поверхности после землетрясений. Перспективным представляется создание новых РЛС с высокой чувствительностью, низким пространственным разрешением и совмещение методик, применяемых в дифференциальной интерферометрии, с GPS. Опубликованы многочисленные случаи повышения температуры поверхности Земли перед и после землетрясений на 3–5 °С на площадях в сотни и тысячи квадратных километров. Современные ИК-системы уверенно регистрируют такого рода тепловые аномалии. Разрабатываются методики прогноза землетрясений. Известны также многочисленные случаи изменения газового состава атмосферы и содержания аэрозоля. Спутниковые методы сегодня способны восстанавливать содержания целого ряда газов: O₃, CH₄, CO₂, CO, H₂S, SO₂, HCl и аэрозоля. Однако пространственное разрешение и чувствительность систем к изменениям в тропосфере до сих пор очень мала. Первые обнадеживающие результаты получены только по озону. Широкое развитие получили работы по электромагнитным исследованиям в ионосфере. Получены устойчивые статистические оценки связи состояния ионосферы и сейсмической активности. Готовятся к запуску несколько малых спутников.

Введение

Спутниковые методы для исследования землетрясений стали применяться почти сразу с появлением спутниковых данных. В первую очередь они были связаны со структурными исследованиями. По космическим снимкам выделялись активные современные разломы и структуры (Трифонов и др., 1988). У этого метода есть существенный недостаток — невозможно наблюдать короткоживущие динамические процессы, связанные с подготовкой и реализацией землетрясения. Дальнейшее развитие получили геофизические методы дистанционных наблюдений.

Практически столь же давнюю историю имеют электромагнитные методы исследования землетрясений (Гохберг, Моргунов, Похотелов, 1988; Molchanov, Hayakawa, Miyaki, 2001). Экспериментальные работы показали наличие аномалий в состоянии ионосферы, связанные с сейсмической активностью.

Позже начались исследования, связанные с использованием космической тепловой съемки для изучения землетрясений (Горный и др., 1988; Сальман, Тронин, 1989, 1990). Исследованы тепловые аномалии в Средней Азии, Камчатке, Китае, Японии (Tronin, Hayakawa, Molchanov, 2002), Средиземноморье, накоплен статистический материал по более чем 100 событиям. Была продемонстрирована связь тепловых аномалий на земной поверхности и сейсмической активности (Tronin, 1996, 1999, 2000, 2002). В Китае начались исследования по прогнозу землетрясений с использованием этого метода (Qiang, Du Le-Tian, 2001).

В 1990-х гг. были проведены первые работы по применению спутниковой радиолокационной интерферометрии для исследования землетрясений (Massonnet и др., 1993). Были построены интерферограммы изображений земной поверхности до и после толчка. На них отчетливо видны деформации земной поверхности после землетрясения.

В конце 1980-х гг. сотрудники Абастуманской астрофизической обсерватории Академии наук Грузии Торошелидзе и Фишкова (1989) обнаружили, что за несколько часов до начала землетрясения в нижней ионосфере — слой E (85–110 км) — над эпицентром возрастает интенсивность свечения зеленой линии атомарного кислорода (5577 Å и 6300 Å).

Морозовой (1997) были выполнены работы по исследованию необычных облаков, сопровождающих землетрясения.

1. Выбор методов наблюдения

В настоящее время накоплено большое количество информации по различным явлениям, наблюдаемым на земной поверхности и в атмосфере в связи с землетрясениями. Для упорядочения информации был составлен каталог, представляющий собой описание землетрясений, для которых отмечены космические, атмосферные, гидрогеологические, акустические, электромагнитные явления, а также самочувствие людей и поведение животных. Главное внимание уделялось атмосферным явлениям, связанным с сейсмической активностью. В настоящее время каталог содержит описание 1507 событий, начиная с 550 г. до н. э. и заканчивая Измитским землетрясением в Турции 17 августа 1999 г.

Современные геотермальные (Каталог, 1991), гидрогеодинамические (1984), гидрогеохимические (1985), газогеохимические (Войтов, 1975; Осика, 1981), метеорологические (Милькис, 1986) и электромагнитные исследования процессов при землетрясениях (Seismo electromagnetics, 2002) также несут множество информации о лито-атмосферных связях.

Рассмотрев исторические данные и современные исследования об атмосферных, гидрогеологических и других процессах на земной поверхности, связанные с землетрясениями, можно отметить, что при землетрясениях: 1) наблюдаются различные оптические явления; 2) увеличивается температура воды, почвы и воздуха; 3) растет концентрация газов в приземном слое атмосферы, наблюдаются выбросы газа в атмосферу; 4) наблюдаются резкие изменения погоды, переходы от затишья к буре, грозы; 5) падает атмосферное давление; 6) увеличивается концентрация аэрозоля, часты туманы, дымка; 7) наблюдаются необычные облака; 8) наблюдается необычное поведение животных; 9) фиксируются акустические явления; 10) отмечаются электромагнитные явления в атмосфере и ионосфере; 11) происходит деформация земной поверхности, изменение рельефа.

Объектом исследования спутниковых методов являются процессы взаимодействия литосферы и атмосферы при землетрясениях. Проблема лито-атмосферных связей относится к фундаментальным вопросам наук о Земле. Процессы дегазации и дегидратации Земли оказали решающее влияние на формирование атмосферы и гидросферы Земли. При этом вулканическая и сейсмическая активность служат основными каналами дегазации Земли. Разнообразные процессы, происходящие на поверхности Земли и в ее атмосфере, в связи с сейсмической активностью, представляют основной объект исследований. В круг таких процессов входят изменение температуры и влажности почвы, температуры, влажности и химического состава приземного слоя атмосферы.

Для определения методов регистрации атмосферных явлений необходимо соблюдение некоторых условий, которые связаны с мозаичным характером предвестников, распространением их на больших площадях, короткими временными интервалами, т. е. необходимо быстрое измерение параметров на больших площадях. Этому условию в настоящее время удовлетворяют только дистанционные методы измерений в космическом варианте. Другое условие — наличие банка данных для ретроспективной оценки сильных землетрясений. Таким образом, необходимо проанализировать возможности космических методов для выявления лито-атмосферных связей при землетрясениях. Результаты этого анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1. Возможности космических методов для регистрации атмосферных явлений при землетрясениях

Атмосферные явления	Возможности космических методов
Оптические явления, свечение	Регистрация затруднена из-за сильной антропогенной нагрузки (высокая ночная освещенность). Данные малодоступны: съемки выполняются в рамках программы министерства обороны США — DMPS
Повышение температуры воды, почвы и воздуха	Возможна регистрация температуры земной поверхности с разрешением 1–5 км с частотой 0,5–6 ч
Аномалии концентрации газов в приземном слое атмосферы	Возможна регистрация некоторых газов, таких как CO, CH ₄ , O ₃ . В реальности на данный момент существуют данные по O ₃
Резкие изменения погоды	Возможна регистрации резких изменений погоды
Падение атмосферного давления	В настоящее время не осуществимо
Увеличение концентрации аэрозоля, туман, дымка	Возможно восстановление концентрации аэрозоля и вертикального профиля атмосферы по температуре и влажности
Необычные облака	Легко фиксируются спутниковыми методами
Необычное поведение животных	В настоящее время не осуществимо
Акустические явления	В настоящее время не осуществимо
Электромагнитные явления в атмосфере и ионосфере	Электромагнитные явления в ионосфере давно исследуются спутниковыми методами
Деформация земной поверхности	В настоящее время бурно развивающийся метод радарной интерферометрии позволяет зарегистрировать только деформации после толчка

2. Современные спутниковые методы измерений

В настоящее время можно регистрировать спутниковыми методами следующие параметры: 1) температура земной поверхности с помощью спутниковой тепловой съемки; 2) концентрация озона и аэрозоля в атмосфере; 3) вертикальный профиль атмосферы по температуре и влажности; 4) деформация земной поверхности; 5) электромагнитные явления в ионосфере; 6) облачный покров. Анализ современной ситуации со спутниковыми методами наблюдения за землетрясениями отражены в табл. 2.

Таблица 2. Современная ситуация со спутниковыми методами наблюдения за землетрясениями

Параметр	Спутник	Разрешение на местности, м	Чувствительность	Периодичность, дни
Деформация земной поверхности	ERS-1	10*n	n*см	27–44
Температура поверхности	NOAA, EOS, геостационарные спутники	100*n-5000	0,1–0,5 К	0,5 ч – 2 дня
Газовый состав атмосферы (озон) и аэрозоль	NOAA, TOMS	10 000*n	1-2 DU для озона	1-2
Электромагнитные эффекты в ионосфере	«Интеркосмос-24»	100 000*n	В зависимости от эффекта	10–20

3. Потребности пользователей

Представляется целесообразным проведение исследований на трех уровнях: лабораторном, наземном и спутниковом. При этом авиационный уровень наблюдения не рассматривается как существенный уровень наблюдений. Это связано с высокой стоимостью аэро-съемки.

Пользователей информации можно разделить на четыре категории: 1) конечные пользователи (в России — МЧС, местные власти); 2) научные пользователи; 3) инженерные и строительные компании; 4) космические агентства. Им необходима различная информация о землетрясениях. Тем не менее, можно сформулировать некоторые общие требования пользователей к спутниковой информации: 1) методики съемок, не зависящие от погодных условий (облачности); 2) временные интервалы съемок: от нескольких месяцев до толчка — до одной недели после события с периодичностью в сутки; 3) быстрая и круглосуточная автоматизированная обработка данных и их доставка пользователям, низкая стоимость данных.

Необходимо также учитывать проблемы стандартизации методов обработки и форматов данных, увязки с существующими геологическими и геофизическими наблюдениями, анализа исторических данных. Требуется проводить образовательные мероприятия по использованию спутниковых данных среди пользователей.

Наземные наблюдения являются неотъемлемым компонентом мониторинга землетрясений. Необходимо вести наблюдения за наклоном, напряжениями, уровнем воды; выполнять GPS- и VLBI-наблюдения, метеорологические и электромагнитные наблюдения, проводить анализ газового и аэрозольного состава атмосферы, измерять свечение кислорода в слое E.

Исходя из современного состояния спутниковых наблюдений, потребностей пользователей и технических возможностей в ближайшее десятилетие были сформулированы требования к перспективным спутниковым наблюдениям.

4. Существующие и перспективные спутниковые системы

В настоящее время существует несколько систем, дающих информацию о деформации земной поверхности, температуре поверхности, химическом составе и вертикальном разрезе атмосферы. Перспективные спутниковые системы дадут значительно более широкий диапазон измеряемых параметров.

• **Деформация поверхности.** Современные спутники, такие как ERS, ENVISAT не могут дать достаточной информации для организации мониторинга. Основным недостатком этих систем заключается в очень длинном периоде наблюдений от 27 до 44 дней. Для наблюдения за землетрясениями и другими природными катастрофами необходим, как минимум, 1-2-дневный период наблюдений. Этому требованию более других удовлетворяют системы COSMO-SkyMed и Pleiades. Чувствительность восстановления рельефа земной поверхности должна быть повышена до миллиметров. Необходимо создание спутниковых систем с длиной волны диапазона L (15,0–30,0 см) в отличие от современных систем с длиной волны диапазона C (3,8–7,5 см). Этот диапазон значительно более устойчив при построении интерферограмм и рельефа.

• **Температура поверхности.** Современные спутниковые системы дают тепловые снимки с высоким разрешением на местности, высокой чувствительностью (~0,1 К) и высокой периодичностью 0,5 ч – 1 день. Спутники NOAA и EOS поставляют ежедневные данные с разрешением 1 км в течение десятилетий. Геостационарные спутники дают изображение земного диска каждые 0,5 ч. Дальнейшее развитие будет связано с микроволновыми всепогодными системами наблюдений. В настоящее время микроволновые радиометры имеют низкое пространственное разрешение ($n \cdot 10 - n \cdot 100$ км). Фундаментальной проблемой тепловой съемки является зависимость тепловых аномалий на земной поверхности от метеорологических процессов, которые маскируют полезный сигнал.

• **Содержание газов в атмосфере.** Наблюдения газового состава со спутников были весьма редки в прошлом. Озон был единственным газом, который измерялся на регулярной основе. В настоящее время наблюдается взрыв интереса к химии атмосферы. Системы

спутников EOS (Aqua и Terra) и ENVISAT являются наиболее многообещающими системами, запущенными в самое недавнее время. Благодаря работе этих спутников стало возможным измерение концентраций CO и CH₄ в атмосфере. Одна из основных задач газовых измерений — восстановление концентрации газов и аэрозоля в приземном слое атмосферы.

• **Электромагнитные наблюдения в ионосфере.** Электромагнитные наблюдения в ионосфере начали проводиться довольно давно. Такие исследования проводились в СССР и Франции в 1970-х и 1980-х гг. На настоящий момент анонсировано несколько новых спутников: 1) французский DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions); 2) итальянский ESPERIA (Earthquake investigations by Satellite and Physics of the Environment Related to the Ionosphere and Atmosphere); 3) два отечественных спутника — «Компас» и «Вулкан». Серьезнейшей проблемой электромагнитных наблюдений является низкое пространственное разрешение.

5. Рекомендации по применению спутниковых методов для мониторинга землетрясений

Рекомендации по применению спутниковых методов для мониторинга землетрясений были сделаны в результате анализа состояния и перспектив спутниковых и наземных исследований землетрясений, анализа планов космических агентств в области изучения Земли, результатов работ нескольких международных групп ЮНЭСКО и ООН.

Предлагается создать или дополнить исследования на нескольких полигонах в сейсмоопасных районах, например, на Северном Кавказе, в Забайкалье, на Сахалине и Камчатке: по данным радиолокационной съемки построить рельеф поверхности на территории полигонов и начать мониторинг смещений земной поверхности, при необходимости расположить пассивные или активные отражатели; по результатам тепловой съемки рассчитать тепловые потоки на территории полигона и начать мониторинг тепловых аномалий.

Можно сделать также несколько рекомендаций космическим агентствам: 1) создать спутниковые радиолокационные системы с длиной волны диапазона L и 1-2-дневным периодом повторения съемки, при этом разрешение на местности может быть понижено до сотен метров; 2) разработать микроволновые всепогодные системы для измерения температуры поверхности; 3) создать системы для анализа содержания газов и аэрозоля в приземном слое атмосферы; 4) продолжить исследования по электромагнитным наблюдениям ионосферы и создать оборудование для изучения свечения ионосферы.

При выработке рекомендаций по применению космических методов для мониторинга землетрясений был поставлен ряд вопросов, которые требуют дальнейших исследований. Не ясно, все ли землетрясения вызывают смещения грунта до толчка. Какова величина этих смещений? Как избежать влияния метеорологических факторов на мониторинг тепловых аномалий? Как измерять содержание газов и аэрозоля в приземном слое атмосферы? Как увязать состояние ионосферы, свечение ионосферы и необычные облака с наземными источниками.

В заключение следует с сожалением констатировать, что Российское космическое агентство обращает мало внимания на дистанционные методы зондирования земной поверхности. В этих условиях представлялась бы целесообразной кооперация с другими агентствами.

Литература

- Войтов Г.И.* О газовом дыхании земли // Природа. 1975. № 3. С. 90–98.
Гидрогеодинамические предвестники землетрясений. М.: Недра, 1984. 212 с.
Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. 286 с.

- Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В.* Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67–69.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с.
- Каталог термических предвестников землетрясений. М.: ИФЗ, 1991. 35 с.
- Милькис М.Р.* Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. С. 36–47.
- Морозова Л.И.,* О современных тектонических процессах Туранской плиты и ее горного обрамления (по динамике линейных облачных аномалий над разломами и землетрясениями) // Изв. РАН. Физика Земли. 1997. № 5. 65–72.
- Осика Д.Г.* Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 204 с.
- Сальман А.Г., Тронин А.А.* Космическая тепловая съемка — новый метод дистанционного изучения сейсмоактивных регионов // Совет. геология. 1989. № 10. С. 90–93.
- Сальман А.Г., Тронин А.А.* Вариации потока уходящего ИК-излучения Земли в сейсмоактивных районах Средней Азии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 7. С. 67–69.
- Трифонов В.Г., Макаров В.И., Кожухин А.И., Скобелев С.Ф., Шульц-мл. С.С.* Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М.: Наука, 1988. 133 с.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // Nature. 1993. V. 364. P. 138–142.
- Molchanov, O.A., Hayakawa M., Miyaki K.* VLF/LF sounding of the lower ionosphere to study the role of atmospheric oscillations in the lithosphere-ionosphere coupling // Advances in Polar Upper Atmosphere Research. 2001. V. 15. P. 146–158.
- Qiang Zuji, Du Le-Tian.* Earth degassing, forest fire and seismic activities // Earth Science Frontiers. 2001. V. 8. N 2. P. 235–245.
- Seismo electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling / Ed. by M. Hayakawa, Molchanov O.A. Tokyo: TERRAPUB, 2002. 477 p.
- Tronin A.A.* Satellite thermal survey — a new tool for the studies of seismoactive regions // Intern. J. of Remote Sensing. 1996. V. 17. N 8. P. 1439–1455.
- Tronin A.A.* Satellite thermal survey application for earthquake prediction // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. by M. Hayakawa. Tokyo: TERRAPUB, 1999. P. 717–746.
- Tronin A.A.* Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in China // Intern. J. of Remote Sensing. 2000. V. 21. N 16. P. 3169–3177.
- Tronin A.A.,* Atmosphere-lithosphere coupling. Thermal anomalies on the Earth surface in seismic processes // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Ed. by M. Hayakawa, O.A. Molchanov. Tokyo: TERRAPUB. 2002. P. 173–176.
- Tronin A.A., Hayakawa M., Molchanov O.A.* Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China // J. of Geodynamics. 2002. V. 33. P. 519–534.