

**КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА  
И ФОТОГРАММЕТРИЯ**

УДК 550.343:528.711.1(202)

Российская академия наук  
Академик *В.Г. Бондур*  
Московский государственный университет  
геодезии и картографии  
Доктор геол.-минер. наук *А.Т. Зверев*

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА  
КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

К настоящему времени накоплен большой опыт по использованию для целей прогнозирования землетрясений различных геофизических, геохимических, геологических, биологических и других предвестников. С их помощью успешно выполнен прогноз целого ряда катастрофических землетрясений в разных сейсмоактивных регионах мира. Однако целая серия сильнейших катастрофических землетрясений последних лет (Турция, Иран, Китай, Алтай и др.), которые не были предсказаны, со всей очевидностью показала, что используемые методы прогнозирования требуют дальнейшего совершенствования и расширения списка предвестников. Это в совокупности должно привести к более надежному прогнозированию.

Авторы исследовали возможность использования в качестве предвестников сейсмических событий изменения структуры системы линеаментов, выявленных по космическим изображениям, и получили положительные результаты, которые изложены ниже.

Было обработано большое количество космических изображений для района г. Сан-Симеон (США) и Юг Калифорнии (южная часть разлома Сан-Андреас) со спутника TERRA (аппаратура MODIS, спектральные диапазоны 620–670 и 841–876 нм).

В данных регионах за последние несколько лет произошли три сильных землетрясения: в районе г. Сан-Симеон 09.09.2001 г. (магнитуда 4.2) и 22.12.2003 г. (магнитуда 6.5), в южной части разлома Сан-Андреас 22.02.2003 г. (магнитуда 5.2).

Космические изображения были подобраны для каждого из данных землетрясений с интервалами времени съемки в 1–2 месяца, начиная за шесть месяцев до каждого землетрясения и шесть месяцев после землетрясения. Таким образом, были подобраны три серии космических изображений, каждая из которых включает по 8–12 изображений в двух спектральных диапазонах (620–670 и 841–876 нм).

Для выделения линеаментов использован программный пакет автоматизированного линеаментного анализа Lessa [2]. Он позволяет выявлять линеаменты разных иерархических уровней (от локальных до макрорегиональных) и выполнять их статистический анализ.

Для проведения обработки разработан дополнительный модуль к программному пакету, позволяющий получать розы-диаграммы направленности линеаментов при любом произвольно заданном пороге (от 0 до 200). Ранее же розы-диаграммы строились лишь для нулевого порога. Именно розы-диаграммы линеаментов позволили в очень наглядной форме выявить изменение системы линеаментов при приближении момента землетрясения.

На рис. 1. показаны участки, в пределах которых выделялись линеаменты. Эти территории находятся в зоне разлома Сан-Андреас и характеризуются высокой сейсмичностью. Обработка изображений в спектральных диапазонах 620–670 и 841–876 нм дала близкие результаты, поэтому в данной работе изложены результаты анализа линеаментов лишь на изображениях, полученных в спектральном диапазоне 620–670 нм.

На рис. 2 показаны примеры роз-диаграмм направленности линеаментов для периода с 08.05.2001 г. по 12.12.2001 г., в который 09.09.2001 г. произошло землетрясение в районе г. Сан-Симеона (магнитуда 4.2). К сожалению, в момент землетрясения и в ближайшие дни до и после него была сильная облачность. Поэтому анализировалось космическое изображение, полученное в ближайший по времени землетрясения безоблачный период — 28.09.2001 г., т.е. почти 20 дней после свершившегося сейсмического события.



Рис. 1. Тестовые участки в районе г. Сан-Симеон и на юге Калифорнии:  
 1 — эпицентр землетрясения 22 февраля 2003 г. Магнитуда 5,2;  
 2 — эпицентр землетрясения 22 декабря 2003 г. Магнитуда 6,5.

Анализ роз-диаграмм линеаментов выявляет четкую закономерность: при приближении момента землетрясения все большую роль начинают играть секущие по отношению к простиранию разлома Сан-Андреас линеаменты, которые в момент землетрясения становятся столько же развиты, как и продольные (согласные) линеаменты, а после землетрясения секущие линеаменты постепенно исчезают, и все возвращается в исходную позицию.

Действительно, на розе-диаграмме, построенной по космическому изображению, снятому 08.05.2001 г. (рис. 2), главенствующую роль играют продольные линеаменты, согласные с простиранием зоны разлома Сан-Андреас 28.07.2001 г., в то время как за 1,5 месяца до землетрясения заметную роль начинают играть секущие линеаменты, максимальное количество которых приходится на ближайшее к землетрясению время (см. розу-диаграмму, полученную 28.09.2001 г.), т.е. через 20 дней после землетрясения. Через 3 месяца (12.12.2001 г.) секущие линеаменты почти

исчезают, и роза-диаграмма вновь становится подобной той, которая наблюдалась за 4 месяца до землетрясения 08.05.2001 г. и характерной для спокойной сейсмической ситуации.

Аналогичная закономерность наблюдается и для землетрясения, произошедшего 22 декабря 2003 г. в районе г. Сан-Симеон (рис. 3). За 2 месяца до землетрясения начинают активизироваться секущие линеаменты. За 1 месяц до него 22.11.2003 г. они уже четко выражены, а 27.12.2003 г. приобретают уже распространение, равнозначное с продольными линеаменами. Через 2,5 месяца линеаментов становится заметно меньше, а через 3 месяца (27.03.2004) их остается столько же, сколько было за 2 месяца до землетрясения, т.е. все возвращается к исходной ситуации.

Подобные 2-3-месячные волны разрастания секущих линеаментов до землетрясения и затухания (исчезновения) после него нами выявлены также для южной части разлома Сан-Андреас в период подготовки землетрясения с магнитудой 5,2, произошедшего 22.02.2003 г. (рис. 4), т.е. данная закономерность имеет общий характер и может быть использована в качестве предвестника для прогноза землетрясений.

Физическая природа исчезновения и появления секущих линеаментов-предвестников землетрясений связана с изменением структуры поля напряжений в период подготовки землетрясений, в результате чего начинают оживать поперечные зоны дизъюнктивных дислокаций.

Изменение физических и химических свойств горных пород и почв обуславливается изменением их структуры, трещиноватости, влажности, температуры, цвета, степени окисления и ожелезнения и др., происходящими при изменении поля напряжений при подготовке землетрясения. Это вызывает изменение коэффициентов отражения горных пород и почв. Поэтому появление и рост секущих зон в период подготовки землетрясения фиксируется при автоматизированном дешифрировании космических изображений как появление и разрастание новых секущих линеаментов, что и нашло свое отражение на розах-диаграммах (рис. 2). Одновременно происходит рост и увеличение продольных дизъюнктивных дислокаций, но величина их прироста значительно меньше по сравнению с главными секущими дислокациями (трещинами и разрывными нарушениями).

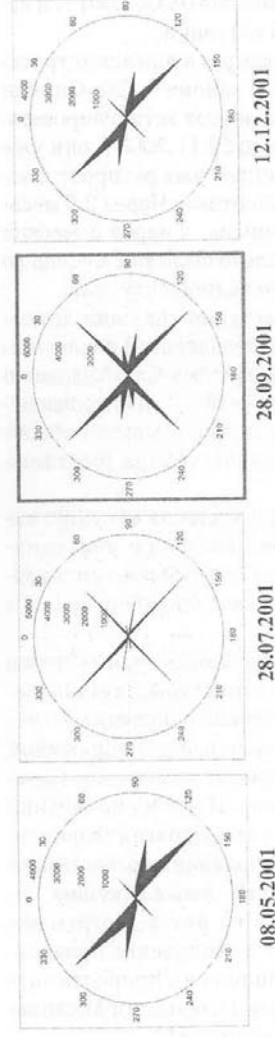


Рис. 2. Розы-диаграммы линейментов для района г. Сан-Симеон (землетрясение 09.09.2001 г., магнитуда 4.2)

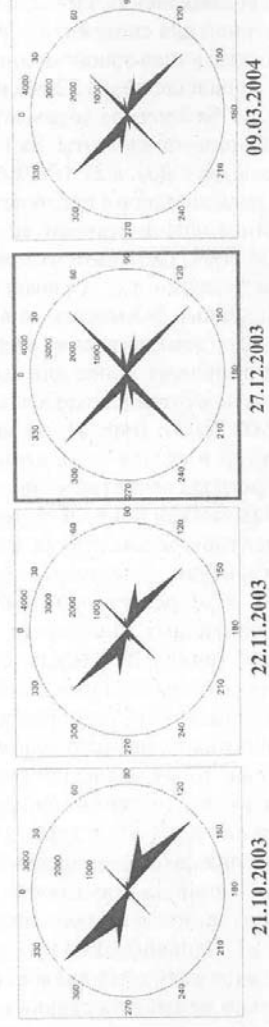


Рис. 3. Розы-диаграммы линейментов для района г. Сан-Симеон (землетрясение 22.12.2003 г., магнитуда 6.5)

6-130

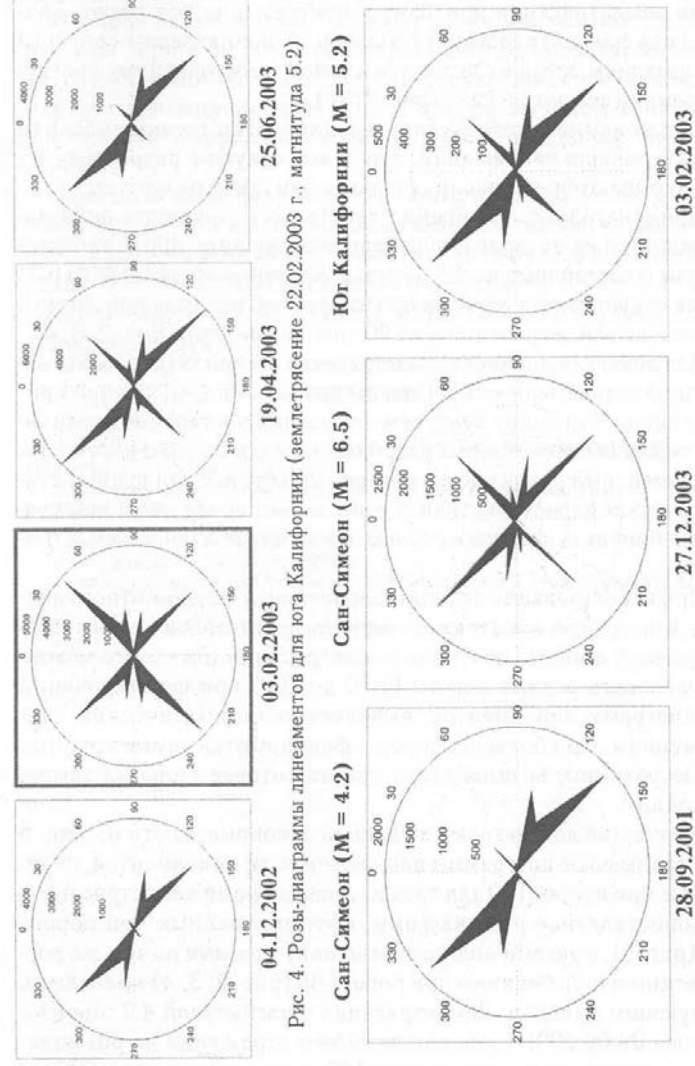


Рис. 4. Розы-диаграммы линейментов для юга Калифорнии (землетрясение 22.02.2003 г., магнитуда 5.2)

Сан-Симеон (M = 4.2)

Сан-Симеон (M = 6.5)

Юг Калифорнии (M = 5.2)

Рис. 5. Розы-диаграммы линейментов (порог 100)

Данное обстоятельство указывает на то, что в период подготовки землетрясения приходит в возбуждение вся тектонофизическая среда. Но главенствующая роль принадлежит секущим деформациям, которые являются ключом к достоверному прогнозу времени землетрясения (рис. 2, 3, 4).

После землетрясения восстанавливается первоначальная структура поля напряжений, а крупные секущие разрывные зоны закрываются, и фиксирующие их линеаменты исчезают.

Примечательно, что время перестройки структуры поля напряжения и ее возврат к первоначальному виду примерно одинаковы и составляют до 2-3 месяцев, а время максимального развития секущих линеаментов продолжается, начиная примерно с 20 дней до землетрясения и до 20 дней после него (рис. 2, 3, 4).

Для локализации места землетрясения можно использовать известную закономерность [1], заключающаяся в том, что при приближении к будущему очагу землетрясений постепенно увеличивается длина сейсмогенных разрывов, их количество и плотность. Линеаментный анализ позволяет определять все три данные статистические характеристики, т.е. позволяет по космическим изображениям дать прогноз не только времени, но и места землетрясения.

При использовании автоматизированного линеаментного анализа, в принципе, имеется возможность прогнозирования не только времени и места, но и силы землетрясения. Для этого можно использовать разные пороги (от 0 до 200) при формировании роз-диаграмм линеаментов, выделяемых по космическим изображениям. При больших порогах фиксируются самые крупные сейсморазрывы, возникающие при подготовке сильных землетрясений.

В качестве доказательства данной закономерности на рис. 5 приведены розы-диаграммы направленности линеаментов, полученные при пороге 100 для трех изученных нами землетрясений.

Сопоставление роз-диаграмм, сформированных при пороге 100 (рис. 5), с розами-диаграммами, полученными по тем же космическим изображениям при пороге 85 (рис. 2, 3, 4) приводит к следующим выводам. Землетрясение с магнитудой 4.2, произошедшее 09.09.2001 г., не нашло своего отражения на розе-диаграмме линеаментов при пороге 100, в то время как землетря-

сение 22.02.2003 г. (магнитуда 5.2) и 22.12.2003 г. (магнитуда 6.5) нашли четкое выражение как в розах-диаграммах, полученных при пороге 85, так и при пороге 100. Это подтверждает известную закономерность корреляции силы землетрясения с размерами сейсморазрывов [1] и с нашим выводом о наличии подобной же корреляции космолинеаментов с силой землетрясения.

Предложенный линеаментный метод прогноза землетрясений очень оперативен и экономически выгоден, так как космические изображения в настоящее время можно получать с высокой периодичностью для большей части поверхности Земли, а их автоматизированная обработка не требует больших трудовых и финансовых затрат.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Г.А. Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
2. Автоматизированный анализ природных линеаментных систем. Л.: ВСЕГЕИ, 1988. 131 с.

*Поступила 25 октября 2004 г.*

*Рекомендована кафедрой природопользования и географии МИИГАиК.*