

**КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА
И ФОТОГРАММЕТРИЯ**

УДК 550.343:528.711.1(202)

Научный центр проблем
аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»
Академик РАН *В.Г.Бондур*
Московский государственный университет
геодезии и картографии
Профессор, доктор геол.-минер. наук *А.Т.Зверев*
Аспирант *Л.В.Кузнецова*

**КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
ДИНАМИКИ СИСТЕМ ЛИНЕАМЕНТОВ
В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
В КАЛИФОРНИИ**

В работах [1—3] показано, что динамика линеаментов, выявляемая при автоматизированной обработке космических изображений, является средне- и краткосрочным предвестником землетрясений. С использованием этого предвестника (совместно с другими предвестниками) возможна организация оперативного космического мониторинга сейсмоопасных территорий.

При дешифрировании линеаментов в работах [1—3] использован модернизированный программный пакет LESSA [4], позволяющий выделять разноориентированные системы линеаментов и изучать их статистические характеристики (плотность линеаментов, дисперсия, розы-диаграммы и др.) при разных порогах. При этом чем более высокую степень выраженности на местности имеют линеаменты, тем при более высоких порогах они выявляются на космических изображениях [1, 2].

Автоматизированный линеаментный анализ космических изображений выполненный в работах [1—3] позволил выявить наличие четкой закономерности в изменении систем линеаментов при подготовке землетрясений и после их завершения. В период подготовки значительно увеличивается роль секущих ли-

неаментов по отношению к направлению основного разлома. Перестройка плана системы линеаментов начинается за 2—3 месяца до землетрясения, достигая максимума (максимального количества секущих линеаментов) в период, начинающийся примерно за 20 дней до землетрясения и заканчивающийся через 20 дней после него. Системы линеаментов возвращаются в первоначальное состояние в течение 2—3 месяцев после землетрясений, т.е. период успокоения по продолжительности примерно равен периоду возбуждения сейсмической активности при подготовке сильного землетрясения.

Использование землетрясений разной силы в качестве эталонов позволило установить наличие прямой зависимости интенсивности перестройки структурного плана линеаментов от времени, места и силы землетрясения, т.е. доказана возможность прямого прогноза места, времени и силы землетрясения при помощи линеаментного анализа космических изображений [1—3].

В настоящей работе изложены результаты дальнейших исследований, направленных на уточнение продолжительности подготовительной и завершающей стадий сильных землетрясений, а также возможности прогноза силы готовящегося землетрясения. Были проанализированы системы линеаментов и их розы-диаграммы, построенные по результатам автоматизированного дешифрирования космических изображений. Анализировались изображения спутника TERRA (аппаратура MODIS, пространственное разрешение 250м, спектральный диапазон 620—670 нм), полученные во время прохождения, а также до и после трех сильных землетрясений, свершившихся в штате Калифорния в США в зоне разлома Сан-Андреас: 9 сентября 2001 г. (магнитуда 4.2) в западной части Поперечных Хребтов; 22 февраля 2003 г. (магнитуда 5.4) в восточной части Поперечных Хребтов и 22 декабря 2003 г. (магнитуда 6.5) в районе города Сан-Симеона.

При проведении обработки были проанализированы изменения количества выявленных согласных и секущих по отношению к разлому Сан-Андреас линеаментов в подготовительную и завершающую стадии, а также изменение их соотношений при разных порогах, т.е. при разных уровнях степени выраженности линеаментов.

На рис. 1 приведены кривые изменения общего количества согласных (а) и секущих (б) линеаментов, а также их суммы (в) для всех трех изученных землетрясений, начиная за 4—5 месяцев до землетрясения и заканчивая через 3—4 месяца после него. Во время мониторинга складывались неблагоприятные погодные условия (сильная облачность). Поэтому анализировались только космические изображения, пригодные для выполнения автоматизированного линеаментного анализа (с почти полным отсутствием облачности).

Анализ представленных кривых показывает, что все они изменяются вполне закономерно: увеличивается количество согласных и секущих линеаментов и их сумм при приближении к моменту землетрясения, а затем происходит их постепенное уменьшение. При этом изменение количества согласных линеаментов происходит достаточно равномерно (спокойно). Лишь для землетрясения, состоявшегося 09 сентября 2001 г. наблюдается резкое ускорение роста количества линеаментов за 1 месяц до землетрясения (рис. 1а). Секущие линеаменты более динамичны (их число изменяется более быстро). Во всех трех исследованных случаях наблюдается резкое увеличение количества секущих линеаментов за 1 месяц до землетрясения и спад примерно через 20 дней или один месяц после него. Наиболее резкое увеличение числа этих линеаментов характерно для землетрясений, состоявшихся 09 сентября 2001 г. и 22 декабря 2003 г. (рис. 1б). Суммирование количества выявленных согласных и секущих линеаментов еще более отчетливо подчеркивает закономерное увеличение их общего числа к моменту землетрясения с достижением максимума за 20 дней — 1 месяц до землетрясения.

Весьма примечательным является тот факт, что при пороге 85 наиболее резкое суммарное увеличение имеют линеаменты, формирование которых обусловлено полем напряжений более слабых землетрясений, произошедших 09 сентября 2001 г. (магнитуда 4.2) и 22 февраля 2003 г. (магнитуда 5.4) (рис. 1в). При пороге 100 (рис. 2) картина в целом сохраняется, т.е. также наблюдается общий рост количества согласных и секущих линеаментов, а также их суммы при приближении к моменту землетрясения. Однако этот рост происходит значительно медленнее. Для наиболее слабого землетрясения, произошедшего в запад-

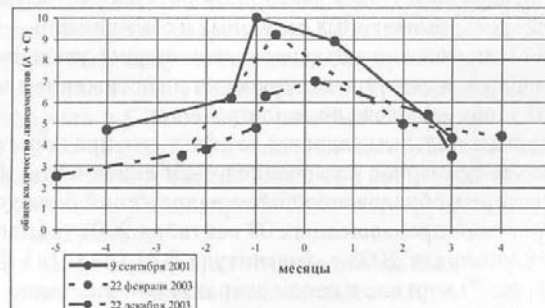
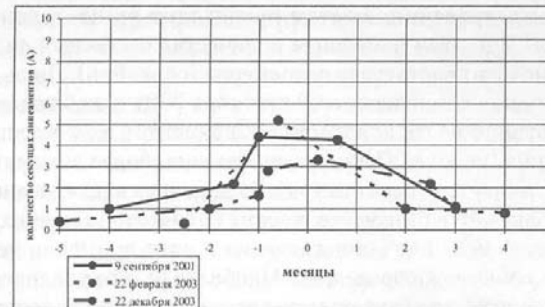
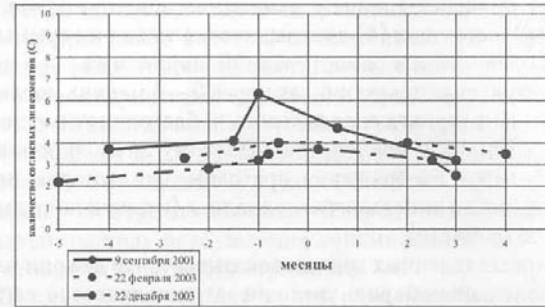
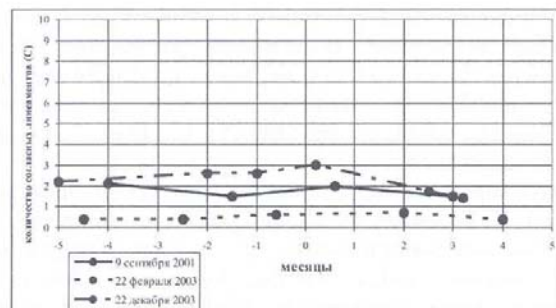
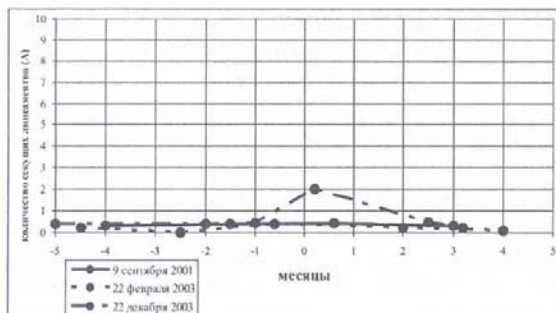


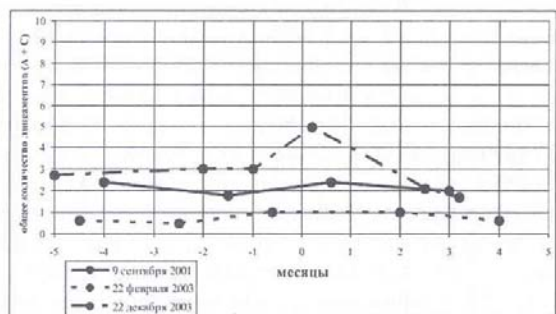
Рис. 1. Кривая изменения количества отдешифрованных линеаментов при пороге 85 в периоды подготовки и завершения землетрясения: а — согласные линеаменты (С), б — секущие линеаменты (А), в — общее количество линеаментов (А + С)



а



б



в

Рис. 2. Кривая изменения количества отдиффированных линеаментов при пороге 100 в периоды подготовки и завершения землетрясения: а — согласные линеаменты (С), б — секущие линеаменты (А), в — общее количество линеаментов (А + С)

ной части Поперечных Хребтов 09 сентября 2001 г. (магнитуда 4.2), наблюдается даже относительное уменьшение согласных линеаментов примерно за 1.5 месяца до начала землетрясения. Отличительной особенностью по сравнению с результатами, полученными при пороге 85, является то, что наибольшее количество согласных и секущих линеаментов присуще эпохе самого сильного из проанализированных землетрясений, произошедшего около г. Сан-Симеон 22 декабря 2003 г. (магнитуда 6.5).

Как было показано в работах [1—3] и как следует из полученных зависимостей (рис. 1, 2), наиболее резко изменяется количество секущих линеаментов при всех исследованных порогах (85 и 100).

На рис. 3 приведены зависимости, характеризующие изменение соотношений секущих и согласных линеаментов в периоды подготовки и завершения трех изученных землетрясений при пороге 85. Как следует из этого рисунка, величина отношения секущих (А) линеаментов к согласным (С) непрерывно растет при приближении к моменту землетрясения, достигая максимальных значений за 20—30 дней до него и после него (рис. 3). Обращает на себя внимание уменьшение величины отношения А/С за 2,0—2,5 месяца до землетрясений, состоявшихся 22 февраля 2003 г. и 22 декабря 2003 г. Через 20—30 дней после землетрясений величина А/С начинает резко уменьшаться в течение 2,5—3 месяца и достигает примерно того же значения, которое она имела за 2,5—3 месяца до землетрясений.

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 3, следует, что величина А/С больше для более сильных землетрясений. Данная закономерность еще четче проявляется при построении кривых А/С для порога 100 (рис. 4). В этом случае на космических изображениях выделяются лишь наиболее протяженные линеаменты, обладающие наибольшей степенью выраженности. При пороге 100 максимальная величина А/С характерна для наиболее сильного землетрясения, состоявшегося 22 декабря 2003 г. (магнитуда 6.5). Немного меньше величина А/С для относительно более слабого землетрясения, произошедшего 22 февраля 2003 г. (магнитуда 5.4). И совсем небольшая величина характерна для наиболее слабого (из изученных) землетрясения 09 сентября 2001 г. (магнитуда 4.2). Выявленная закономерность мо-

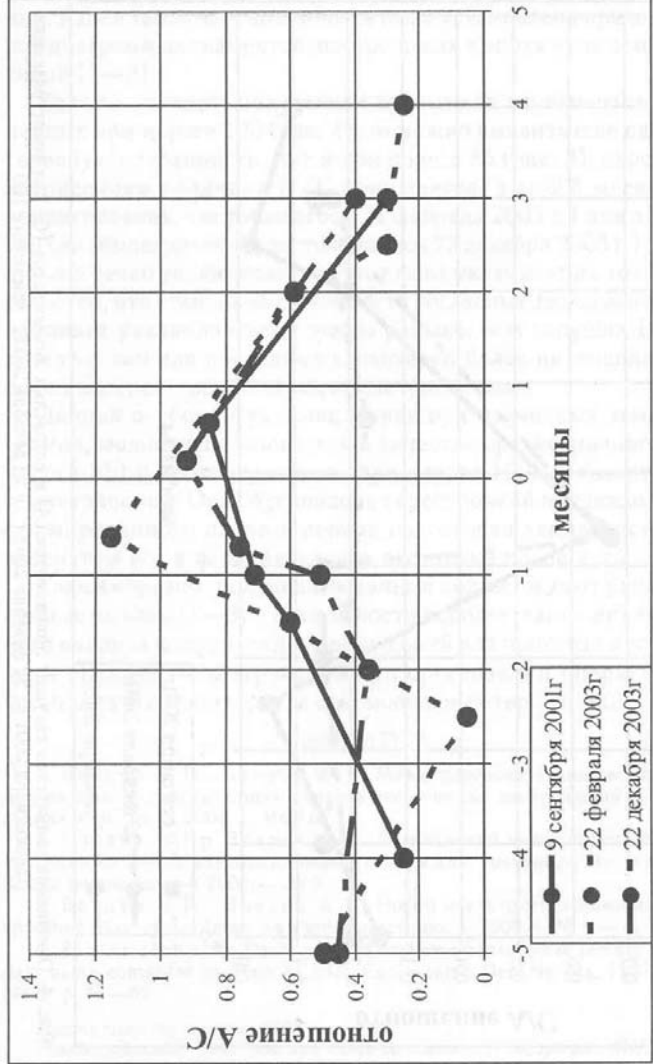


Рис. 3. Отношение количества секущих линейментов (А) и согласных линейментов (С) при землетрясениях 09 сентября 2001 г., 22 февраля 2003 г., и 22 декабря 2003 г. при пороге 85

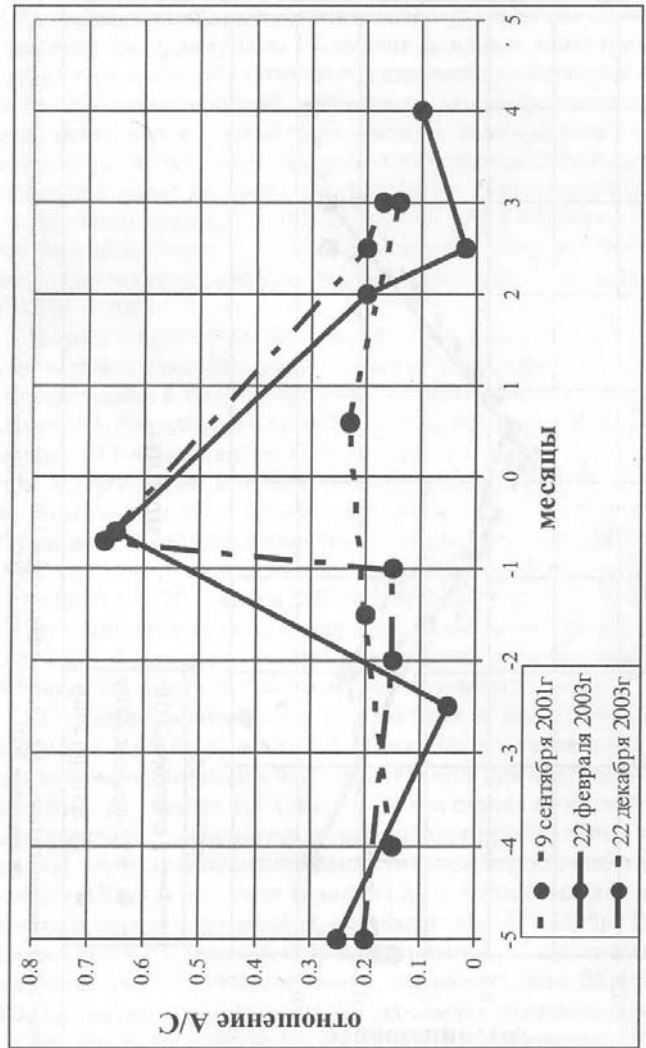


Рис. 4. Отношение количества секущих линейментов (А) и согласных линейментов (С) при землетрясениях 09 сентября 2001 г., 22 февраля 2003 г., и 22 декабря 2003 г. при пороге 100

жет быть использована при прогнозировании силы землетрясения. Ранее такая закономерность была установлена при анализе роз-диаграмм линеаментов, построенных в эпохи этих землетрясений [1—3].

Если сопоставить полученные кривые для линеаментов, выделенных при пороге 100 (рис. 4), то можно выявить еще одну интересную особенность. Как и при пороге 85 (рис. 3), перед землетрясением величина A/C понижается, а за 2,5 месяца (до землетрясения, состоявшегося 22 февраля 2003 г.) или за 1 месяц (до землетрясения, состоявшегося 22 декабря 2003 г.) эта величина резко увеличивается. Этот факт указывает на то обстоятельство, что степень выраженности согласных линеаментов (C) начинает увеличиваться гораздо раньше, чем секущих (A), но вместе с тем для последних характерен более интенсивный ее рост непосредственно перед землетрясением.

Данная особенность, выявленная при изученных землетрясениях, может использоваться в качестве среднесрочного (при пороге 85) и краткосрочного (при пороге 100) предвестников землетрясений. Она обусловлена перестройкой напряженно-деформированного плана в период подготовки землетрясения и возвратом его в первоначальное состояние после него.

Таким образом, полученные данные подтверждают ранее сделанные выводы [1—3] о возможности использования линеаментного анализа космических изображений для прогноза места, силы и времени землетрясения при организации оперативного космического мониторинга сейсмоопасных территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Доклады Академии наук, 2005, т. 402 (№ 1).
2. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование Земли из космоса. — 2005. — № 3.
3. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Новый метод прогнозирования землетрясений. Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2005. — № 1. — С. 76—83.
4. Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA: Computers & Geosciences, 1997, v. 23, No. 1, p. 45—62.

Поступила 14 апреля 2005 г.

Рекомендована кафедрой природопользования и географии МИИГАиК.