

ГЕОФИЗИКА

УДК 528.711.1(202);550.34

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2005 г. Академик В. Г. Бондур, А. Т. Зверев

Поступило 15.12.2004 г.

Предлагается метод прогнозирования землетрясений, основанный на использовании результатов автоматизированного линеаментного анализа изображений, полученных при космическом мониторинге сейсмоопасных территорий. Установлено, что динамика изменения систем линеаментов в период подготовки землетрясений может использоваться в качестве предвестника землетрясений. При этом предполагается, что системы линеаментов, выраженные в виде линейных текстур космических изображений, тесно связаны с системами сейсмогенных разрывов и реагируют на изменение планов деформаций, которые обусловлены изменением поля напряжений земной коры перед землетрясением и в момент его завершения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовались землетрясения, которые произошли с 2001 по 2004 г. на территории штата Калифорния (США). В качестве исходных материалов для анализа использовались серии оптических изображений, полученных со спутника TERRA (аппаратура MODIS, пространственное разрешение 250 м, спектральный диапазон 620–670 нм). Каждое такое изображение охватывало обширную территорию, протяженность которой составляла более 2000 км. Это позволяло по одному и тому же изображению одновременно изучать разные сейсмогенные участки, например, таких протяженных сейсмических зон, как разрыв Сан-Андреас. Таким образом, анализируемые серии космических изображений позволяли обеспечить реальный сейсмический мониторинг, основывающийся на использовании однотипной информации и одновременном слежении за всей сейсмоопасной территорией на протяжении достаточно значительного периода времени.

Пространственное разрешение изображений (250 м), полученных при помощи аппаратуры

Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос", Москва

MODIS, имеет свое преимущество. Оно обусловлено, в первую очередь, возможностью использовать одно из весьма важных качеств космических изображений – интеграционный (суммирующий) эффект, или эффект генерализации. Данный эффект возникает благодаря тому, что в одном пикселе изображения суммируются (интегрируются) все неоднородности ландшафта (микроландшафта), которые вызваны тем или иным явлением. В случае использования космических изображений, полученных аппаратурой MODIS, в одном пикселе фиксируются все микроландшафтные неоднородности на площади $250 \times 250 \text{ м}^2$.

При исследовании линеаментной тектоники каждая отдельно взятая микротрещина или деформация поверхности Земли не видна на космическом изображении из-за своих малых поперечных размеров и очень малого влияния на структуру и текстуру такого изображения. Но когда в одном пикселе изображения фиксируется не одна микротрещина или деформация, а целая серия (зона) трещин и деформаций поверхности Земли, а также связанные с ними микроландшафтные преобразования земной поверхности на участке $250 \times 250 \text{ м}^2$, то данные показатели становятся уже вполне значимыми и находят свое выражение в текстуре получаемых из космоса изображений сейсмоопасных зон.

При выделении линеаментов на космических изображениях обычно используют специальное программное обеспечение, которое предназначено для автоматизации анализа материалов дистанционного зондирования поверхности Земли. Мы использовали программу LESSA [1, 2], которую специально модифицировали для проведения обработки.

Первым шагом анализа было обнаружение в анализируемых фрагментах космических изображений линейных элементов (штрих-линеаментов), которые соответствуют спрямленным участкам границ областей разной яркости. Для каждой точки линеамента определялось соответствующее направление.

На основе штрих-линеаментов формировались так называемые сквозные линеаменты, пе-

рессекающие все изображение. Если штрих-линеаменты выявлялись при нулевом пороге, то сквозные линеаменты выделяются при больших порогах, общее число которых составляет более 200. Чем больше порог, тем меньше штрихов, так как выделяются относительно более крупные линеаменты, а короткие линеаменты не отображаются. Благодаря этому появляется возможность просматривать линеаменты разных иерархических уровней (от локальных до макрорегиональных и глобальных), отбирать их по направлению и степени выраженности, составлять из них схемы. В данных исследованиях в основном использованы пороги 85 и 100.

На основании накопленного опыта установлено, что для выявления сквозных линеаментов оптимальными размерами фрагментов изображений являются размеры от 400×400 до 1000×1000 пикселей. На изображениях больших размеров линеаменты либо не сквозные (не пересекают все изображение), либо не прямые из-за слишком большой области анализа или из-за слишком высокого разрешения.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований охватывал калифорнийскую часть Прибрежной (Притихоокеанской) зоны кайнозойской и мезозойской складчатости, захватывающей побережье Тихого океана и полосу шельфа. В рельефе Прибрежная зона выражена относительно невысокими Береговыми хребтами (поднятиями) и межгорными долинами (впадинами).

Примечательной особенностью структурного плана Прибрежной зоны является развитие в пояссе севернее Лос-Анджелеса крупных тектонических структур субширотного, почти поперечного к господствующему простиранию направления, выраженных поднятием Поперечных хребтов. Эти поперечные структуры лежат на прямом продолжении к востоку крупной зоны широтных разломов Тихого океана – трансокеанической зоны Меррей [3].

Наряду с данными широтными тектоническими линеаментами очень большое значение в структуре и в тектонической истории Калифорнии принадлежит разрыву Сан-Андреас, который является правобоковым сдвигом. Геодезические измерения показали неравномерность движений по протяжению разлома со скоростью до 2–5 см/год [4]. Среднее простирание разлома СЗ–ЮВ составляет острый угол с общим простиранием тектонических структур Калифорнии ССЗ–ЮЮВ. На участке пересечения Поперечных хребтов зона разрыва Сан-Андреас заметно отклоняется в широтном направлении, причем у южного конца Сьерра-Невады под углом, близким к прямому,

от разлома Сан-Андреас ответвляется разлом Гарлок ЗЮЗ–ВСВ-го простирания. Очаги землетрясений, приуроченные к разрыву Сан-Андреас, лежат, как правило, на глубине, не превышающей 16 км, т.е. всецело в пределах земной коры.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Учитывая рассмотренную особенность формирования космических изображений среднего пространственного разрешения и геологические особенности строения исследуемого района, рассмотрим основные результаты автоматизированного линеаментного анализа космических изображений, полученных в периоды подготовки и завершения четырех землетрясений, произошедших на территории штата Калифорния с 2001 по 2004 г.

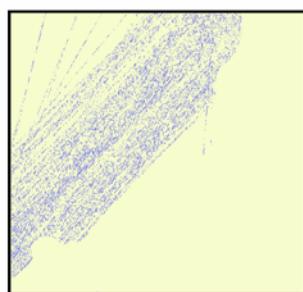
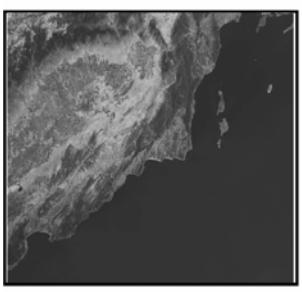
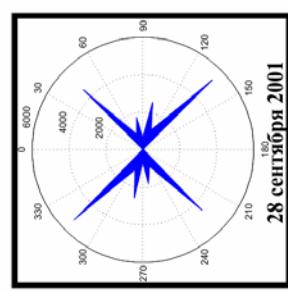
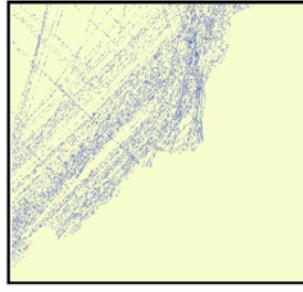
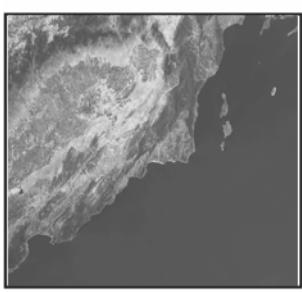
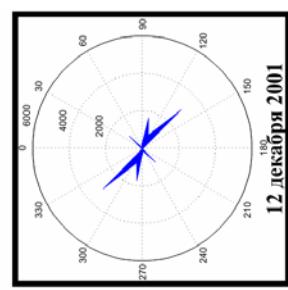
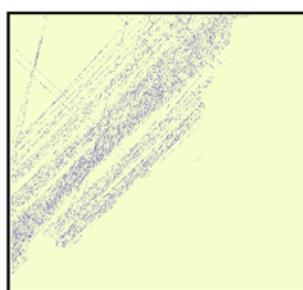
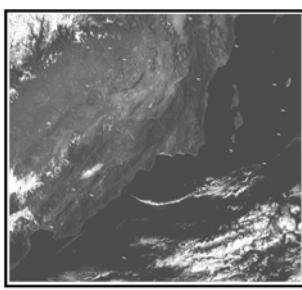
Вначале рассмотрим динамику систем линеаментов, выявленную при изучении землетрясения относительно небольшой силы (магнитуда 4.2), произошедшего 9 сентября 2001 г. в западной части Поперечного хребта.

С целью изучения динамики систем линеаментов, связанных с подготовкой этого землетрясения, проанализируем (при пороге 85) серии изображений, 5 из которых приведены в качестве примеров на рис. 1: за 4 (08.05.2001 г.), почти за 1.5 (01.08.2001 г.) и за 1 месяц (12.08.2001 г.) до землетрясения, а также через 19 дней (28.09.2001 г.) и через 3 месяца (12.12.2001 г.) после землетрясения.

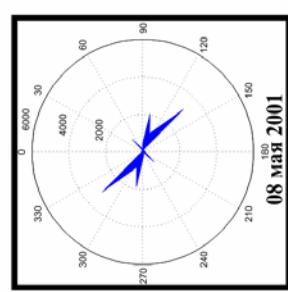
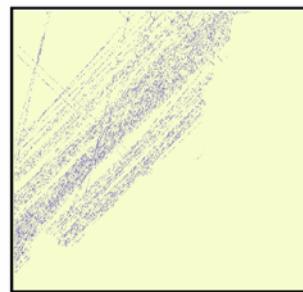
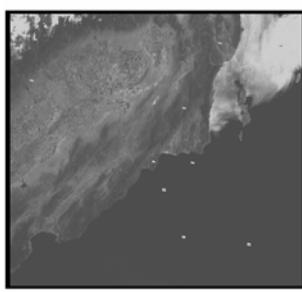
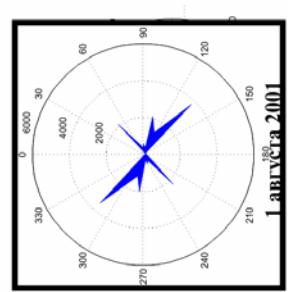
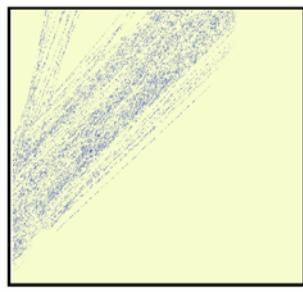
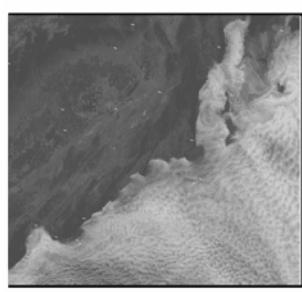
Из-за большой облачности не удалось получить космическое изображение в день самого землетрясения и ближайшие к нему дни. Относительно безоблачная погода установилась лишь 28 сентября, т.е. через 19 дней после землетрясения.

На всех схемах линеаментов и розах-диаграммах направленности линеаментов, полученных в результате автоматизированного линеаментного анализа космических изображений, присутствуют три основные направления (см. рис. 1). Первое, наиболее устойчивое направление, выявленное на всех приведенных розах-диаграммах, совпадает с общим (средним) простиранием разрыва Сан-Андреас (СЗ–ЮВ). Второе и третье направления по отношению к первому являются секущими (кососекущими и поперечными, т.е. секущими почти под прямым углом зону Сан-Андреас). Интересным фактом является то обстоятельство, что на розах-диаграммах не нашли своего выражения субмеридиальные дизъюнктивные дислокации (трещины и разрывные нарушения), связанные с тектоническим развитием кайнозойских Береговых хребтов и впадин и мезозойских геологических структур Сьерра-Невады и Большого Бассейна.

На всех приведенных на рис. 1 схемах линеаментов и розах-диаграммах (рис. 1) отчетливо вы-



Плотности линеаментов



Фрагменты исходных изображений

Розы-диаграммы направленности линеаментов

Рис.1. Динамика систем линеаментов в период подготовки и завершения землетрясения 09 сентября 2001 г. (магнитуда 4,2) около г. Сан-Симеон (на этом рисунке даны космические изображения, схемы плотностей линеаментов и розы-диаграммы направленности

ражена закономерная картина поведения линеаментов: рост количества и размеров кососекущих и поперечных линеаментов к началу землетрясения и их уменьшения после него. Весь цикл роста количества и размеров занимает промежуток времени в несколько месяцев.

Наибольшей динамичностью из всех изученных согласных с разрывом Сан-Андреас и секущих (несогласных) систем трещин обладают поперечные и близкие к ним кососекущие системы. Поэтому можно предположить, что именно их прежде всего следует рассматривать в качестве предвестников, на основе обнаружения и мониторинга которых можно построить систему среднекраткосрочного прогноза землетрясений.

Для подтверждения данного предположения рассмотрим результаты автоматизированного линеаментного анализа космических изображений, полученных в периоды подготовки и завершения других сильных землетрясений в Калифорнии, произошедших в 2003–2004 гг.

22 февраля 2003 г. в восточной части Поперечного хребта произошло землетрясение с магнитудой 5.2. Ближайшее к моменту землетрясения космическое изображение с небольшой облачностью получено 3 февраля 2003 г., т.е. за 19 дней до него.

Анализ схем линеаментов и роз-диаграмм (рис. 2), построенных по результатам автоматизированной обработки изображений, которые получены за 2.5 месяца (04.12.2002 г.) и за 19 дней (03.02.2003 г.) до землетрясения, а также почти через месяц (20.03.2003 г.), через 2 (19.04.2003 г.) и через 4 (25.06.2003 г.) месяца после него, подтверждают закономерность динамики линеаментов, выявленную при анализе землетрясения, произошедшего 9 сентября 2001 г. на западе Поперечного хребта.

За 2.5 месяца до землетрясения и через 4 месяца после него количество и размеры кососекущих и поперечных линеаментов минимальны. Максимальное их количество наблюдается за 19 дней до землетрясения (3 февраля 2003 г.), а через 2 месяца после него (19 апреля 2003 г.) отмечается уже заметное уменьшение их роли (рис. 2).

Подобная же закономерность отмечалась и при сильном землетрясении (магнитуда 6.5), произошедшем 22 декабря 2003 г. в районе г. Сан-Симеон (рис. 3). Космическое изображение с малой облачностью получено через 5 дней после землетрясения. Это время характеризуется максимальным развитием кососекущих и поперечных систем линеаментов. За месяц (22 и 25 ноября 2003 г.) и 2 месяца (21 октября 2003 г.) до землетрясения, а также через 3 месяца (27.03.2004 г.) после него секущие линеаменты выражены гораздо слабее.

Проведем анализ результатов обработки космических изображений для сильного землетрясения

(магнитуда 6.0), произошедшего 28 сентября 2004 г. к северо-востоку от г. Сан-Симеон в районе г. Паркфилд. Лето 2004 г. отличалось повышенной сейсмичностью во всей южной части Калифорнии. Лишь в сентябре произошло 10 сильных толчков с магнитудами 4.5–6.0. Иногда в один день случалось по 2–3 сильных толчка. Ближайшие к землетрясению, состоявшемуся 28 сентября 2004 г., сильные землетрясения произошли 18, 20, 29, 30 сентября и 8 октября 2004 г. (магнитуды >4.5). 28 сентября в районе Паркфилда зарегистрировано множество толчков, в том числе 5 с магнитудой более 4.

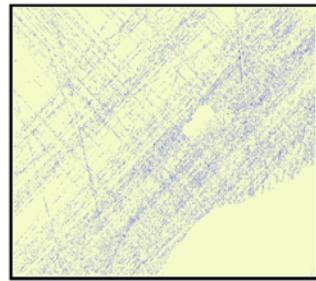
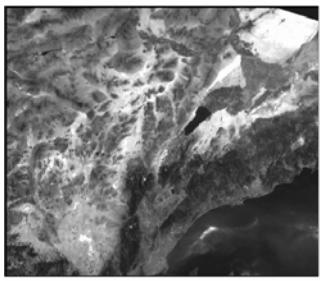
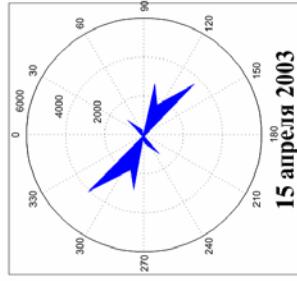
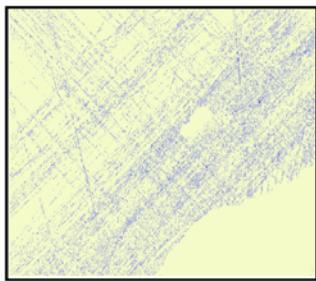
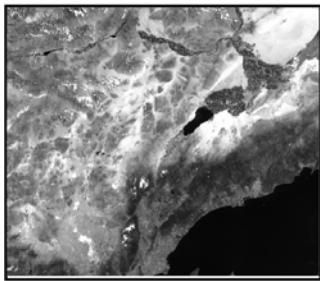
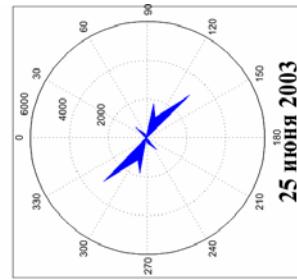
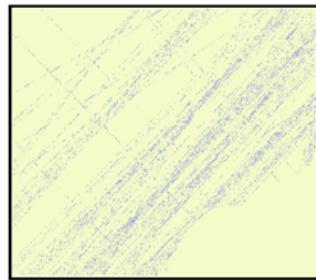
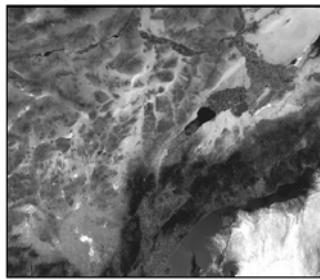
Подобная напряженная сейсмическая обстановка нашла свое отражение в динамике систем линеаментов, выявленных при автоматизированном анализе космических изображений. Анализировались космические изображения за период с 28 августа по 10 октября 2004 г. На рис. 4 в качестве примеров приведены результаты обработки изображений, полученных 21, 24, 26 и 28 сентября, а также 1 и 4 октября 2004 г.

Секущие линеаменты хорошо выражены на всех схемах и розах-диаграммах линеаментов, кроме 4 октября 2004 г. Максимальное выражение они имеют для данных, полученных 24 сентября 2004 г., т.е. за 4 дня до двух сильных толчков (магнитуды 6.0 и 5.1), случившихся 28 сентября 2004 г.

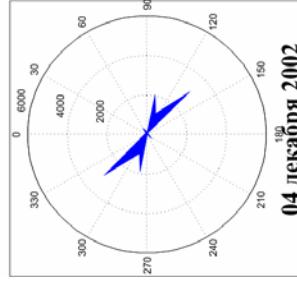
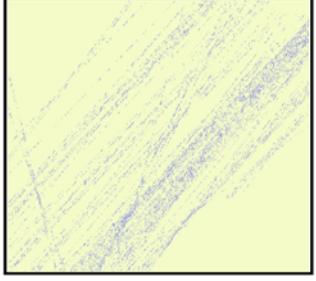
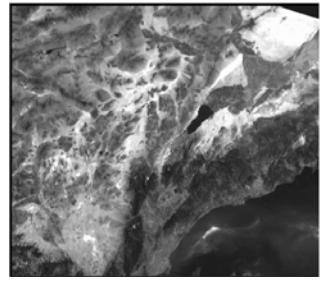
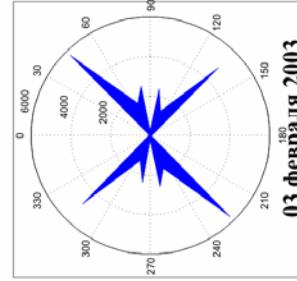
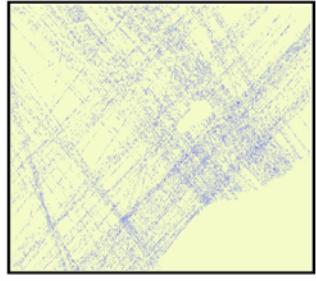
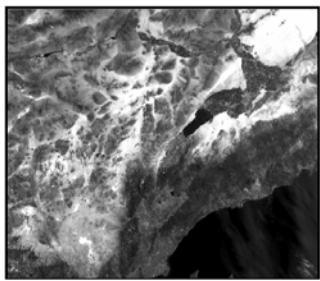
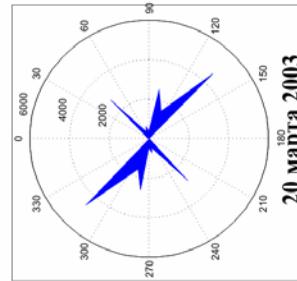
Некоторое незначительное снижение количества и размеров секущих линеаментов в день самых сильных толчков (28 сентября 2004 г.) и сразу же после них (4 октября 2004 г.), возможно, обусловлено сейсмотектоническими особенностями развития сейсмогенных разрывов на третьей заключительной стадии развития трещинообразования, когда происходит лавинообразная локализация трещин и разрушение горных пород (землетрясение) [5–7].

Автоматизированный линеаментный анализ космических изображений позволил выявить наличие четкой закономерности в изменении систем линеаментов в период подготовки землетрясений и после их завершения. В период подготовки значительно увеличивается роль секущих по отношению к основному разрыву (Сан-Андреас) линеаментов. 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. Система линеаментов приходит в первоначальное состояние за 2–3 месяца, т.е. период успокоения по продолжительности примерно равен периоду возбуждения сейсмической активности при подготовке сильного землетрясения.

Использование в качестве эталонов землетрясений разной силы позволило установить нали-

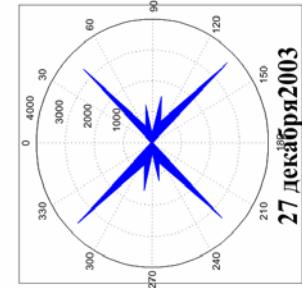
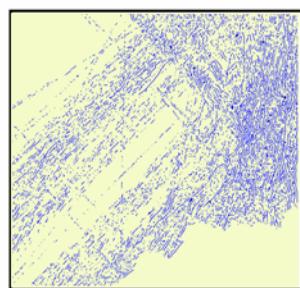
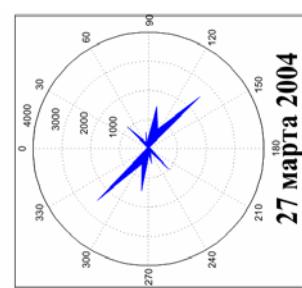
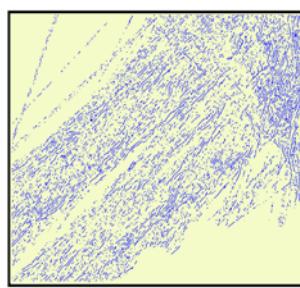
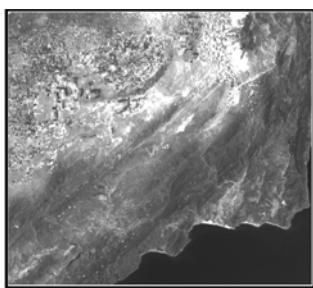


Плотности линеаментов

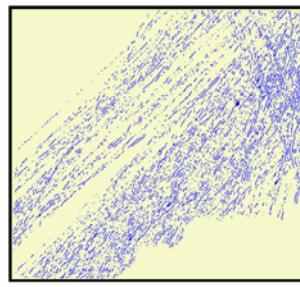


Розы-диаграммы направленности линеаментов

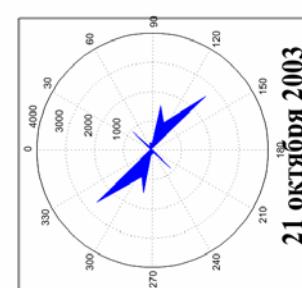
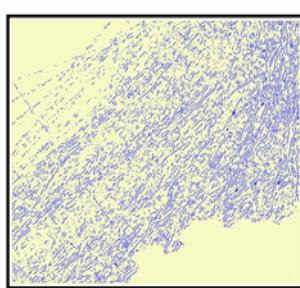
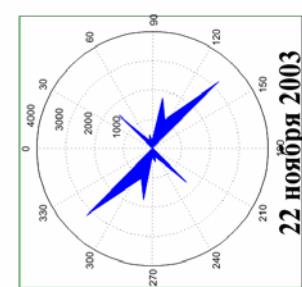
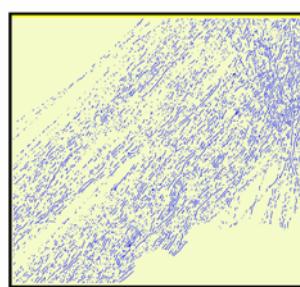
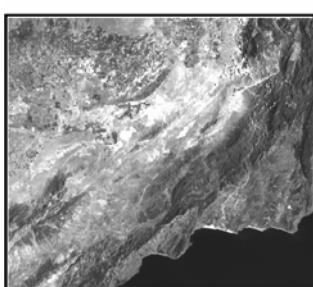
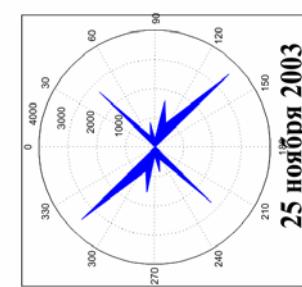
Рис.2. Динамика систем линеаментов в период подготовки и завершения землетрясения 22 февраля 2003г. (магнитуда 5,2) в восточной части Поперечного хребта (на этом рисунке даны космические изображения, схемы плотностей линеаментов и розы-диаграммы направленности линеаментов).



Розы-диаграммы направленности линеаментов



Плотности линеаментов



Фрагменты исходных изображений

Рис.3. Динамика систем линеаментов в период подготовки и завершения землетрясения 22 декабря 2003 г. (магнитуда 6,5) в западной части Поперечного хребта (г. Сан-Симеон) (на этом рисунке даны космические изображения, схемы плотности линеаментов и розы-диаграммы направленности линеаментов).

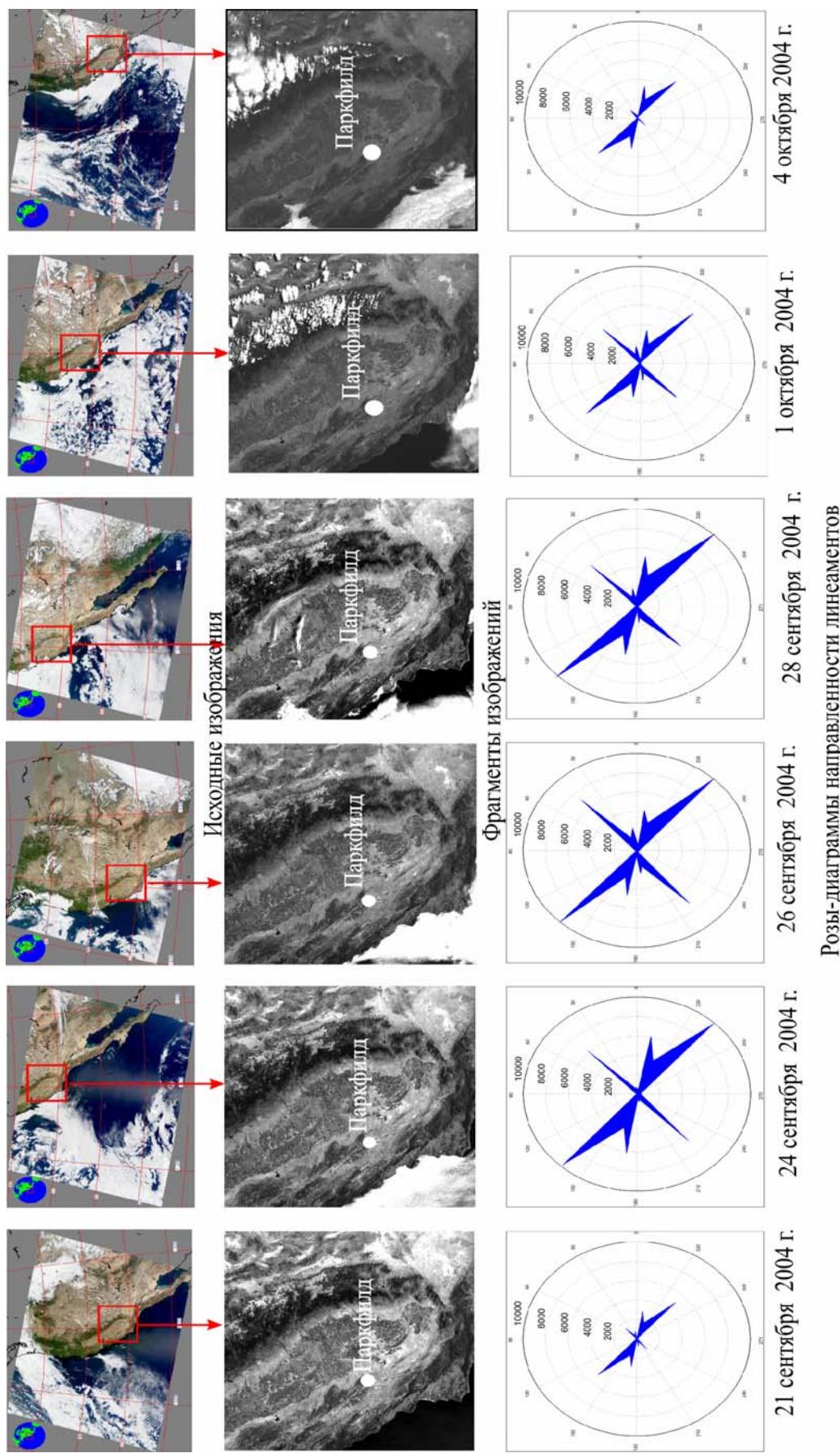


Рис.4. Динамика систем линеаментов в период подготовки и завершения землетрясения 28 сентября 2004 г. (магнитуда 5,0) в районе г. Паркфилда. (на этом рисунке даны исходные космические изображения, обрабатываемые фрагменты и розы-диаграммы направленности линеаментов).

чие прямой зависимости интенсивности перестройки структурного плана линеаментов от времени, места и силы землетрясения, т.е. открывается возможность прямого прогноза места, времени и силы землетрясения с использованием метода линеаментного анализа космических изображений.

В целом выполненные исследования показали, что линеаменты, выявляемые по космическим изображениям, являются средне-краткосрочными предвестниками землетрясений и на их базе возможна организация космического сейсмического мониторинга.

Автоматизированный линеаментный анализ космических изображений обладает большой достоверностью, оперативностью и экономической эффективностью. Сейсмический мониторинг, осуществляемый на основе такого анализа, может позволить (в сочетании с другими методами) прогнозировать не только время, но силу и место землетрясения. Для этого необходимо исследовать всю сейсмоопасную зону (территорию) по методу скользящего окна, т.е. дешифровать взаимоперекрывающиеся участки на всем протяжении разрывов типа Сан-Андреас. На том участке, на котором выявляется максимальное развитие кососекущих и поперечных линеаментов, будет максимальная

сила толчков и находится эпицентр землетрясения.

Таким образом, проведенные исследования показали, что линеаменты, выявляемые при автоматизированном анализе космических изображений, могут использоваться в качестве предвестников при организации службы космического сейсмического мониторинга для определения времени, силы и места землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный линеаментный анализ природных линеаментных систем. Л.: ВСЕГЕИ, 1988. 131 с.
2. Zlatopolsky A. // Comput. Geosci. 1997. V. 23. № 1. P. 45–62.
3. Хайн В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 604 с.
4. Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры. М.: Наука, 1977. 240 с.
5. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геологической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
6. Mogi K. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
7. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.