

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

УДК 528.711.1(202):550.34

# КОСМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ СИСТЕМ ЛИНЕАМЕНТОВ

© 2005 г. В. Г. Бондур\*, А. Т. Зверев

Научный центр проблем аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", Москва

Тел.: (095)632-16-54; e-mail: vgbondur@online.ru

Поступила в редакцию 28.02.2005 г.

Предложен метод прогноза землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений сейсмоопасных территорий. Приводятся результаты исследования динамики систем линеаментов по космическим изображениям, полученным на период подготовки и завершения ряда землетрясений, произошедших в 2001–2004 гг. в Калифорнии (США) и Перу. Установлено увеличение степени выраженности систем линеаментов при подготовке землетрясения, которое начинается за 2–3 мес. и достигает максимума в среднем за 20 дней до него. После землетрясения степень выраженности линеаментов постепенно понижается и примерно через 2–3 мес. достигает прежнего состояния. С учетом зависимости характера изменения систем линеаментов от геологических и геодинамических особенностей региона, предложено формировать эталоны изменений линеаментов в период подготовок ранее случившихся землетрясений в конкретных регионах.

### ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения являются одними из наиболее опасных явлений в природе. Это связано с внезапностью их возникновения, с угрозой для жизни людей, а также с вызываемыми ими негативными экологическими и экономическими последствиями [1, 2]. Несмотря на высокий уровень развития современных методов прогноза землетрясений и большие затраты, вкладываемые в решение этой проблемы, эффективность такого прогноза все еще остается весьма низкой.

В связи с этим в настоящее время важнейшей задачей является поиск новых предвестников землетрясений и создание теории их прогноза (предсказания). Основные цели такого прогноза – определение места, интенсивности и времени возникновения землетрясений. Для решения этой задачи необходимы разработка эффективных методов мониторинга предвестников землетрясений, выяснение их природы, создание адекватных моделей, описывающих эти предвестники, и разработка эффективной стратегии прогноза землетрясений.

В настоящее время наряду с традиционными методами мониторинга, используемыми в сейсмологии, разрабатываются и внедряются новые методы, в том числе космические [1, 3–5]. Применение космических методов ввиду их специфики является более эффективным и экономически более выгодным, чем создание широкой сети наземных сейсмических станций.

В настоящей работе предлагается новый метод прогноза землетрясений на основе использования в качестве предвестника динамики линеаментов, выделяемых по космическим изображе-

ниям. Этот метод в сочетании с другими методами может быть использован при мониторинге сейсмоопасных территорий.

### ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЛИНЕАМЕНТОВ И ИХ ДИНАМИКА В СЕЙСМИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ

Линеаменты и линеаментные зоны по протяженности подразделяются на глобальные, трансконтинентальные, региональные и локальные. Глобальные и трансконтинентальные линеаменты и зоны представляют собой гигантские глубинные неоднородности литосферы и имеют протяженность порядка тысяч километров. Региональные и локальные линеаменты имеют меньшую протяженность и могут отражать трещиноватость, а также релаксации местных, характерных для данного региона, напряжений [6].

Универсальной особенностью линеаментов является их объединение в некоторые системы, которые влияют на особенности гидросети и других элементов ландшафтов и структуры литосферы. На космических изображениях линеаменты представляются в виде спрямленных участков границ областей разной яркости и других линейно-ориентационных характеристик текстуры [4, 5–7].

Степень выраженности на космических изображениях разноориентированных линеаментных зон в системах, т.е. их "физиономичность", разная. Она зависит как от уровня генерализации и спектральных диапазонов этих изображений, так и от петрофизических контрастов, обусловленных разной обводненностью зон трещиноватости

и прилегающих горных пород. Так как оптические контрасты сухих и сырьих грунтов увеличиваются с увеличением длины волны, то при выделении линеаментов целесообразнее использовать красную или ближнюю инфракрасную (ИК) зоны спектра электромагнитных волн [7].

Исследования последних лет (например [8]) выявили вполне определенные закономерности пространственных ориентировок систем линеаментов. Установлено, что простижение линеаментных систем повышенной и пониженной плотности четко увязывается с пространственной ориентацией самих горно-складчатых систем, обрамляющих и разделяющих их впадин, а также с их внутренней структурно-формационной и неотектонической зональностью, с положением крупнейших разрывных нарушений и складок. Кроме того, в складчатых областях большую роль играют поперечные (секущие) разрывные нарушения, ориентированные диагонально и ортогонально к общему направлению складчатых зон. Платформенные же области характеризуются протяженными системами линеаментов, в основном диагональных простираций, иногда осложненными нарушениями ортогональной ориентировки и даже криволинейной конфигурации. Они характеризуются более резкой и равномерной сетью протяженных линеаментов, в значительной мере отражающей планетарную трещиноватость.

В сейсмических областях степень выраженности разноориентированных линеаментных зон постоянно меняется в зависимости от характера поля напряжений в периоды подготовки и завершения землетрясений. Землетрясения происходят в результате концентрации внутрикоровых напряжений и их катастрофической разрядки. Поле напряжений в сейсмогенной зоне при этом изменяется, что приводит к закономерному изменению обусловленных им систем линеаментов. Данная особенность является геодинамическим индикатором-предвестником готовящегося землетрясения. Происходящую при этом перестройку систем линеаментов можно регистрировать на космических изображениях при проведении дистанционного мониторинга сейсмоопасных территорий [4, 5].

С целью подтверждения данного заключения в настоящей работе исследована динамика систем линеаментов в эпохи ряда землетрясений, произошедших в 2001–2004 гг. в Калифорнии (США) и Перу.

## МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований использовались серия космических изображений, полученных с

борта спутника "Terra" (аппаратура MODIS и ASTER). Для увеличения объективности полученных результатов проводился автоматизированный линеаментный анализ космических изображений с помощью специальной компьютерной программы. Используемая программа обработки представляла собой модификацию программной системы LESSA [9]. Так как пространственную ориентацию линеаментных зон и ее изменения наиболее наглядно иллюстрируют розы-диаграммы направленности линеаментов, были разработаны дополнительные программные модули, позволяющие получать эти розы-диаграммы при любом задаваемом пороге степени выраженности линеаментов. Кроме этого, в результате модификации программной системы была существенно увеличена скорость обработки, что крайне важно для анализа потоков космических изображений при мониторинге сейсмоопасных территорий [4, 5].

В процессе исследований вначале была изучена информативность космических изображений, полученных в различных областях спектра: зеленой, красной и ближней ИК. В результате проведенной обработки установлено, что в исследуемых сейсмических регионах локальные линеаменты лучше всего выражаются на космических изображениях, сформированных в зеленой зоне спектра, а региональные, как правило, в ближнем ИК-диапазоне [4, 5]. Поэтому с целью сохранения максимальной информативности космических изображений и экономии времени на их обработку было принято решение использовать, главным образом, промежуточную – красную – зону спектра:  $\Delta\lambda = 620\text{--}670 \text{ мкм}$  (для аппаратуры MODIS) и  $\Delta\lambda = 630\text{--}690 \text{ мкм}$  (для аппаратуры ASTER).

Для линеаментного анализа сейсмических зон в Калифорнии использованы космические изображения, полученные при помощи аппаратуры MODIS с пространственным разрешением 250 м, а для землетрясения на территории Перу анализировались изображения, полученные при помощи аппаратуры ASTER с пространственным разрешением 15 м.

Результаты специально выполненных исследований показали, что линеаменты лучше всего выявляются на фрагментах космических изображений аппаратуры MODIS, имеющих размеры от  $500 \times 500$  до  $1500 \times 1500$  пикселов [4]. На изображениях большего размера линеаменты могут быть не сквозными (не пересекают все анализируемое изображение) и не прямыми из-за "избыточной" детальности. Поэтому они хуже выявляются при автоматизированном анализе. С учетом этих результатов при обработке космических изображений, полученных с помощью аппаратуры MODIS, брались фрагменты, соответствующие участкам зем-

ной поверхности, имеющим размеры от  $200 \times 200$  до  $300 \times 300$  км $^2$ .

При обработке изображений высокого пространственного разрешения, полученных с помощью аппаратурой ASTER, они "загрублялись" в 4 раза, т.е. вместо пространственного разрешения 15 м получали 60 м. Это приводило к 4-кратному уменьшению общего количества пикселей при линеаментном анализе.

Как показали выполненные ранее исследования [4, 5], использование изображений среднего разрешения вместо высокого имеет свои преимущества, т.к. при этом гораздо полнее учитывается одно из самых ценных свойств космического изображения – эффект генерализации, позволяющий получать информацию интеграционного характера. Данный эффект возникает благодаря тому, что в одном пикселе изображения суммируются (интегрируются) все микронеоднородности ландшафта на большом участке (в нашем случае на участках  $250 \times 250$  и  $60 \times 60$  м $^2$ ), которые вызваны каким-либо явлением или комплексом явлений (например, состоянием почвы, растительного покрова, увлажнения и т.д.). Благодаря этому эффект генерализации позволяет выделять на космических изображениях целые линеаментные зоны по присущим им значимым микроотличиям от окружающей местности. При более высоком пространственном разрешении данных яркостных отличий часто недостаточно, чтобы можно было выявить их при автоматизированном линеаментном анализе.

Методика использования линеаментов в качестве предвестников землетрясений апробировалась на примере нескольких сейсмических зон, отличающихся своими геотектоническими режимами.

Наиболее представительная выборка была сформирована для зоны правосдвигового разлома Сан-Андреас (штат Калифорния, США). Для этого сейсмоопасного района изучена динамика линеаментов на примере пяти землетрясений с различными магнитудами, произошедших здесь с 2001 по 2004 гг.: 9 сентября 2001 г. ( $M = 4.2$ ); 22 февраля 2002 г. ( $M = 5.2$ ); 22 декабря 2003 г. вблизи Сан-Симеон ( $M = 6.5$ ); 18 сентября 2004 г. ( $M = 5.5$ ) и 28 сентября 2004 г. вблизи Паркфилд ( $M = 6.0$ ). Положение эпицентров этих землетрясений, а также основные разломы в Калифорнии [10] приведены на рис. 1.

Кроме этого, исследовалось землетрясение с магнитудой  $M = 5.2$ , состоявшееся в Перу 27 января 2004 г. Координаты его эпицентра:  $17.69^\circ$  ю.ш.;  $70.67^\circ$  з.д.

Во всех случаях использовались космические изображения, полученные со спутника "Тетта" за несколько месяцев до землетрясения, в момент времени, близкий к моменту землетрясения, а также через несколько месяцев после землетрясения.

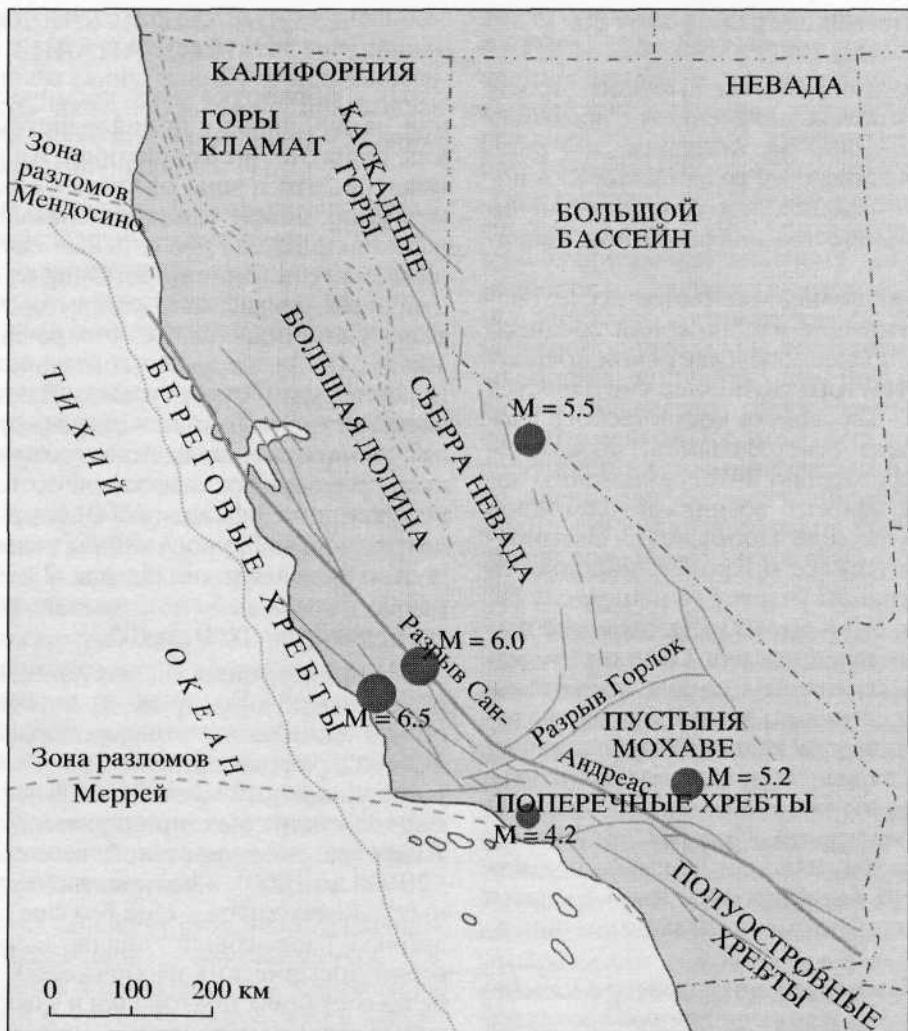
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

При обработке всех космических изображений, полученных для анализируемых сейсмических событий на территории Калифорнии установлено, что в зоне разрыва Сан-Андреас в промежутках между землетрясениями и во время них четко выражены две главные системы сквозных линеаментов (см. рис. 2). Одна из них имеет простижение, согласное с общим простирианием разрыва Сан-Андреас, т.е. северо-запад – юго-восток (СЗ-ЮВ), а другая – согласное с секущими его поперечными структурами. Данная закономерность четко выражена на розах-диаграммах направленности линеаментов (см. рис. 3), построенных при обработке космического изображения, полученного 3 февраля 2001 г. (за 19 дней до землетрясения). На рис. 3 цифры указывают на количество линеаментов. На рис. 2 и 3 представлены результаты обработки, выполненной с различными порогами – от 0 до 105.

На приведенных схемах линеаментов (рис. 2) и розах-диаграммах (рис. 3) хорошо проявляется общее уменьшение степени выраженности линеаментов с ростом значения порога. К примеру, при увеличении порога от 0 до 100 количество линеаментов, согласных (продольных) с разрывом Сан-Андреас, уменьшается более чем в 20 раз (с ~20000 до 1000), а количество секущих (поперечных) линеаментов – еще больше (~ в 30 раз). Подобный "пороговый" анализ выполнен для всех серий космических изображений, полученных на разных стадиях подготовки и завершения всех пяти исследуемых землетрясений, произошедших в Калифорнии в 2001–2004 гг.

На основании анализа результатов обработки всех сформированных серий космических изображений выявлена одна и та же закономерность – чем ближе к моменту землетрясения, тем выше степень выраженности линеаментов, особенно секущих относительно разрыва Сан-Андреас (рис. 4–8). Если в периоды относительного сейсмического затишья между сильными землетрясениями секущие линеаменты исчезают (т.е. не выражены) уже при порогах 80–85, то в период подготовки и завершения землетрясения они проявляются при порогах 100–105, а иногда и при более высоких. Данный эффект будет проиллюстрирован ниже при сравнительном анализе динамики линеаментов во время всех исследуемых землетрясений в Калифорнии (см. рис. 1). Именно эта выявленная особенность в динамике систем линеаментов в период подготовки землетрясений может быть использована в качестве предвестника, позволяющего спрогнозировать время, силу и место землетрясения.

Для всех анализируемых сейсмических событий использовались схемы линеаментов, полу-



**Рис. 1.** Положение разрыва Сан-Андреас и сопряженных с ним разрывов в Калифорнии и эпицентры землетрясений, состоявшихся 9 сентября 2001 г. ( $M = 4.2$ ), 22 февраля 2003 г. ( $M = 5.2$ ), 22 декабря 2003 г. ( $M = 6.5$ ), 18 сентября 2004 г. ( $M = 5.5$ ), 28 сентября 2004 г. ( $M = 6.0$ ).

ченные при пороге 100, а розы-диаграммы – для порога 85. Это сделано с целью осуществления двух уровней фильтрации – нижнего (порог 85), при котором еще выражены секущие линеаменты, и верхнего (порог 100), когда секущие линеаменты в эпохи относительного сейсмического затишья практически не выражены. Такие эффекты хорошо проявляются на приведенных схемах даже при визуальном анализе (см. рис. 4–8).

Проанализируем землетрясения, свершившиеся в Калифорнии в их хронологической последовательности. Землетрясение с магнитудой 4.2 произошло в западной части Поперечных хребтов 9 сентября 2001 г. (см. рис. 1). На рис. 4 представлены результаты автоматизированного линеаментного анализа, который выполнялся при порогах 85 и 100 для нескольких, выбранных в качестве примеров, космических изображений, полученных 8 мая, 1 августа, 28 сентября и 12 декаб-

ря 2001 г. (рис. 4а). Изображение, полученное 28 сентября 2001 г., было самым близким к моменту землетрясения из изображений, свободных от облачности.

Сравнительный анализ схем и роз-диаграмм линеаментов в период подготовки и завершения землетрясения, произошедшего 9 сентября 2001 г. в западной части Поперечных хребтов (магнитуда 4.2), дал следующие результаты (см. рис. 4). За 5 месяцев до землетрясения (8 мая 2001 г.) на розах-диаграммах, построенных при пороге 85, наиболее высокой степенью выраженности обладают системы линеаментов, согласные с преобладающими простирациями сопряженных разрывных нарушений в зоне разлома Сан-Андреас. Эта система линеаментов немного севернее Поперечных хребтов изменяет простижение с СЗ–ЮВ на субширотное, а затем вновь на СЗ–ЮВ. Максимальной степенью выраженности обладают линеамен-

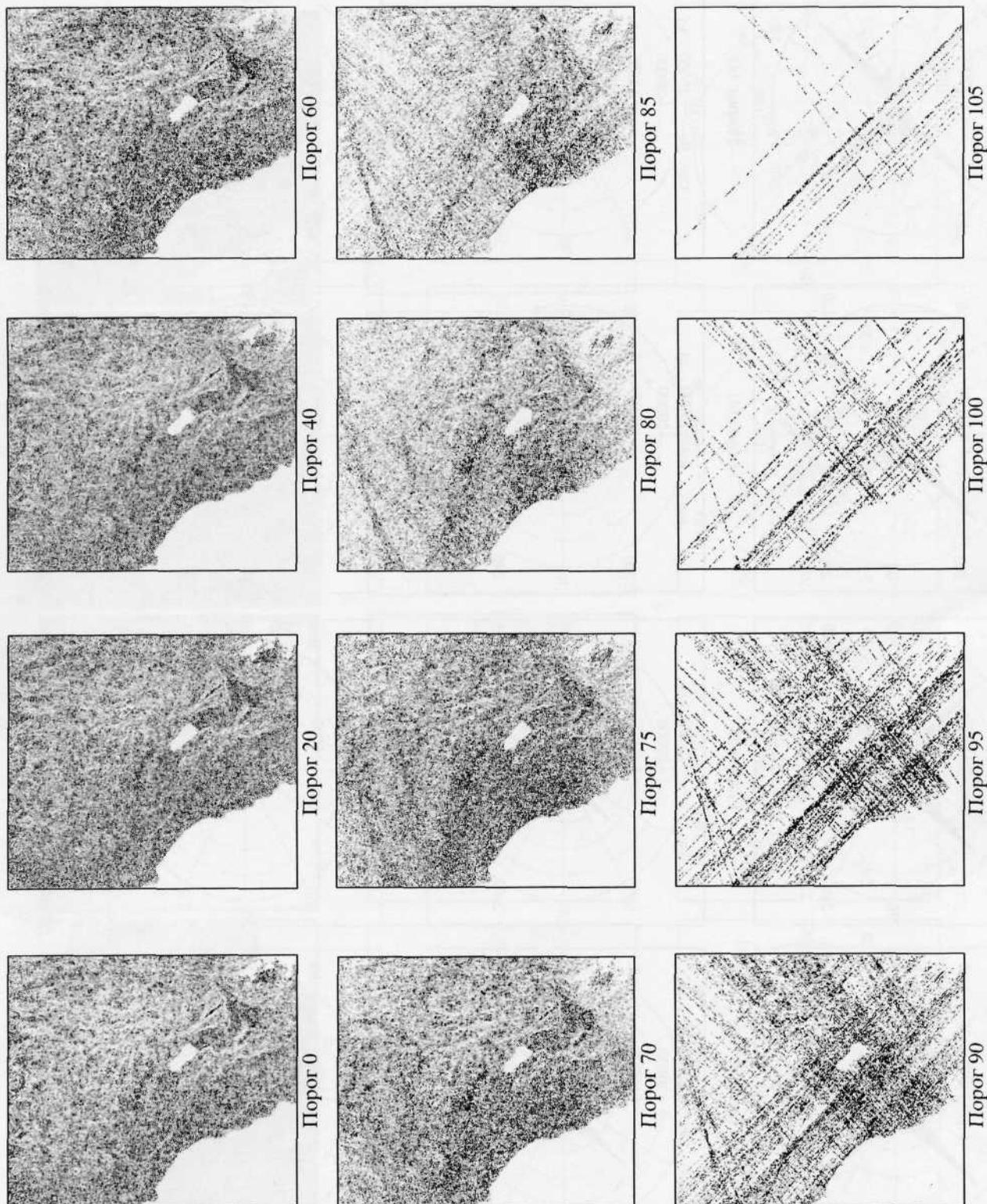


Рис. 2. Степень выраженности линеаментов в зависимости от величины порога (восточная часть Поперечных Хребтов, Калифорния), выяленная по космическому изображению, полученному 3 февраля 2003 г. за 19 дней до землетрясения.

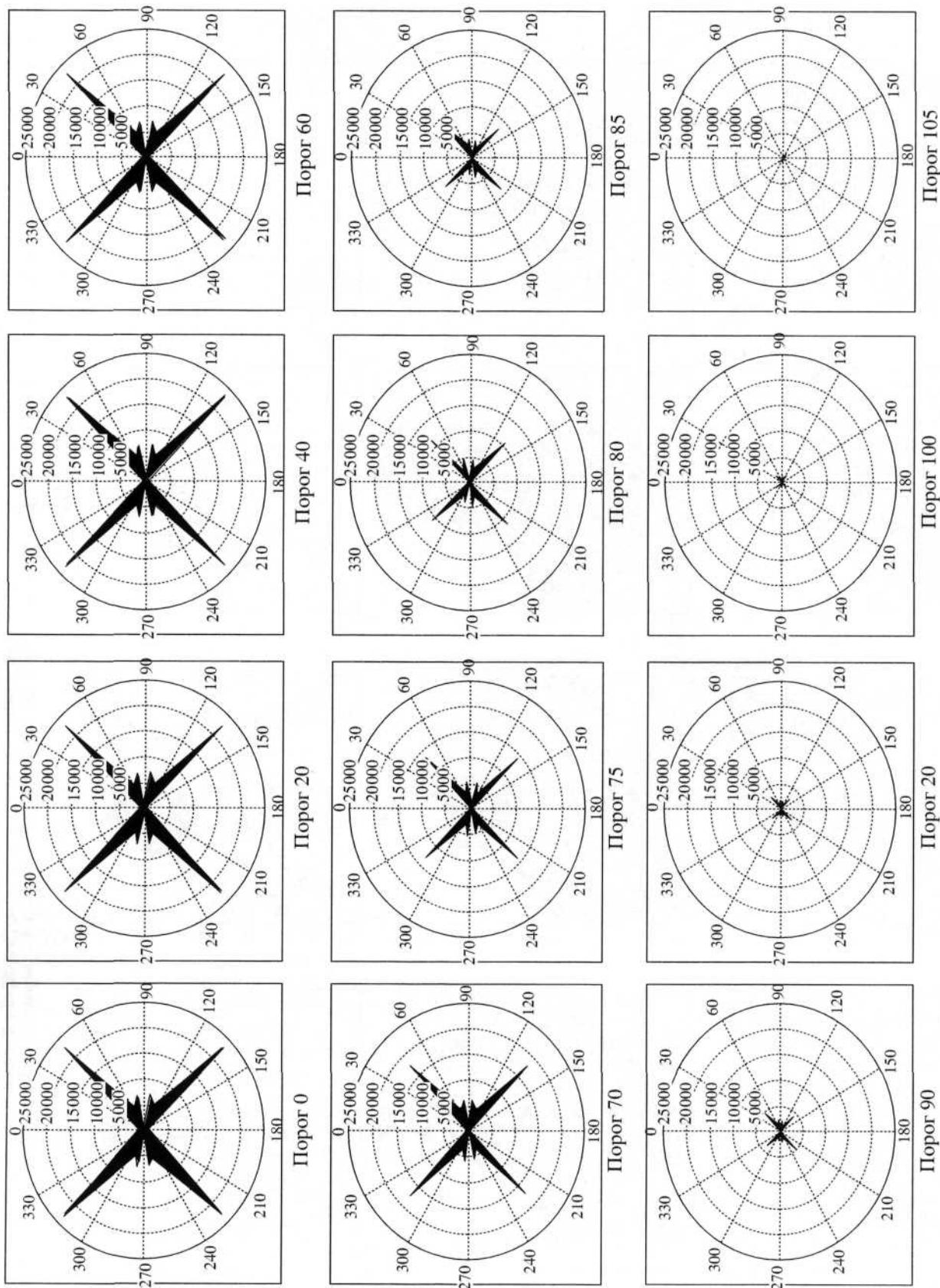


Рис. 3. Розы-диаграммы линеаментов, построенные при разной величине порога по схемам линеаментов, приведенных на рис. 2.

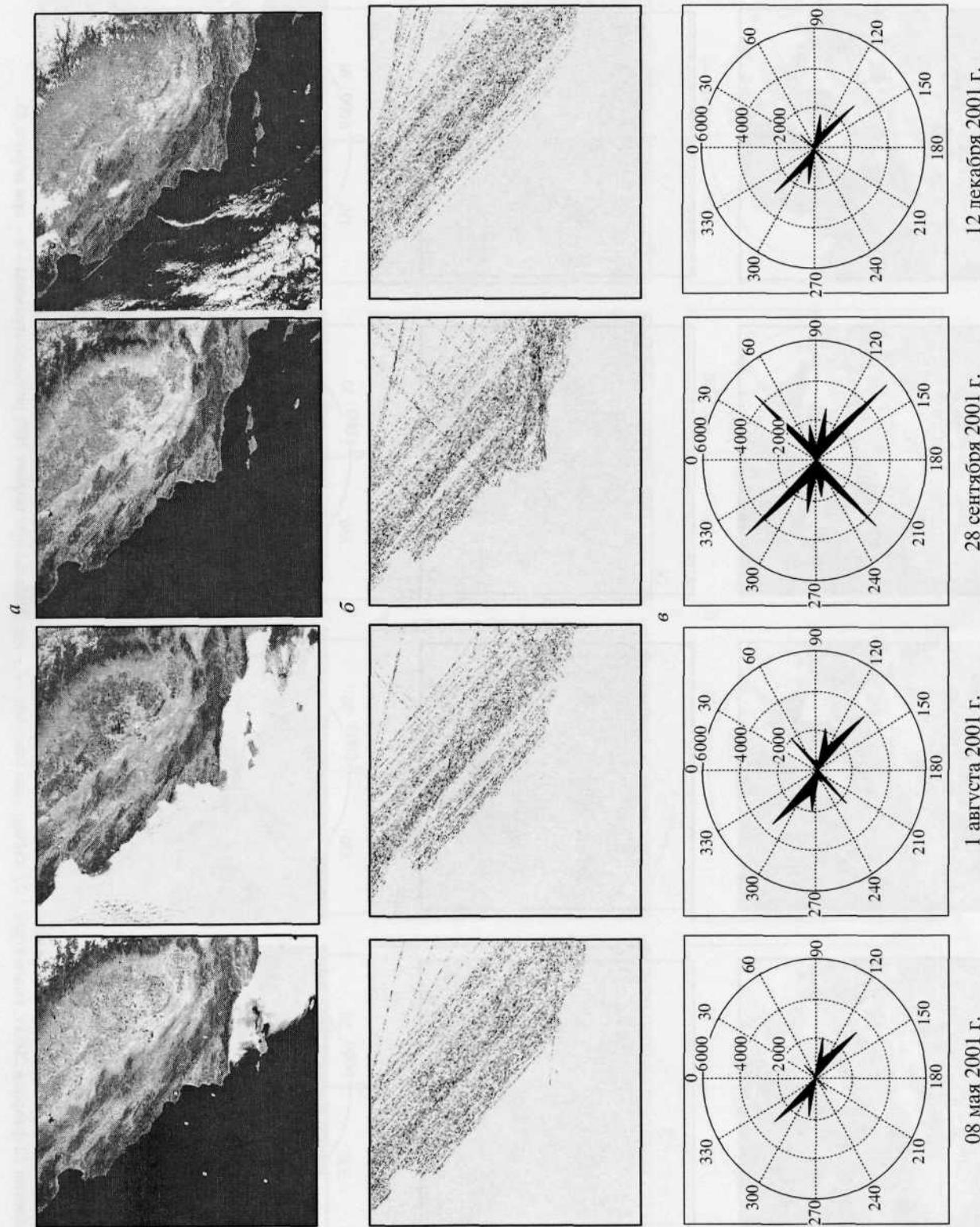


Рис. 4. Динамика систем линеаментов в западной части Поперечных Хребтов (Калифорния) при подготовке к завершении землетрясения, состоявшегося 9 сентября 2001 г. (магнитуда 4,2), выявленная по космическим изображениям – а; схемы линеаментов составлены при пороге 85 – 6.

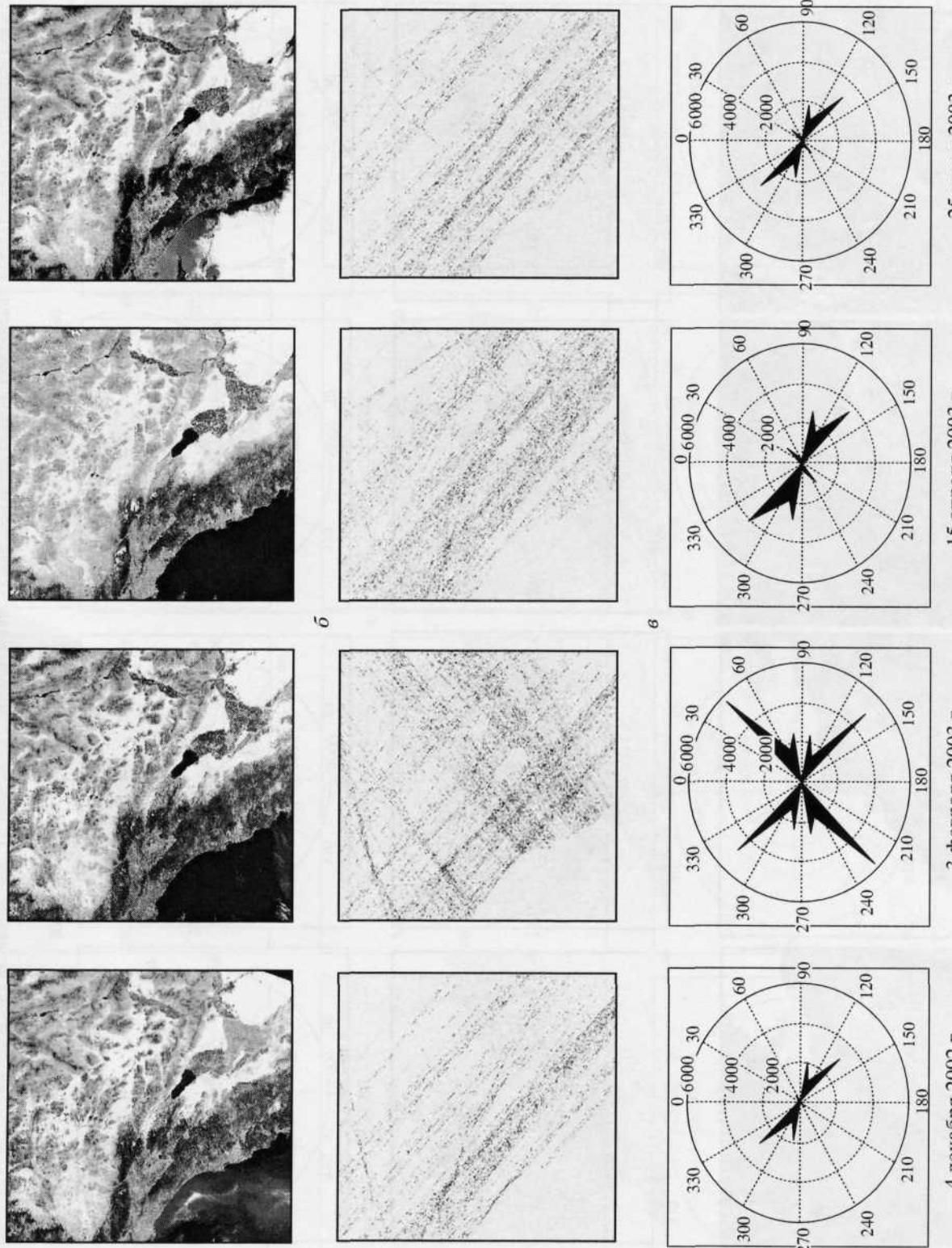


Рис. 5. Динамика систем линеаментов в восточной части Полперчных Хребтов (район г. Сан-Бернардино), выявлена по космическим изображениям – *a* – при землетрясении 22 февраля 2003 г. (магнитуда 5,2); схемы линеаментов – *b* – составлены при пороге 100; розы-диаграммы – *c* – при пороге 85.

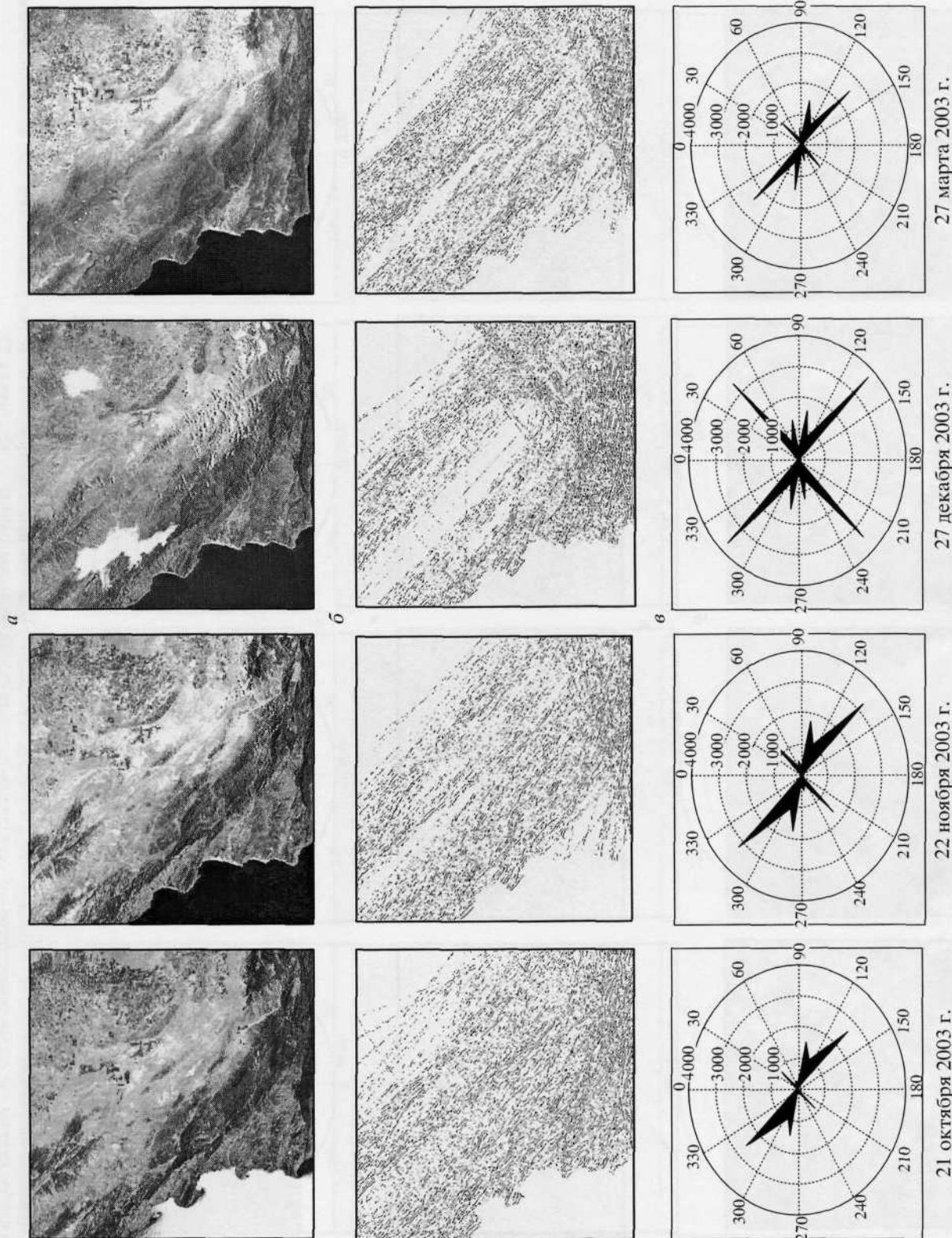


Рис. 6. Динамика систем линеаментов в районе г. Сан-Симеон (Калифорния) при землетрясении 22 декабря 2003 г. (магнитуда 6,5), выявленная по космическим изображениям – а; схемы линеаментов – б – составлены при пороге 100; розы-диаграммы – в – при пороге 85.

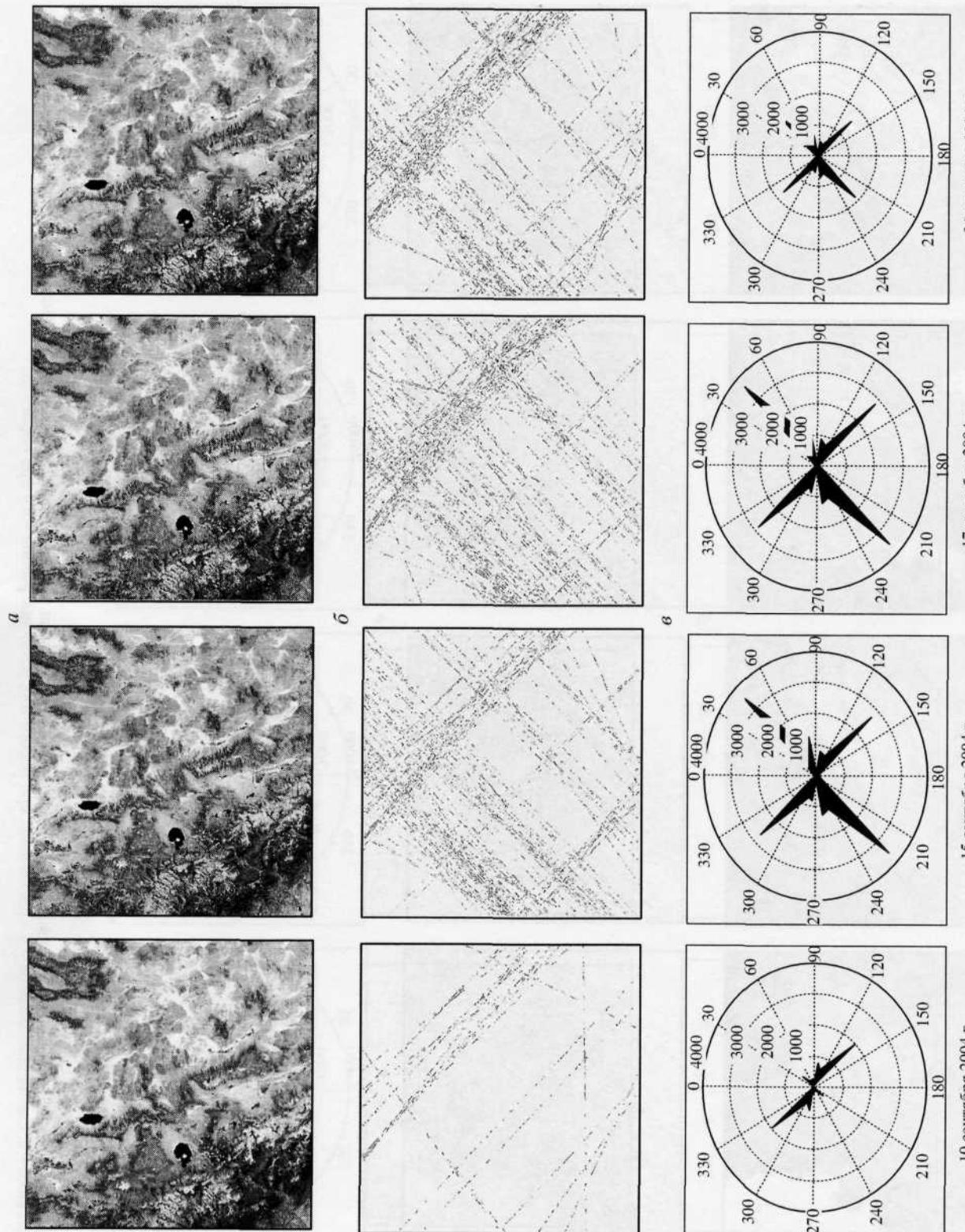


Рис. 7. Динамика систем линеаментов на границе Сьерры-Невады и Большого Бассейна при землетрясении 18 сентября (магнитуда 5,5), выявленная по космическим изображениям – *a*; схемы линеаментов – *б* – составлена при пороге 100; розы-диаграммы *б* – при пороге 85.

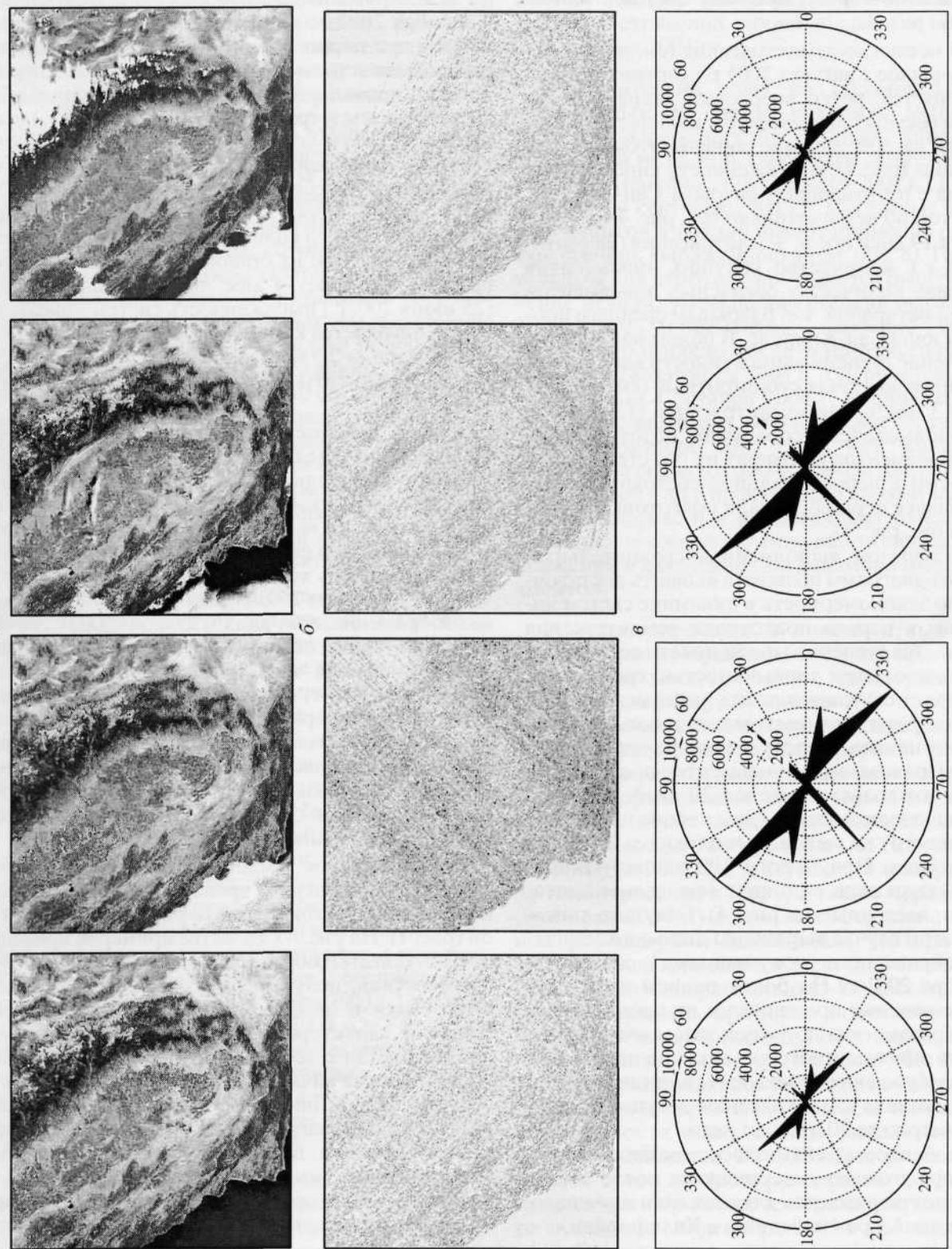


Рис. 8. Динамика систем линеаментов в районе г. Паркфилд при землетрясении 28 сентября 2004 г. (магнитуда 6,0), выявленная по космическим изображениям – а; схемы линеаментов б составлены при пороге 100, розы-диаграммы 6 – при пороге 85.

ты с простиранием СЗ–ЮВ. В три раза меньшая степень выраженности характерна для линеаментов субширотного простирания. Еще меньше выражены в этот период времени секущие линеаменты (см. рис. 4).

За 1.5 месяца до землетрясения (см. изображение, полученное 1 августа 2001 г.) картина существенно меняется: резко возрастает степень выраженности секущих линеаментов, количество которых лишь на 30% меньше линеаментов СЗ–ЮВ простирания (рис. 4). Выраженность линеаментов, согласных с простиранием разрыва Сан-Андреас, усиливается, но незначительно (см. рис. 4).

Спустя 19 дней после землетрясения (28 сентября 2001 г.), количество секущих линеаментов почти равно количеству согласных линеаментов СЗ–ЮВ простирания, т.е. разрывам среднего простирания зоны Сан-Андреас. В целом наблюдается увеличение степени выраженности всех систем линеаментов, включая субширотные (см. рис. 4).

Через 3 мес. после землетрясения (12 декабря 2001 г.) наблюдается “успокоение” возбужденных систем линеаментов и возврат их (по степени выраженности) в первоначальное состояние, предшествовавшее периоду начала подготовки землетрясения (см. рис. 4).

Таким образом, выполненный сравнительный анализ роз-диаграмм позволил выявить достаточно четкую закономерность в динамике систем линеаментов: в период подготовки землетрясения увеличивается степень выраженности всех линеаментов, наибольшей динамичностью среди которых обладает секущая система линеаментов. Как видно из представленных материалов, отрезок времени от начала землетрясения до уменьшения степени выраженности линеаментов после землетрясения составляет не менее 20 дней, а начало активизации линеаментов (увеличение их степени выраженности) не менее нескольких месяцев до землетрясения. При пороге 100 данная закономерность выражена еще ярче (см. схемы линеаментов, приведенные на рис. 4). Секущие линеаменты в этом случае выражены лишь на космических изображениях, полученных 1 августа и 28 сентября 2001 г. На более раннем и позднем изображениях они практически не проявляются. Таким образом, судя по результатам автоматизированного линеаментного анализа при пороге 100, начало возбуждения линеаментов происходит за 1.5 мес. до начала землетрясения, достигая максимума примерно за 20 дней до него.

Эта особенность динамики систем линеаментов в момент подготовки, свершения и после землетрясения подтверждается для всех пяти изученных землетрясений, произошедших в Калифорнии.

Сравнительный анализ результатов линеаментного анализа космических изображений, полученных с помощью аппаратуры MODIS в период подготовки и завершения землетрясения с магни-

тудой 5.2, произошедшего 22 февраля 2003 г. в восточной части Поперечных хребтов (см. рис. 1), дал аналогичные результаты (см. рис. 5). За 2.5 мес. до землетрясения (см. изображение, полученное 4 декабря 2002 г.) на розе-диаграмме, сформированной при пороге 85, хорошо выражена согласная система линеаментов, в то время как секущая система проявляется очень слабо (см. рис. 5). За 19 дней до землетрясения (3 февраля 2003 г.) проявляется максимальная степень выраженности секущих линеаментов, число которых даже превышает число согласных линеаментов СЗ–ЮВ направления. Через 2 мес. после землетрясения (15 апреля 2003 г.) количество секущих линеаментов сокращается, их становится меньше, чем согласных. А через 4 мес. после землетрясения (25 июня 2003 г.) выраженность систем линеаментов возвращается к исходной позиции, которая существовала за 2.5 мес. до землетрясения, когда секущие линеаменты проявлялись достаточно слабо (см. рис. 5).

Схемы линеаментов, полученные при пороге 100 (рис. 5), с еще большей наглядностью иллюстрируют выявленный эффект: на изображении, полученном 4 декабря 2002 г. секущие линеаменты практически не проявляются; на изображениях, полученных 3 февраля 2003 г., эти линеаменты выражены очень хорошо; на изображениях, полученных 15 апреля 2003 г., они выражены слабо, а на изображении, полученном 25 июня 2003 г., почти исчезают. Таким образом, динамика систем линеаментов в период землетрясения, произошедшего 22 февраля 2003 г. в восточной части Поперечных хребтов Калифорнии, полностью подтверждает выявленную ранее закономерность: увеличение степени выраженности всех систем линеаментов в период подготовки землетрясения при максимальной активизации секущей системы линеаментов примерно за 20 дней до начала землетрясения.

Самое сильное землетрясение в Калифорнии за исследуемый период времени произошло 22 декабря 2003 г. (магнитуда 6.5) в районе г. Сан-Симеон (рис. 1). На рис. 6 в качестве примеров приведены результаты обработки нескольких из серии изображений, полученных в различные периоды подготовки и завершения этого сейсмического события, характеризующие динамику систем линеаментов. За 2 мес. до землетрясения (21 октября 2003 г.) уже началась активизация согласных и секущих систем линеаментов (см. рис. 6), которая, судя по розам-диаграммам, достигла максимума в момент времени, близкий к моменту свершения землетрясения (изображение, полученное 27 декабря 2003 г.) и продолжалась после него более 2 мес. (изображение, полученное 27 марта 2004 г.).

Схемы линеаментов, полученные при пороге 100 (рис. 6), демонстрируют активизацию (увеличение степени выраженности) большого количества секущих линеаментов во время свершения

землетрясения (изображение 27 декабря 2003 г.). В это время количества согласных и секущих линеаментов примерно равны. Наибольшей степенью выраженности обладают секущие линеаменты в юго-восточной части данного региона, расположенной вблизи Поперечных хребтов, отличающейся наибольшим развитием секущих поперечных разрывных нарушений (разрыв Горлок и др.) [10].

Землетрясение на границе Сьерры-Невады и Большого Бассейна (Калифорния) с магнитудой 5.5 произошло 18 сентября 2004 г. (рис. 1). При его подготовке и завершении проявляются такие же закономерные изменения степени выраженности систем линеаментов, которые выявлены в зоне разлома Сан-Андреас. Но цикл возбуждения и успокоения для этого землетрясения гораздо короче, чем для ранее описанных землетрясений (см. рис. 7). Как следует из анализа результатов обработки космических изображений, всего за 8 дней до этого землетрясения (10 сентября 2004 г.) секущие линеаменты проявлялись очень слабо. Всплеск их активизации произошел всего лишь за 3 дня до землетрясения (15 сентября 2004 г.) и сохранился за один день до землетрясения (17 сентября 2004 г.). После землетрясения степень выраженности как согласных, так и секущих линеаментов начала снижаться (26 сентября 2004 г.).

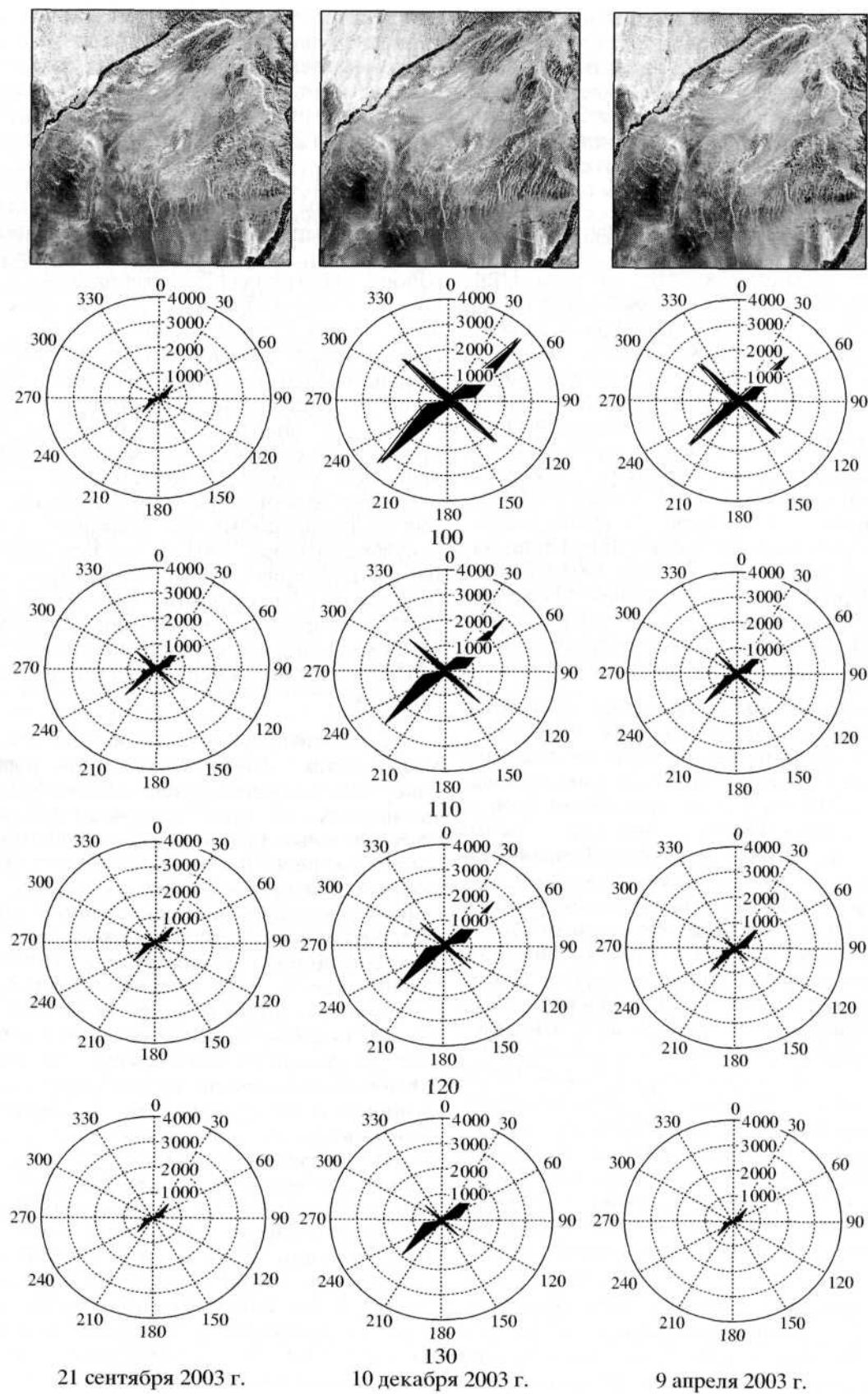
Подобное резкое сокращение цикла активизации систем линеаментов характерно и для всех последующих землетрясений, случившихся в сентябре-октябре 2004 г. Наиболее сильное из этих землетрясений (магнитуда 6.0) произошло 28 сентября 2004 г. в р-не г. Паркфилд (см. рис. 1). За 10 дней до этого землетрясения (18 сентября 2004 г.) состоялось сильное землетрясение с магнитудой 5.5, эпицентр которого располагался на границе мезозойских структур Сьерра-Невада и Большого Бассейна, т.е. в стороне от области кайнозойской складчатости, которую косо разрезает разрыв Сан-Андреас (см. рис. 1). По всей видимости, гипоцентр землетрясения, состоявшегося 18 сентября 2004 г., приурочен к одной из крупных секущих Сан-Андреас разрывных структур, с которой связаны также землетрясения, состоявшиеся вблизи г. Сан-Симеон (22 декабря 2003 г.) и вблизи г. Паркфилд (28 сентября 2004 г.). То есть в анализируемых случаях причиной землетрясений явилась геодинамическая обстановка в сейсмогенном разрыве Сан-Андреас, а в местах их конкретного проявления выявлялись секущие структуры.

В связи с этим можно сделать заключение, что в эпохи землетрясений, состоявшихся как 18 сентября, так и 28 сентября 2004 г., вся зона разрыва Сан-Андреас и прилегающие к ней районы находились в деформационно-напряженном состоянии. В подобных условиях взаимодействия (наложения) разных полей напряжений, связанных с подготов-

кой этих крупных землетрясений, возможны отклонения в динамике систем линеаментов, которая была выявлена при автоматизированном линеаментом анализе космических изображений для трех землетрясений, произошедших в Калифорнии в 2001 и 2003 гг.

Действительно, судя по розам-диаграммам, приведенным на рис. 8, максимум активизации (степень выраженности) секущих линеаментов приходится не на день свершения землетрясения в районе г. Паркфилд (28 сентября 2004 г.), а за 4 дня до него (24 сентября 2004 г.). Согласные системы линеаментов в эти дни имеют примерно одинаковую степень выраженности (см. рис. 8). Примечательным для этого случая является быстрое (в течение недели) уменьшение степени выраженности систем линеаментов, особенно секущих, которое произошло после землетрясения, состоявшегося 28 сентября 2004 г. (см. розу-диаграмму, полученную 4 октября 2004 г. и приведенную на рис. 8). По-видимому, это объясняется тем, что в сентябре-октябре 2004 г. на юге Калифорнии произошла серия (около 40) землетрясений с магнитудами от 4 до 6 практически по всей зоне сдвига Сан-Андреас и в прилегающих районах. Это привело к сложной картине наложения полей напряжений и к осложнению динамики систем линеаментов.

Автоматизированный линеаментный анализ космических изображений в период подготовки и завершения землетрясения с магнитудой 5.2, состоявшегося в Перу 27 января 2004 г., подтверждает основные закономерности динамики линеаментов, выявленные в Калифорнии. На рис. 9 представлены розы-диаграммы линеаментов, которые сформированы при автоматизированной обработке космических изображений, полученных с помощью аппаратуры ASTER за 4 мес. (21 сентября 2003 г.) и за 1.5 мес. (10 декабря 2003 г.) до землетрясения в Перу, а также через 2.5 мес. (9 апреля 2004 г.) после него. Анализ приведенных роз-диаграмм показывает, что при пороге 100 и меньше имеющиеся здесь диагональные (по отношению к направлению С-Ю) системы линеаментов выражены примерно в одинаковой степени. Но, начиная с порога 110 и более, картина принципиально меняется (см. рис. 9). На космических изображениях, полученных за 4 мес. до землетрясения и через 2.5 мес. после него, степень выраженности обеих систем линеаментов (особенно линеаментов СЗ-ЮВ) быстро снижается. Вместе с тем на (розах-диаграммах, сформированных при обработке изображения, полученного за 1.5 мес. (10 декабря 2003 г.) до землетрясения, обе системы еще четко выражены (особенно линеаменты СВ-ЮЗ) и не исчезают даже при пороге 130 (см. рис. 9). Следует заметить, что при пороге более 130 для землетрясений, состоявших-



**Рис. 9.** Исходные изображения, полученные аппаратурой ASTER и розы-диаграммы линеаментов, составленные при разных порогах подготовки и завершения землетрясения в Перу 27 января 2004 г. (магнитуда 5.2).

ся в Калифорнии, секущие системы линеаментов вообще не проявлялись.

Наиболее наглядно различия в степени выраженности систем линеаментов на разновременных космических изображениях, полученных для территории Перу, выявлены при пороге 110 и более. Эпицентр землетрясения в Перу ( $17.69^{\circ}$  ю.ш.;  $70.67^{\circ}$  з.д.) приурочен к крупной поперечной зональной системе, развившейся в области резкого изменения простирации Кордильер с субмеридионального (на юге) на северо-западное (на севере). Крупные орографические и гидрографические элементы здесь имеют простирание СВ–ЮЗ. С этими гидрографическими элементами находится в согласии система линеаментов СВ–ЮЗ простирания, выделяемая по космическим изображениям. Эта система линеаментов наиболее устойчива и обладает наибольшей степенью выраженности. Это подтверждают результаты автоматизированного линеаментного анализа, представленного на рис. 9.

Исследуемый р-н в Перу отличается от территории Калифорнии, где линеаменты СВ–ЮЗ простирания имели высокую степень выраженности только в период подготовки землетрясения, а в остальное время они имели явно подчиненный характер по отношению к линеаментам СЗ–ЮВ направления, согласных с простиранием разрыва Сан-Андреас. Несмотря на данные отличия, в Перу, как и в Калифорнии, динамика систем линеаментов явно зависит от сейсмической обстановки (см. рис. 9) и может быть использована в качестве предвестника землетрясений.

Выявленная "быстрая" реакция систем линеаментов на сейсмотектоническое состояние земной коры в исследуемых районах позволяет вскрыть их геологическую (точнее, физико-химическую) природу. Отметим, что орография и фенология растительного покрова не могут изменяться в течение нескольких дней (см. рис. 8) или нескольких недель (рис. 4–7). Видимо, для объяснения данного феномена можно использовать подход, описанный в [11], где на ряде примеров показано, что малые линейные элементы ландшафта, выраженные на космических изображениях в виде тонкой параллельной штриховки, являются проявлением структуры поля напряжений. Таким образом, локальные линеаменты отражают ослабленные зоны (зоны трещиноватости и др.) приповерхностных горизонтов земной коры и разделяют относительно однородно деформированные блоки. Благодаря этому, развивается геотермо-геохимический механизм формирования линеаментов.

Физико-химическое преобразование земной коры сопровождается выделением флюидов и тепла, поступающих к земной поверхности. Состав и плотность этого потока изменяются во времени и пространстве и во многом регулируются (контро-

лируются) полем напряжений. Быстрая изменчивость поля напряжений в момент подготовки, свершения и завершения землетрясения обуславливает быструю изменчивость тепловых и флюидо-газовых потоков. Это соответственно приводит к быстрой изменчивости обусловленных ими линеаментов, отражающих физико-химические особенности (влажность, цвет, тепловой поток, текстуру, структуру и т.д.) почвенно-растительного покрова и другие характеристики поверхности и приземного слоя атмосферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования динамики систем линеаментов, выделяемых на космических изображениях в разных сейсмоопасных регионах, отличающихся геодинамическими режимами, позволили выявить закономерности изменения системы линеаментов в период подготовки и завершения землетрясений. На их основе при организации мониторинга сейсмоопасных территорий возможно осуществление прогноза землетрясений.

Конкретный характер изменения систем линеаментов зависит от геологических особенностей строения и специфики геодинамического режима территории. Поэтому прогноз землетрясений и космический сейсмический мониторинг на основе использования в качестве предвестников динамики систем линеаментов необходимо проводить с учетом местных геологических и геодинамических условий. При этом целесообразно учитывать результаты линеаментного анализа космических изображений, полученных на основе изучения землетрясений, происходивших ранее в исследуемом регионе.

Если проводить мониторинг одновременно по всей сейсмоопасной зоне, то появляется возможность установить не только время, но место и силу землетрясения, так как оно произойдет в том месте, где наиболее высоки интенсивность динамики линеаментов, а его сила будет тем больше, чем выше степень выраженности системы линеаментов-предвестников, характерных для данного района [4].

Таким образом предложенный метод изучения динамики систем линеаментов по космическим изображениям, наряду с другими методами, может использоваться для оперативного мониторинга сейсмоопасных территорий с целью исследования и прогноза значительных сейсмических событий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Природные опасности России / Под общ. ред. Осинова В.И., Шойгу С.К.; Сейсмические опасности / Под ред. Соболева Г.А. М.: Крук, 2000. 296 с.

3. Савин А.И., Бондур В.Г. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
4. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. АН. 2005. Том 402. № 1.
5. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений по результатам линеаментного анализа космических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 1. С. 71–75.
6. Михайлов А.Е., Корчуганова Н.И., Баранов Ю.Б. Дистанционные методы в геологии. М.: Наука, 1993. 225 с.
7. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
8. Рогожин Е.А. Блоковое строение земной коры Северной Евразии // Физика Земли. 2004. № 10. С. 81–94.
9. Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Comp. Geosci. 1997. V. 23. № 1. P. 45–62.
10. Кинг Ф.Б. Вопросы тектоники Северной Америки. М.: МГУ, 1961. 230 с.
11. Кац Я.Г., Тевелев А.В., Полетаев А.И. Основы космической геологии. М.: Недра, 1988. 240 с.

## A Method of Earthquake Forecast Based on the Lineament Dynamic Analysis Using Satellite Imagery

**V. G. Bondur, A. T. Zverev**

*Scientific Center of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS", Moscow*

A method of earthquake forecast based on the results of lineament analysis of seismic danger area satellite imagery is proposed. The results of study of lineament system dynamics using satellite imagery acquired during the period of preparation and occurrence of strong earthquakes in 2001–2004 in California and Peru are given. Increase of lineament system evidence during the earthquake preparation is determined. This increase begins 2–3 months before an earthquake and reaches its maximum 20 days (on average) before it. After an earthquake the intensity of lineament evidence decreases gradually and after 2–3 months reaches its usual conditions. Taking into consideration the character of lineament system dependence on geological and geodynamical features of a region it is proposed to form patterns of lineament changes obtained during the preparation of earlier occurred earthquakes in the regions of interest.