

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗ КОСМОСА ПРЕДВЕСТНИКОВОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ПРОЯВЛЯЮЩЕЙСЯ В ДИНАМИКЕ ЛИНЕАМЕНТНЫХ СИСТЕМ

© 2012 г. В. Г. Бондур^{1*}, А. Т. Зверев², Е. В. Гапонова¹, А. Л. Зима¹

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва

²Московский государственный университет геодезии и картографии

^{1*}E-mail: office@aerocosmos.info

²E-mail: zverev@miigaik.ru

Поступила в редакцию 03.10.2011 г.

Изложены результаты исследования предвестниковой цикличности напряженно-деформированного состояния литосферы в период подготовки значительных сейсмических событий путем автоматизированного линементного анализа разновременных космических изображений. Предлагаемая методика апробирована на примере ряда сильных и катастрофических землетрясений, произошедших за последнее десятилетие в различных регионах мира. Выявленная предвестниковая цикличность динамики линементных систем имеет период от 1 до 3 мес. и позволяет осуществить прогноз времени, места и возможной силы землетрясения.

Ключевые слова: космические изображения, дистанционное зондирование, предвестники землетрясений, геодинамика, деформационные волны, линементы, розы-диаграммы, сейсмоопасные территории

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в период подготовки землетрясений происходят перестройки напряженно-деформированного состояния земной коры и мантии. Это проявляется в закономерных изменениях геофизических, геохимических, тектонических, гидрогеодинамических и других полей. Временные перестройки напряжений и возникновение в связи с этим деформационных волн перед землетрясением обнаруживаются по сейсмическим (Базавлук, Юдахин, 1993), геодезическим (Никонов, 1984; Певнев, 2000; Кузьмин, Жуков, 2004), геохимическим (Гидрогеодинамические..., 1985) данным, по результатам гидрогеодинамических наблюдений (Киссин, Гумен, 1994; Киссин, 2009) и по другим данным.

Возвратно-поступательные изменения напряженно-деформированного состояния коры и мантии в период подготовки землетрясений были выявлены также путем анализа динамики линементных систем на основе результатов автоматизированной обработки разновременных космических изображений (Бондур, Зверев, 2005а; 2005б; 2007). С этой целью использовались такие показатели динамики линементных систем, как розы-диаграммы линементов и изменение величины отношений суммарных длин локальных и региональных линементов разных направлений (Бондур, Зверев, 2005а; 2005б; 2006; 2007; Бондур

и др., 2005; 2006; 2009; 2010; 2011). В последнее время стал использоваться еще один показатель динамики систем линементов — линии вытянутости их роз-диаграмм, который оказался достаточно информативным, подчеркивающим возвратно-поступательный характер изменения преобладающих ориентировок линементов в период подготовки землетрясений (Бондур и др., 2011). В настоящей работе приведены результаты исследования предвестниковых деформационных волн путем анализа разновременных космических изображений на примере катастрофических землетрясений, произошедших в 2000–2010 гг.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись на основе результатов автоматизированного линементного анализа разновременных космических изображений с использованием программного пакета LESSA (Златопольский, 2008). В качестве основных исходных данных рассматривались космические изображения, полученные аппаратурой MODIS с пространственным разрешением 250 м (спутники TERRA и AQUA).

Ранее на примере катастрофических землетрясений в Калифорнии, Иране, Перу и в других регионах было выявлено наличие предвестниковой закономерности в изменении роз-диаграмм линементов, выявляемых по космическим изображениям, которая заключается в следующем: за 1–

3 мес. до землетрясения начинаются изменения формы роз-диаграмм, достигающей максимальной величины за 20 дней до сейсмического толчка и сохраняются 20 дней после него; затем в течение 1–3 мес. розы-диаграммы постепенно приобретают прежнюю форму (Бондур, Зверев, 2005а; 2005б; 2006; 2007). Данная предвестниковая цикличность позволяла осуществить прогнозы времени начала землетрясения, но не позволяла определить с достаточной точностью место землетрясения, так как розы-диаграммы строились для относительно больших площадей – от $125 \times 125 \text{ км}^2$ до $400 \times 400 \text{ км}^2$ – и не были прямо связаны с эпицентрами землетрясений (Bondur, Kuznetsova, 2006).

В связи с этим нами предложен целый комплекс признаков динамики линеаментных систем, регистрируемых методами дистанционного зондирования, позволивший в ряде случаев определить не только время начала землетрясения, но и место расположения сейсмогенерирующего разлома. В качестве подобных признаков – индикаторов – используются статистические показатели, прежде всего, общие розы-диаграммы для всей исследуемой площади и частные (локальные), розы-диаграммы, отношения и суммы линеаментов разных направлений, линии вытянутости локальных роз-диаграмм (Бондур и др., 2010а).

При исследовании свершившихся сейсмических событий подбирались разновременные космические изображения, полученные начиная за 2–4 мес. до землетрясения и заканчивая через 2–4 мес. после них с интервалом съемки в несколько дней, недель или 1–2 мес. Конкретные временные интервалы подбора космических изображений во многом зависят от погодных условий, так как для обработки должны использоваться или безоблачные изображения, или с облачностью, покрывающей не более 10–15% площади.

Методической основой автоматизированного линеаментного анализа космических изображений является выделение текстурных (ориентационных) характеристик рисунков фрагментов изображений по направлениям линейных элементов (линий, границ). Изучение ориентационных (текстурных) характеристик производилось с использованием программы LESSA, начиная с выявления линейных элементов – спрямленных границ или линий протяженностью в 5–10 пикселей. Эти элементарные линейные локальные элементы называются штрихами. Для каждого штриха определяется его направление с осреднением 22.5° , т.е. выделение штрихов происходит по восьми направлениям: 90° ; 67.5° ; 45° ; 22.5° ; 0° ; 337.5° ; 315° ; 292.5° (Златопольский, 2008).

Используемая программа позволяла определить суммарную длину (в километрах или пикселях) штрихов каждого из данных восьми направ-

лений и вычислить парные отношения суммарных длин штрихов разных направлений. Так как анализируются восемь направлений, то число сочетаний восьми по две дает цифру 28 возможных сочетаний парных отношений.

На следующем этапе с использованием скользящего окна с диаметром 50 элементов разрешения (пикселей) строятся частные (локальные) розы-диаграммы, отражающие распределение штрихов по направлению для анализируемых фрагментов изображений. Для всего космического изображения (или его фрагмента) строится общая роза-диаграмма, отражающая распределение штрихов по всей площади изображения. По частным розам-диаграммам строятся линии вытянутости, характеризующие изменение среднего направления локальных роз-диаграмм для различных участков космического изображения. При проведении анализа учитывается, что на границах блоков земной коры, имеющих различные поля напряжений и деформаций, обычно разграниченных разрывными нарушениями, линии вытянутости либо обрываются, либо резко изменяют свои направления.

При проведении обработки выявляются также цепочки штрихов, трассирующих протяженные (сквозные) региональные линеаменты. Для этого анализируются прямолинейные “коридоры” всех положений и направлений, пересекающих изображение, и подсчитывается, сколько в них попадает штрихов соответствующего направления (так называемая “выраженность” или проявленность линеаментов). Затем, задавая порог “выраженности” путем изменения плотности штригов определенного направления, проводилась пороговая фильтрация сквозных линеаментов. Увеличение порога соответствует увеличению плотности штригов. Таким образом, при больших порогах (более 70–80) проявляются лишь линеаменты с максимальной плотностью штригов заданного направления.

Все перечисленные характеристики являются индикаторами напряженно-деформированного состояния земной коры и используются для выявления деформационных волн-предвестников землетрясений (Бондур и др., 2011).

Степень проявленности линеаментов зависит не только от порога, но и от спектрального диапазона космических изображений, используемых для обработки. Анализ многоспектральных космических изображений, полученных при помощи аппаратуры MODIS в трех спектральных каналах оптического диапазона спектра, показал (Бондур и др., 2005), что в зеленой области (0.52–0.6 мкм) наиболее четко (в количественном и качественном отношении) выражены локальные линеаменты (штрихи), а в ближней инфракрасной (ИК) зоне (0.78–0.86 мкм) – региональные

(сквозные) линеаменты. Красная зона спектра (0.63–0.69 мкм) по своей информативности для линеаментного анализа занимает промежуточное положение, так как в ней локальные линеаменты проявлены лучше, чем в ближней ИК-зоне, а региональные — лучше, чем в зеленой зоне. Во всех изученных случаях отклонения результатов линеаментного анализа, полученных по космическим изображениям, сформированным в красном спектральном канале, не превышали 5–10% по сравнению с результатами, полученными при обработке изображений в зеленом и ИК-спектральных каналах, что является допустимым. Поэтому при проведении исследований использовались только изображения, полученные в красном спектральном канале аппаратуры MODIS — $\Delta\lambda = 620\text{--}670$ нм, — что сокращало сроки и объемы исследований.

При использовании метода линеаментного анализа для исследований геодинамики необходимо учитывать, что линеаменты, выявляемые при автоматизированной обработке космических изображений, имеют различную физическую природу. Одни из них, наиболее стабильные (консервативные), связаны с линейными объектами (элементами) и спрямленными границами частей ландшафтов, различающихся по отражательным спектральным характеристикам. Такими линейными объектами являются валы, линейные складки, овраги, русла рек, дайки, дороги и т.п., а границами — границы лесов, полей, лугов, стратиграфических толщ и т.п. Другие линеаменты, более динамичные и не всегда проявленные, отражают чередование зон сжатия и растяжения земной коры. Их выделение на космических изображениях (особенно в случае однородных ландшафтов) прямо зависит от влияния поля напряжения на геологическую среду.

Наиболее благоприятные условия для проявления линеаментов (зон, полос) возникают в случае интенсивного теплопереноса в зонах растяжения (зонах трещиноватости и разрывных нарушений). При этом следует учитывать, что теплоперенос из глубин к поверхности не остается постоянным. Он наиболее интенсивен в моменты возбуждения тектонической (сейсмической) активности недр. Основываясь на этой особенности, получаем возможность выявить закономерности связей интенсивности напряженности земной коры, теплопереноса и обусловленной ими величины проявления динамической части линеаментов с сейсмической активностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОЗ-ДИАГРАММ ЛИНЕАМЕНТОВ

Использование информации о землетрясениях разной силы в качестве эталонов помогает установить наличие связи интенсивности перестройки структурного плана линеаментов от времени, места (геологических условий) и силы землетрясения. В этом случае появляется возможность прямого прогноза места, времени и силы землетрясения путем линеаментного анализа космических изображений (Бондур, Зверев, 2005а; 2005б; 2006).

Исследования деформационных волн-предвестников землетрясений, проявляющихся в динамике линеаментных систем, проводились на примере сильных и катастрофических землетрясений, произошедших в различных регионах мира, таких как Калифорния (США), Мексика, Перу, Чили, Иран, Гаити, Калининград (Россия) (рис. 1).

Как уже отмечалось ранее, для ускорения процесса обработки преимущество отдавалось космическим изображениям, полученным в красной зоне спектра электромагнитных волн ($\Delta\lambda = 620\text{--}670$ мкм), обладающим достоинствами, присущими как зеленой зоне, так и ближнему ИК-диапазону (Бондур и др., 2005).

Землетрясение в Калифорнии

В качестве одной из сейсмоопасных зон анализировалась территория Калифорнии, для которой были изучены шесть сильных землетрясений, произошедших 9 сентября 2001 г. ($M = 4.2$), 22 февраля 2003 г. ($M = 5.2$), 22 декабря 2003 г. ($M = 6.5$), 28 сентября 2004 г. ($M = 6.0$), 31 октября 2007 г. ($M = 5.6$), 29 июля 2008 г. ($M = 5.4$).

Одно из этих исследуемых землетрясений, произошедших 9 сентября 2001 г. в западной части Поперечных хребтов ($M = 4.2$), имело следующие координаты эпицентра: 34.059° с.ш., -118.387° з.д. На рис. 2 в качестве примеров приведены фрагменты исходных изображений, региональные линеаменты и розы-диаграммы направленности региональных линеаментов, построенные путем автоматизированной обработки (при пороге 85) космических изображений, полученных за 6 и 1.5 мес. до землетрясения и через 20 дней и 1 мес. после него.

На всех четырех, приведенных на рис. 2, розах-диаграммах преобладают два главных направления линеаментов: СЗ–ЮВ и СВ–ЮЗ. Первое направление соответствует общему простиранию зоны разлома Сан-Андреас, а второе является секущим (поперечным) по отношению к нему. Причем при приближении к моменту землетрясения общее число проявленных (выраженных) на космических изображениях линеаментов постепен-

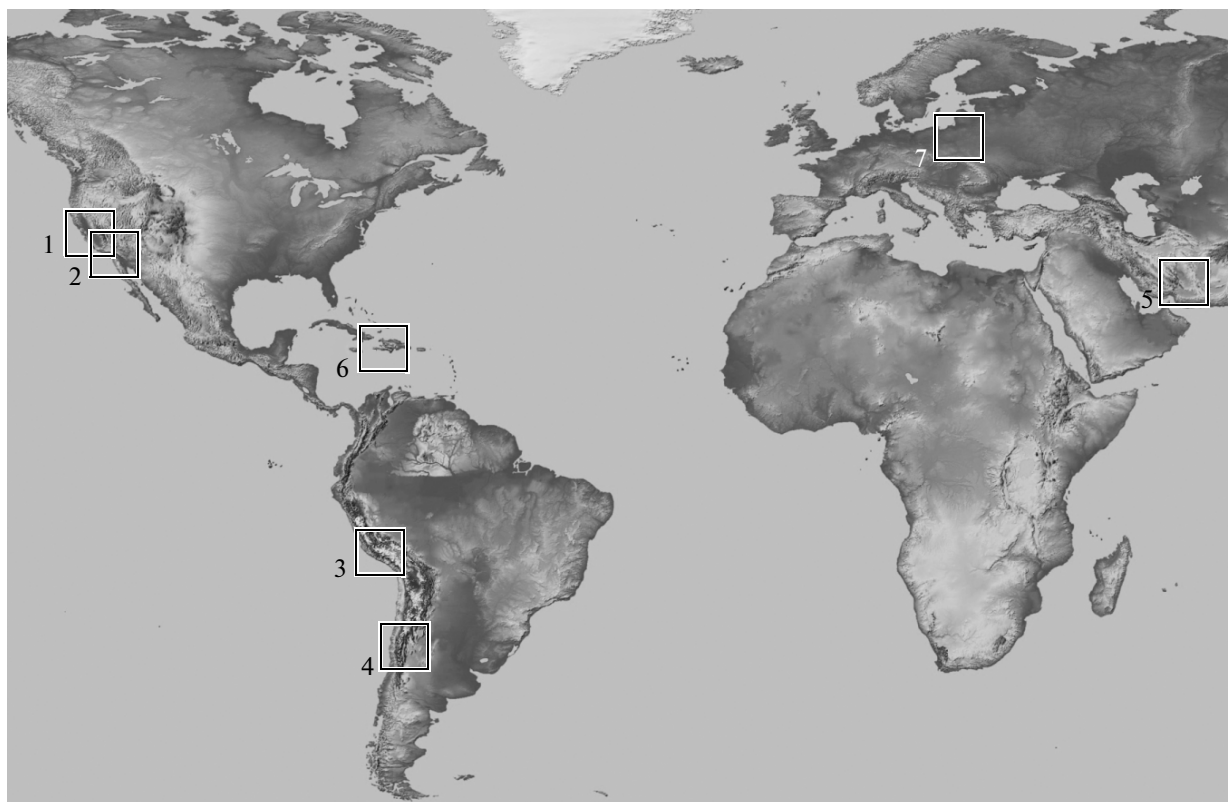


Рис. 1. Схема расположения территорий исследования: 1 – Калифорния (США); 2 – Мексика; 3 – Перу; 4 – Чили; 5 – Иран; 6 – Гаити; 7 – Калининград (Россия).

но увеличивается. При этом наиболее интенсивным ростом обладают секущие линеаменты, которые очень слабо проявлены за 6 мес. до землетрясения и через 1 мес. после него (Бондур, Зверев, 2005а; 2005б).

Линеаменты обоих направлений (согласные с Сан-Андреас и секущие по отношению к нему), достигают максимального количества за 1.5 мес. до землетрясения и 20 дней после него. Наибольшая плотность согласных линеаментов, судя по схемам сквозных линеаментов, наблюдается вдоль побережья Тихого океана, а узел пересечения всех систем разнонаправленных линеаментов соответствует области расположения эпицентра землетрясения.

Второе из исследованных землетрясений произошло 22 февраля 2003 г. в восточной части Поперечных Хребтов ($M = 5.2$). Координаты эпицентра: 34.31° с.ш., -116.848° з.д. Как и при землетрясении, произошедшем в 2001 г. в западной части Поперечных Хребтов, для данного сейсмического события четко выражена цикличность, заключающаяся в закономерном изменении количественных характеристик систем линеаментов при подготовке землетрясения и после него, аналогичная показанной на рис. 2. При этом наибольшим флуктуациям, как и в первом случае,

подвержены секущие линеаменты. За 2.5 мес. до землетрясения они проявлялись на космическом изображении очень слабо. За 20 дней их число резко возросло и стало даже больше по сравнению с согласными (СЗ–ЮВ) линеаментами. Через 2 мес. после данного землетрясения число секущих линеаментов сократилось почти в 2 раза, хотя по-прежнему их число было еще достаточно велико, но резко уменьшилось через 4 мес. после землетрясения. Максимальная плотность согласных линеаментов в период подготовки этого землетрясения и через 2 мес. после него была характерной для прибрежных районов Тихого океана, отвечающих зоне разлома Сан-Андреас. Область эпицентра находилась в широкой зоне увеличенной плотности секущих линеаментов (Бондур и др., 2011).

Анализ схем линий вытянутости роз-диаграмм штрихов, полученных на период подготовки землетрясения, произошедшего в этом регионе 22 февраля 2003 г., показал, что при приближении к моменту землетрясения увеличивается анизотропия поля штрих-линеаментов, что особенно четко проявлено в прибрежных районах (Бондур и др., 2011). Если 4 декабря 2002 г. значительно преобладала вытянутость роз-диаграмм штрихов ЮВ–СЗ направлений, то за 20 дней до землетря-

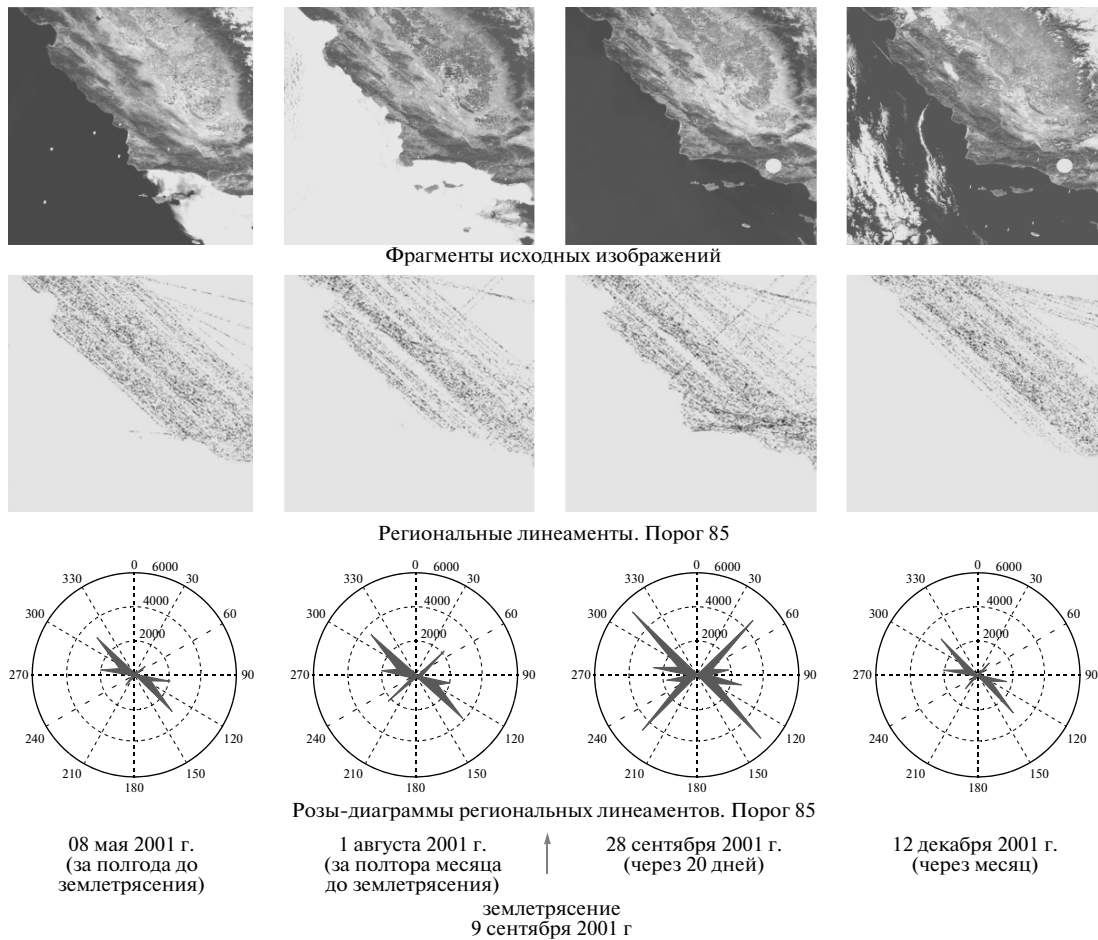


Рис. 2. Динамика систем линеаментов, выявленных по космическим изображениям в западной части Поперечных Хребтов (Калифорния) при подготовке и завершении землетрясения, произошедшего 9 сентября 2001 г. ($M = 4.2$).

сения (3 февраля 2003 г.) отмечался целый ряд участков, на которых уже преобладали ЮЗ–СВ направления линий вытянутости роз-диаграмм, согласные с направлением Поперечных Хребтов и разрыва Горлока. Таким образом, судя по розам-диаграммам сквозных линеаментов и линиям вытянутости штрихов, в период подготовки землетрясения, произошедшего 22 февраля 2003 г., наблюдалась закономерная цикличность в их степени проявленности на космических изображениях, что обусловлено перестройкой поля напряжений и связанного с ним полей региональных и локальных деформаций.

Третье из изученных нами землетрясений для территории Калифорнии произошло 22 декабря 2003 г. вблизи г. Сан-Симеон, расположенного на побережье Тихого океана. Магнитуда землетрясения составила $M = 6.5$. Координаты эпицентра: 35.706° с.ш., -121.102° з.д. Как и для ранее описанных землетрясений, в динамике систем линеаментов четко проявилась цикличность, заключающаяся в закономерном увеличении числа проявленных на космических изображениях ли-

неаментов в период подготовки и после землетрясения. Число линеаментов начинает расти за 2 мес. до землетрясения, достигая наибольшего числа за 27 дней до события и через 5 дней после него. Через 3 мес. их стало значительно меньше (Бондур и др., 2005).

Анализ вытянутости линий роз-диаграмм штрихов, полученных для землетрясения, произошедшего 22 декабря 2003 г., показал значительную перестройку плана деформаций при подготовке данного сейсмического события. Это наиболее заметно выражено на схемах, полученных при обработке космических изображений, полученных 25 ноября и 27 декабря 2003 г., особенно в южной и центральной частях района. Здесь господствующее ЮВ–СЗ направление линий вытянутости роз-диаграмм штрихов сменилось на субширотное и ЮЗ–СВ, согласное с направлением Поперечных Хребтов и разрывом Горлока соответственно (Бондур и др., 2005).

В сентябре 2004 г. произошло два сильных землетрясения – 28 сентября в Паркфилде (магнитуда 6.0) и 18 сентября на границе Сьерра-Невады и

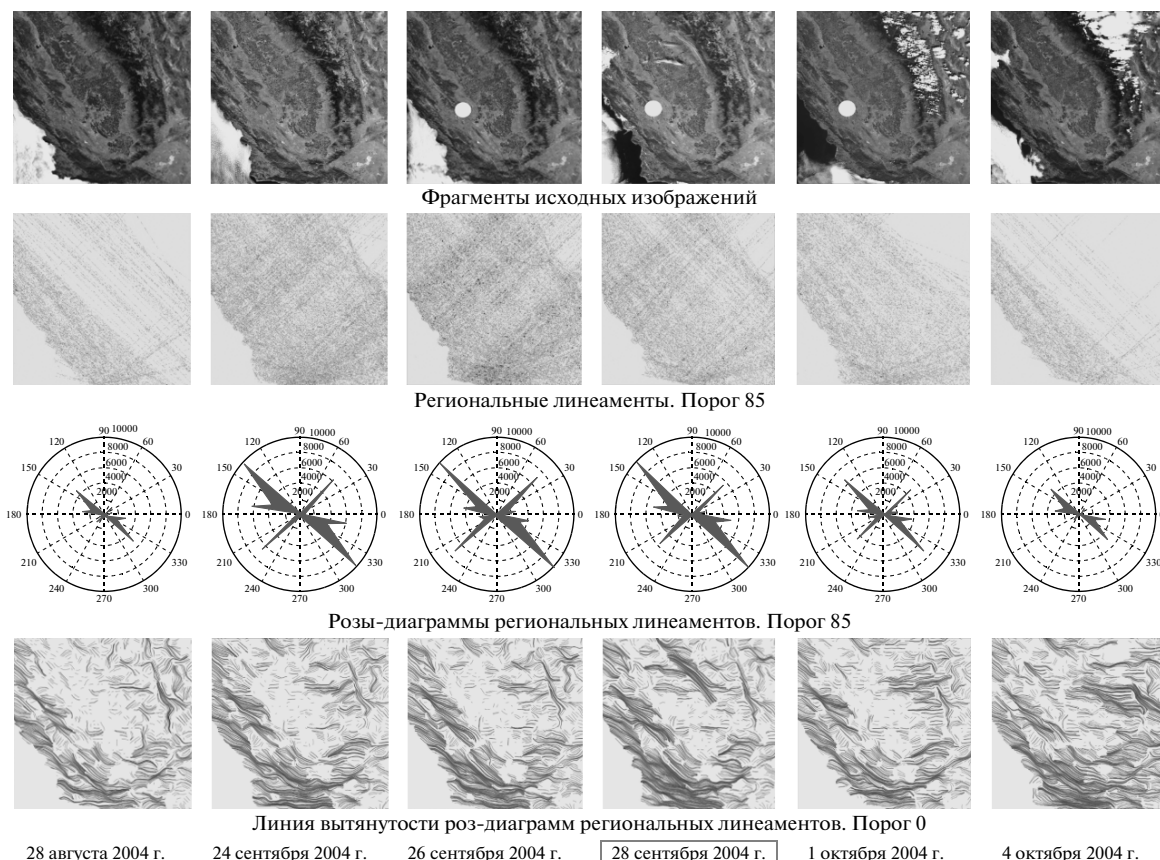


Рис. 3. Динамика систем линеаментов, выявленных по космическим изображениям в период землетрясения, произошедшего в Паркфилде (Калифорния) 28 сентября 2004 г. ($M = 6.0$).

Большого Бассейна (магнитуда 6.0). Наложение данных двух импульсов разрядки внутрикоровых напряжений привело к сокращению продолжительности предвестниковой цикличности динамики линеаментных систем до нескольких дней, вместо обычной двух–четырёхмесячной цикличности, которая отмечалась на описанных выше тестовых участках и в других сейсмоопасных регионах мира.

На рис. 3 приведены фрагменты исходных изображений, схемы региональных линеаментов (порог 85), розы-диаграммы направленности региональных линеаментов (порог 85) и линии вытянутости локальных линеаментов (порог 0), для землетрясения в Паркфилде. Анализ полученных роз-диаграмм показывает, что возбуждение систем линеаментов началось после 21 сентября и закончилось до 4 октября 2004 г., т.е. общая продолжительность предвестникового цикла возбуждения составляет около 10 дней (около пяти дней до землетрясения началось возбуждение и около пяти дней после него закончилось).

Эпицентр землетрясения, произошедшего 28 сентября 2004 г., был расположен непосредственно в осевой части разлома Сан-Андреас. Это

и определило характерный рисунок полей линий вытянутости роз-диаграмм штрихов в момент землетрясения (28 сентября 2004 г.), для которого четко выделяются линии вытянутости ЮВ–СЗ направлений. Анализ роз-диаграмм (см. рис. 3) указывает на то, что локальное поле линеаментов (штрихов) при подготовке землетрясения в Паркфилде было более устойчивым по сравнению с региональным полем, которое, судя по розам-диаграммам сквозных линеаментов, имело четко выраженную предвестниковую цикличность.

Для землетрясения, произошедшего 31 октября 2007 г. в Калифорнии в районе г. Сан-Хосе ($M = 5.6$), предвестниковая цикличность изменения количества проявленных линеаментов разных направлений также выражена достаточно четко в полученных розах-диаграммах (рис. 4). Максимальная степень их проявленности приходится на дни, близкие к толчку (особенно 2 ноября 2007 г.). Нарастивание систем линеаментов начало проявляться за 20 дней до землетрясения. К сожалению, погодные условия (облачность) не позволили расширить временной ряд оптических космических изображений, однако те данные, которые удалось получить и обработать, позволяют

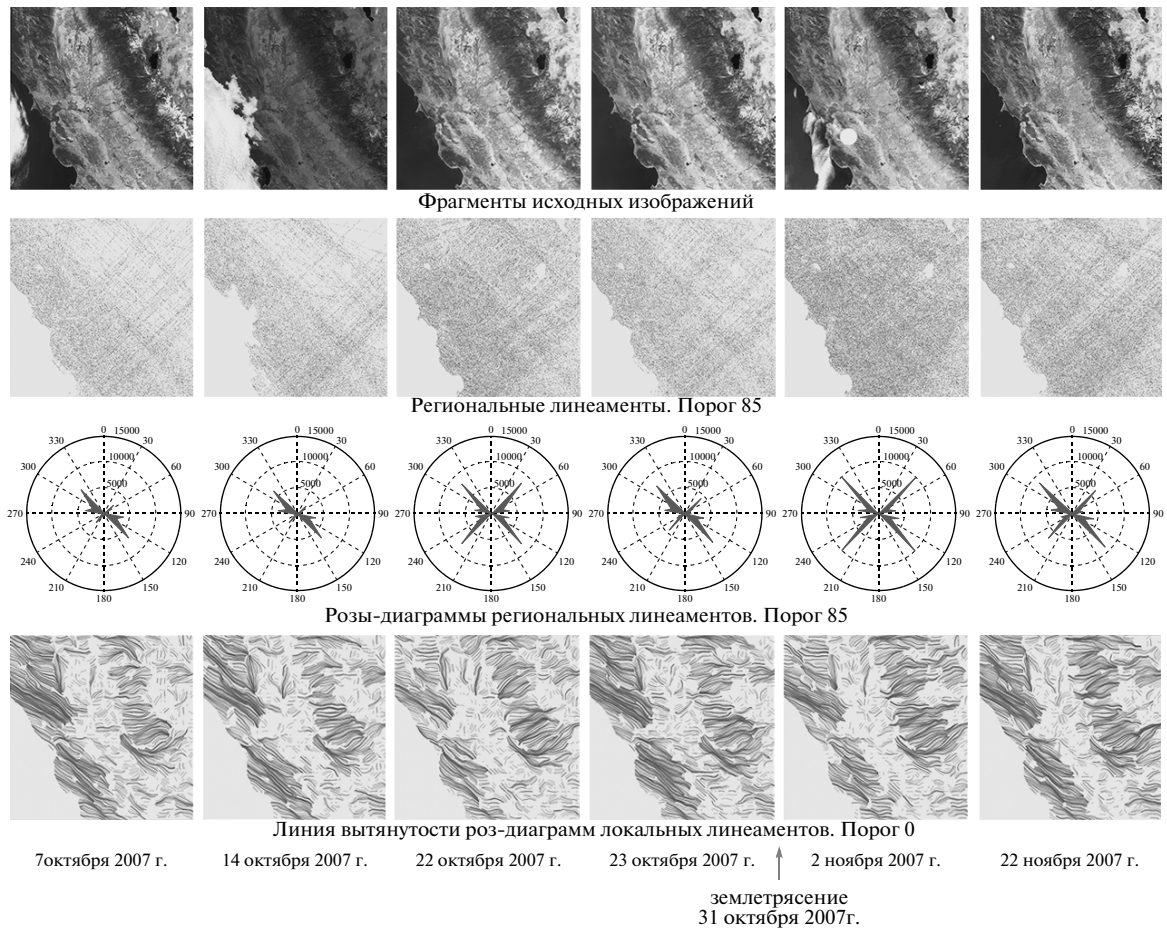


Рис. 4. Динамика систем линеаментов, выявленных по космическим изображениям в период землетрясения, произошедшего в Калифорнии в районе г. Сан-Хосе 31 октября 2007 г. ($M = 5.6$).

сделать вывод о наличии предвестниковой цикличности в изменении фигуры роз-диаграмм направленности линеаментов.

Результаты анализа схем линий вытянутости роз-диаграмм штрихов (см. рис. 4 внизу) подтверждают вывод, сделанный при анализе роз-диаграмм сквозных линеаментов, заключающийся в том, что в период подготовки землетрясения возрастает роль (степень проявленности) поперечных по отношению к разлому Сан-Андреас региональных и локальных линеаментов. Наиболее наглядно это проявляется при сравнении схем, полученных для 7 октября и 2 ноября 2007 г.

Примерно такая же картина проявления предвестниковой цикличности в розах-диаграммах направленности линеаментов наблюдается и для землетрясения, произошедшего 29 июля 2008 г. в Калифорнии вблизи г. Лос-Анджелес ($M = 5.4$) (рис. 5).

Обобщая результаты анализа роз-диаграмм сквозных линеаментов и линий вытянутости роз-диаграмм штрихов, полученных при автоматизированной обработке космических изображений

для разных районов территории Калифорнии, следует подчеркнуть, что выполненные исследования позволили выявить наличие четкой закономерности в изменении систем линеаментов в период подготовки исследованных землетрясений.

Эта закономерность заключается в следующем:

- в период подготовки землетрясений увеличивается роль секущих (поперечных) по отношению к зоне разлома Сан-Андреас линеаментов регионального и локального уровней их развития;

- перестройка плана систем линеаментов начинается за 2–3 мес. до землетрясений, достигая максимума (максимального количества секущих линеаментов) примерно за 20 дней до землетрясений и заканчивающаяся через 20 дней после них;

- системы линеаментов и обуславливающие их поля напряжений приходят в первоначальные состояния за 2–3 мес. после землетрясений, т.е. период успокоения по продолжительности примерно равен периоду возбуждения сейсмической активности при подготовке сильных землетрясений.

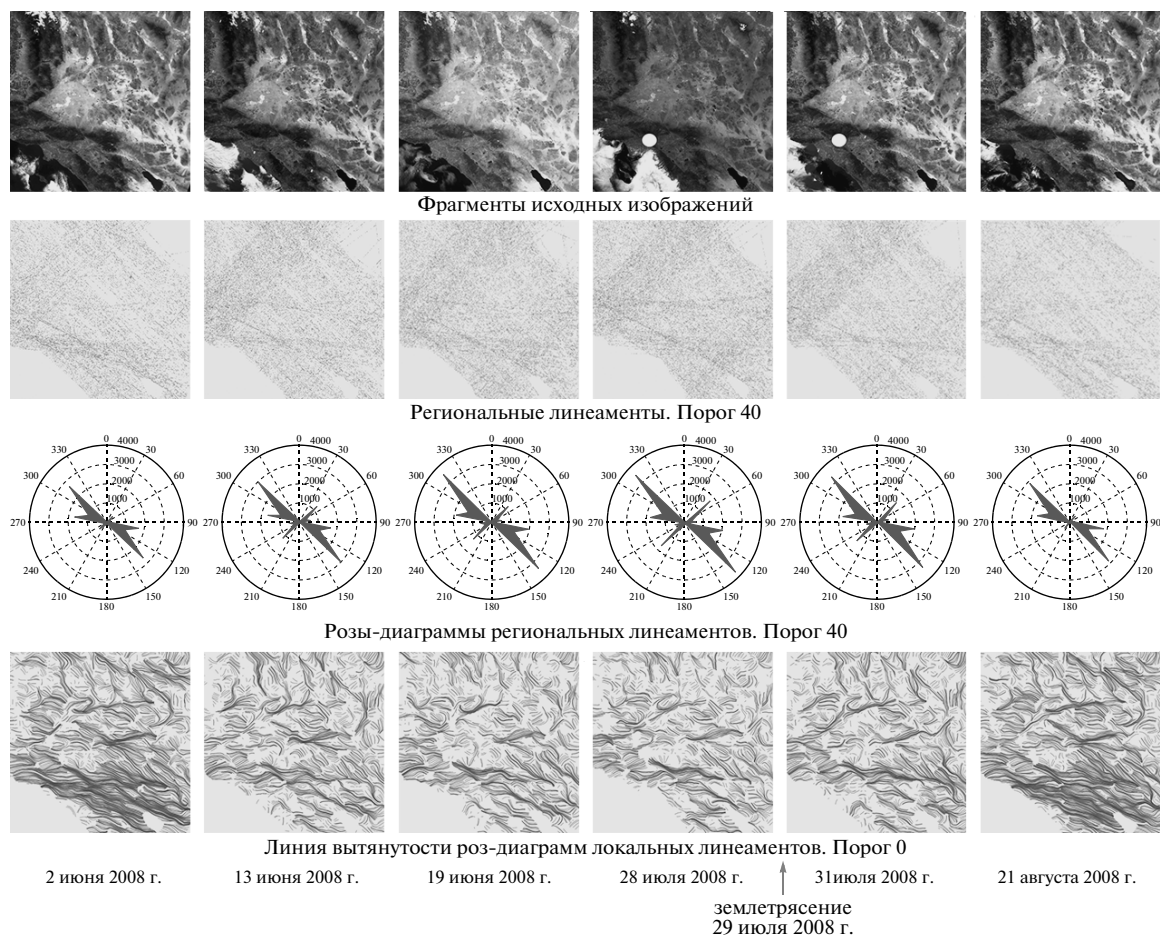


Рис. 5. Динамика систем линеаментов, выявленных по космическим изображениям в период землетрясения, произошедшего в Калифорнии вблизи г. Лос-Анджелес 29 июля 2008 г. ($M = 5.4$).

В целом выявленная цикличность является средне-краткосрочным предвестником землетрясений.

Землетрясение в Мексике

Анализ результатов исследования динамики систем линеаментов для землетрясения, произошедшего 4 апреля 2010 г. ($M = 7.2$) на территории Мексики подтвердил наличие предвестниковой цикличности и в этом регионе мира. На рис. 6 приведены фрагменты исходных изображений, схемы региональных линеаментов (порог 30), розы-диаграммы направленности региональных линеаментов (порог 30) и линии вытянутости локальных линеаментов (порог 0), для землетрясения на территории Мексики. За исследованный интервал времени (с 11 марта по 9 апреля 2010 г.) количество сквозных (региональных) линеаментов, судя по розам-диаграммам направленности линеаментов, возросло в 2 раза. Возрастание количества региональных и локальных линеаментов разных направлений происходило достаточно равномерно. Поэтому общий рисунок линий вы-

тянутости роз-диаграмм штрихов (см. рис. 6), как и роз-диаграмм сквозных линеаментов, за весь исследованный временной интервал практически не изменился, т.е. план поля напряжений и обусловленного им поля деформаций при подготовке данного землетрясения оставался постоянным, менялась лишь их интенсивность.

Таким образом, для этого землетрясения также установлено, что вначале до дня землетрясения наблюдается возрастание количества линеаментов, а затем, после сейсмического толчка, их уменьшение.

Землетрясение в Перу

При анализе космических данных, полученных для землетрясения, случившегося 27 января 2004 г. ($M = 5.2$) на юге Перу в районе резкой смены простирания Анд с ЮВ–СЗ на субмеридиональное, было выявлено, что при приближении к моменту землетрясения степень проявленности систем линеаментов на космических изображениях значительно возрастает. При всех порогах наиболее четко выражены диагональные системы

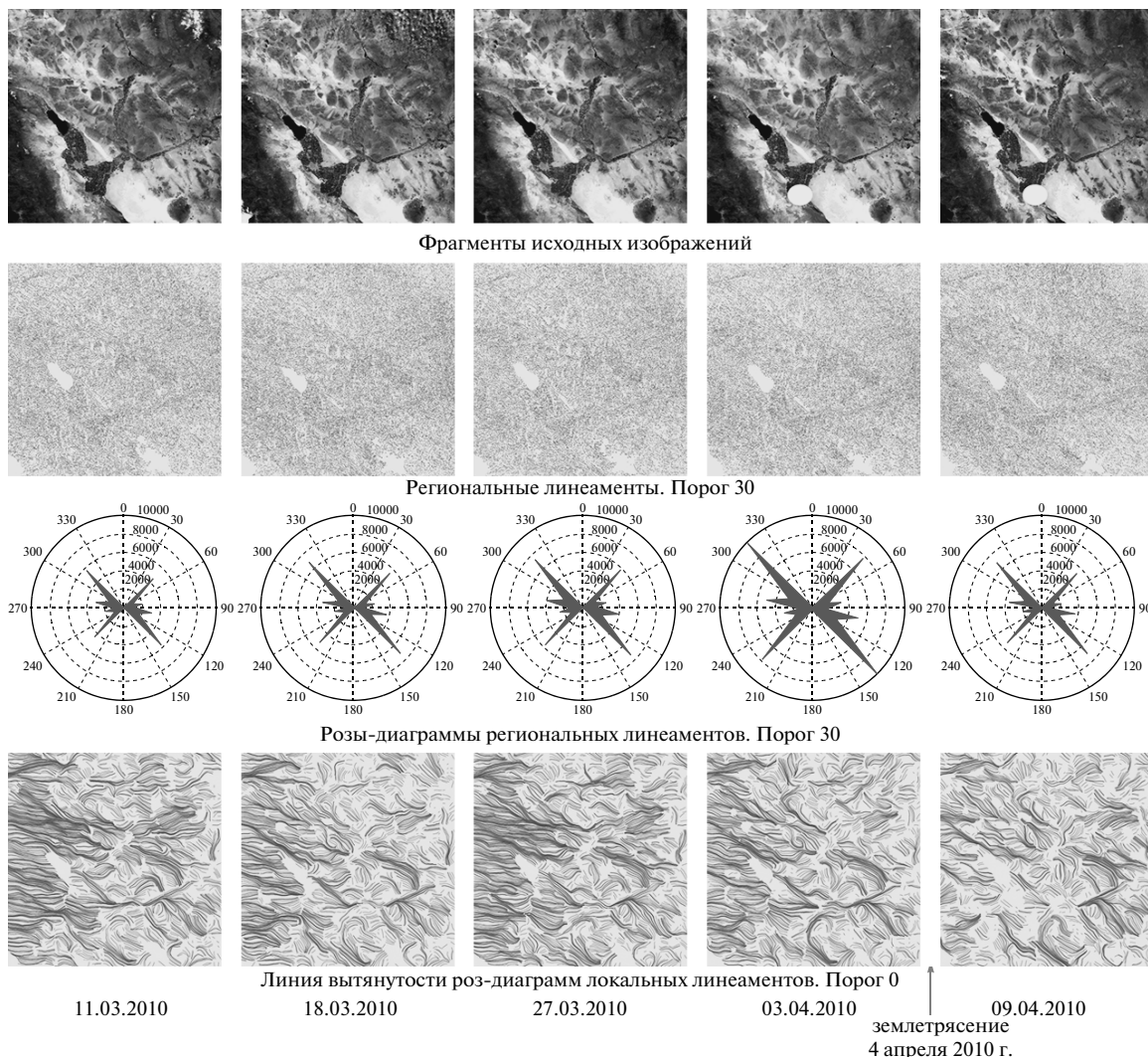


Рис. 6. Динамика систем линеаментов, выявленных по космическим изображениям в период землетрясения, произошедшего на севере Мексики 4 апреля 2010 г. ($M = 7.2$).

(ЮЗ–СВ, ЮВ–СЗ) линеаментов при явном преобладании систем линеаментов ЮЗ–СВ направлений.

Распределение линий вытянутости роз-диаграмм штрихов показывает, что в пределах исследуемого региона до начала землетрясения (схемы на 29 августа и 2 октября 2003 г.) четко выделялись два блока земной коры – ЮЗ с господствующим ЮЗ–СВ направлением штрих-линеаментов и СЗ с преобладающим ЮВ–СЗ направлением штрихов (рис. 7). В день землетрясения (27 января 2004 г.) блоки земной коры выступали как единое целое с преобладающим ЮЗ–СВ направлением штрих-линеаментов. После землетрясения постепенно восстановилась прежняя картина с разделением коры на два разнородных блока с разными полями напряжений и обусловленных ими разно ориентированными линиями вытянутости роз-диаграмм штрихов. Изменение ориентировки линий

вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов при приближении к моменту сейсмического толчка является предвестником землетрясения.

Катастрофическое землетрясение в Чили

Для территории Чили исследовалось катастрофическое землетрясение, произошедшее 27 февраля 2010 г. ($M = 8.8$) у Центрального побережья Чили. Следует отметить, что в этом регионе до главного толчка ($M = 8.8$) происходили многочисленные толчки с $M = 4.9–6.2$. За счет наложения деформационных волн это должно было усложнить возможность выявления динамики систем линеаментов, обусловленных главным толчком. Но в целом изменение систем линеаментов, как и в случае землетрясений, состоявшихся на территориях Перу и Мексики, достаточно закономерно – наблюдается постепенный рост

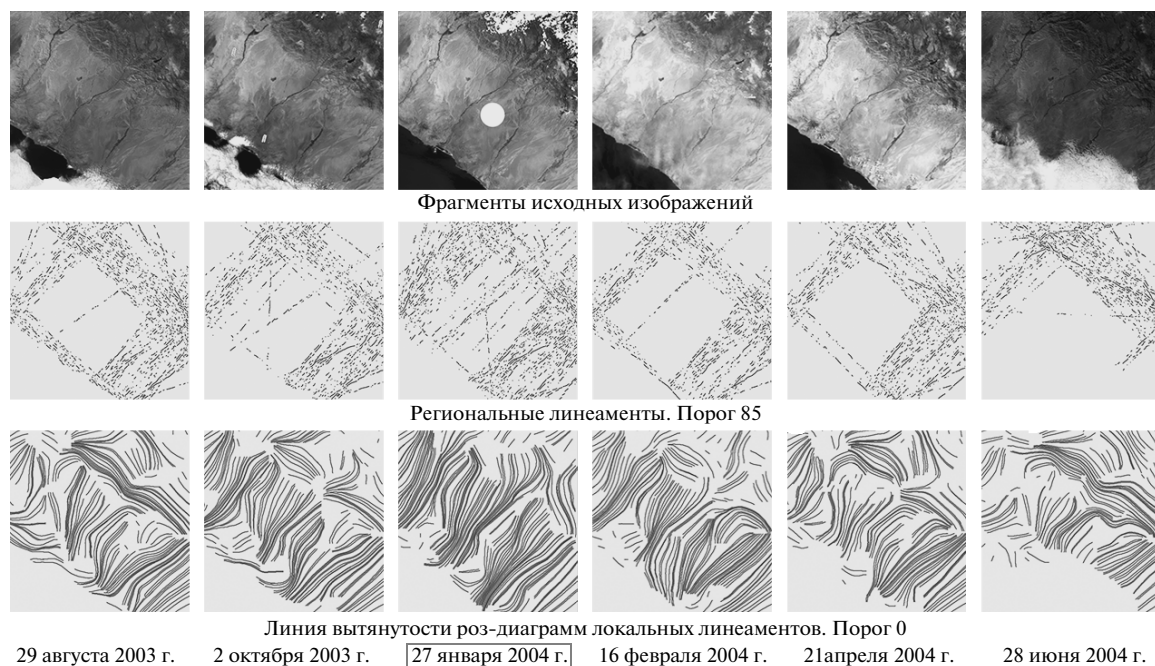


Рис. 7. Динамика систем линеаментов, выявленных по космическим изображениям в период землетрясения, произошедшего в Перу 27 января 2004 г. ($M = 5.2$).

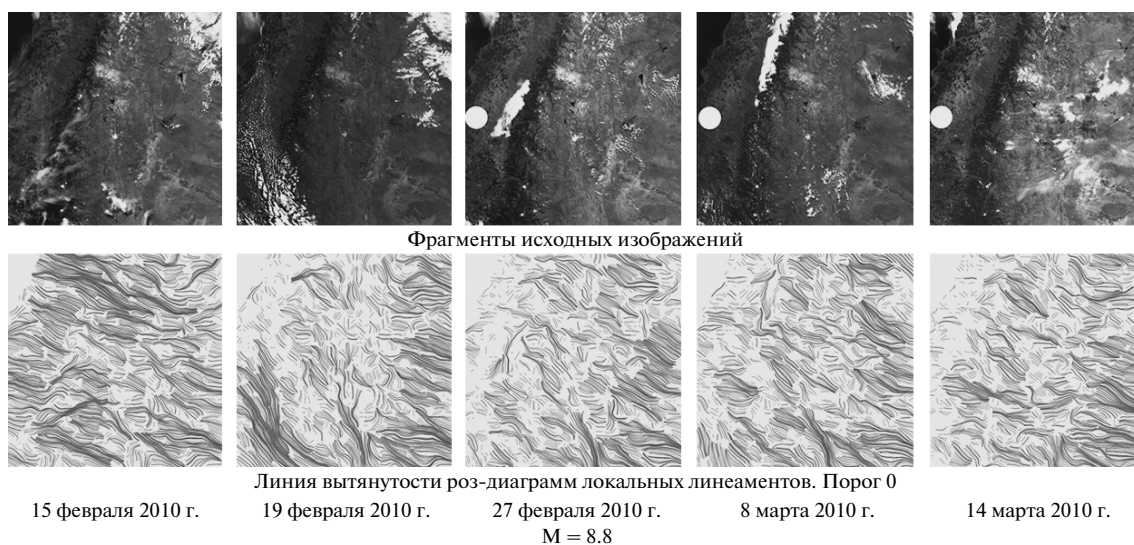


Рис. 8. Линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов при землетрясении в Чили, произошедшем 27 февраля 2010 г. ($M = 8.8$).

количества сквозных линеаментов. Поле локальных линеаментов (штрихов) для данного сейсмического события изменяется значительно сильнее.

На рис. 8 представлены фрагменты исходных изображений и линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов для этого землетрясения. На схеме линий вытянутости роз-диаграмм штрихов, выявленных при автоматизированном лине-

аментном анализе космического изображения, полученного 15 февраля 2010 г., преобладают направления ВЮВ–ЗСЗ, в день землетрясения, 27 февраля 2010 г., они развернулись преимущественно к северу, приобретя ориентировку ЮВ–СЗ и даже ССЗ–ЮЮВ. После землетрясения линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов вновь вернулись на прежнее направление ЗСЗ–ВЮВ (Бондур и др., 2011).

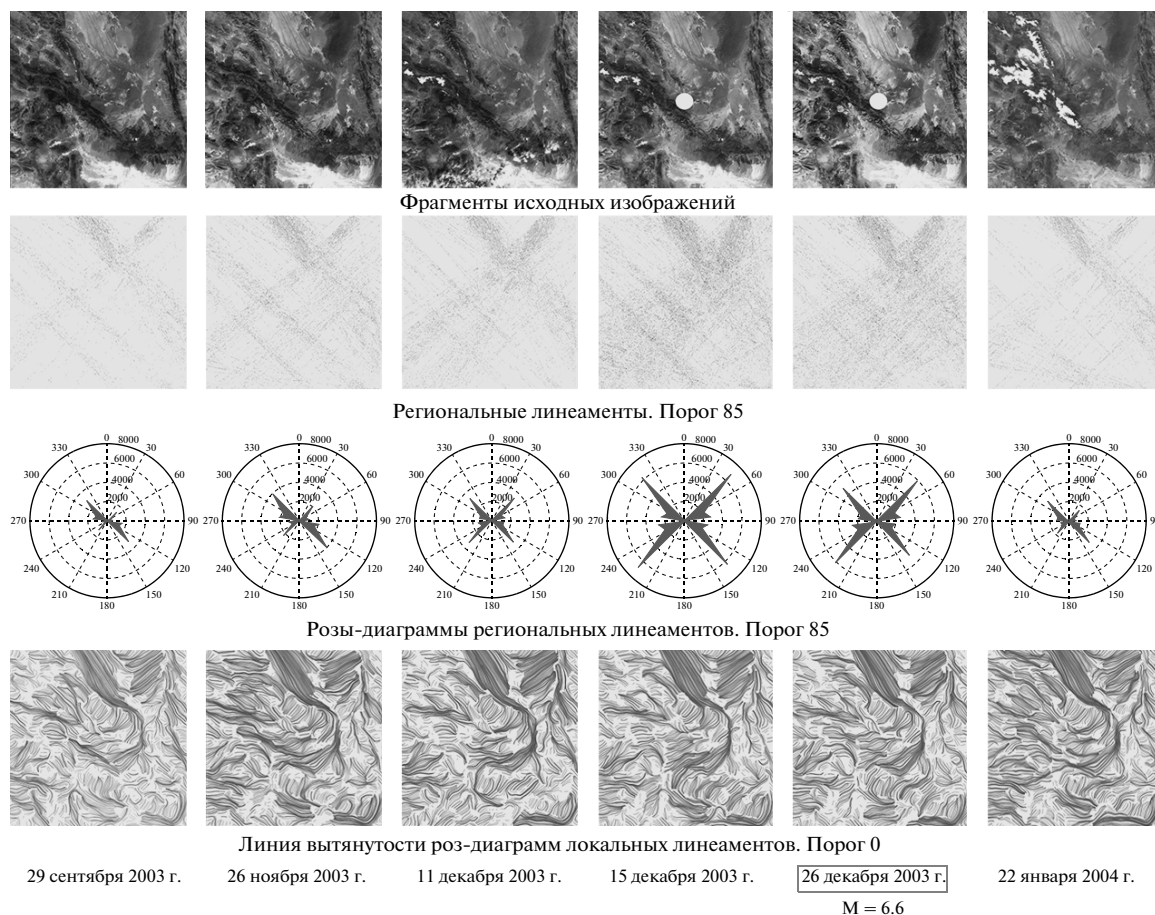


Рис. 9. Динамика систем линейментов, выявленных по космическим изображениям в период землетрясения в г. Бам (юго-восточный Иран) 26 декабря 2003 г. ($M = 6.6$).

Таким образом, при Чилийском землетрясении выявлено отчетливое предвестниковое изменение ориентировки региональных и локальных систем линейментов.

Землетрясение в Иране

Эпицентр землетрясения, состоявшегося 26 декабря 2003 г. ($M = 6.6$) на территории Ирана, располагался в юго-восточной части Центрального Ирана около г. Бам на стыке микроплиты Центрального Восточного Ирана и Лутского блока. Для этого сейсмического события был выполнен автоматизированный линейментный анализ шести космических изображений, полученных во временной период за 3 мес. до землетрясения и через 2 мес. после него, результаты которого приведены на рис. 9.

Розы-диаграммы сквозных линейментов, приведенных на этом рисунке, показывают, что проявленность линейментов в количественном и качественном отношении начинает изменяться за 3 мес. до землетрясения (в сентябре 2003 г.), достигая максимума за 11 дней до него. На космиче-

ском изображении, полученном 29 сентября 2003 г., лучше проявлены линейменты СЗ правления ($S3\ 315^\circ$), согласных с направлением основных геологических структур данного региона. Однако при приближении к моменту землетрясения намечается рост количества проявленных линейментов СВ направлений. За 15 дней до землетрясения СВ линейменты даже начинают преобладать над СЗ линейментами (см. роз-диаграмму за 11 декабря 2003 г.). Примерно через 1 мес. после землетрясения (22 января 2003 г.) проявленность систем линейментов возвращается на исходные позиции. Подобные изменения проявленности систем линейментов на космических изображениях в период подготовки землетрясения можно считать за предвестниковую цикличность, обусловленную закономерным изменением поля напряжений и плана деформаций.

Локальные системы линейментов, выявленные на основании данных дистанционного зондирования, для землетрясения в Иране (вблизи г. Бам) более устойчивы (стабильны) по сравнению с региональными. На это указывают относительно незначительные изменения ориентировок

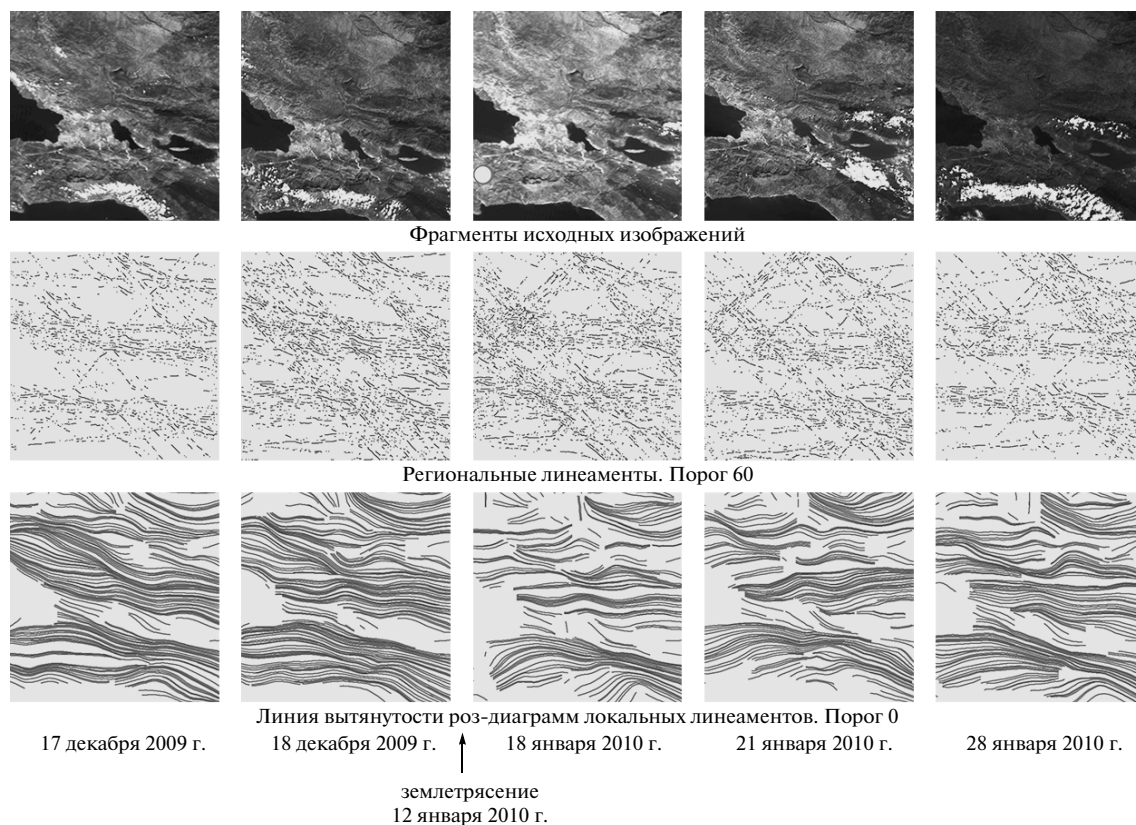


Рис. 10. Динамика систем линеаментов, выявленных по космическим изображениям для землетрясения на Гаити 12 января 2010 г. ($M = 7.0$).

линий вытянутости роз-диаграмм штрихов (рис. 9 внизу). Данное обстоятельство, видимо, обусловлено тем, что сейсмические деформации земной коры активизировали в основном региональную систему линеаментов, имеющую более глубокое заложение.

Катастрофическое землетрясение в Гаити

На острове Гаити 12 января 2010 г. произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 7.0, которое привело к огромному числу жертв и большому экономическому ущербу. Для этого землетрясения были обработаны космические изображения, полученные за 40 дней до него и через 26 дней после него.

Преобладающей системой линеаментов для этой территории является диагональная (по отношению к оси вращения Земли) система. Количественные изменения сквозных линеаментов до землетрясения и после него были незначительны. Изменение линий вытянутости роз-диаграмм штрих-линеаментов (рис. 10) более закономерно: при приближении к дате землетрясения постепенно увеличивается степень упорядоченности их ориентировок. Если примерно за месяц до толчка (17 декабря 2009 г.), вблизи эпицентра зем-

летрясения они были ориентированы в субширотном направлении, то за несколько дней после землетрясения (18 января 2010 г.) они приобрели явно преобладающую диагональную ориентировку, которая в дальнейшем (28 января 2010 г.) постепенно начала возвращаться к первоначальному плану (см. рис. 10). Таким образом, для землетрясения на Гаити значительные изменения претерпел лишь план локальных деформаций, а региональный был относительно стабильным.

Землетрясение в Калининграде

Калининградское землетрясение произошло 21 сентября 2004 г. ($M = 4.8; 5.0$). Это сейсмическое событие очень интересно в методологическом плане, так как оно произошло в пределах устойчивой древней Восточно-Европейской платформы с собственным гипоцентром в земной коре, расположенном на пересечении субширотного и субмеридионального разломов.

В качестве исходных данных для космического мониторинга территории Калининградской области использовались изображения, полученные со спутника TERRA в 2001–2006 гг., т.е. начиная за три года до землетрясения и заканчивая через два года после него (см. рис. 11). Для этой терри-

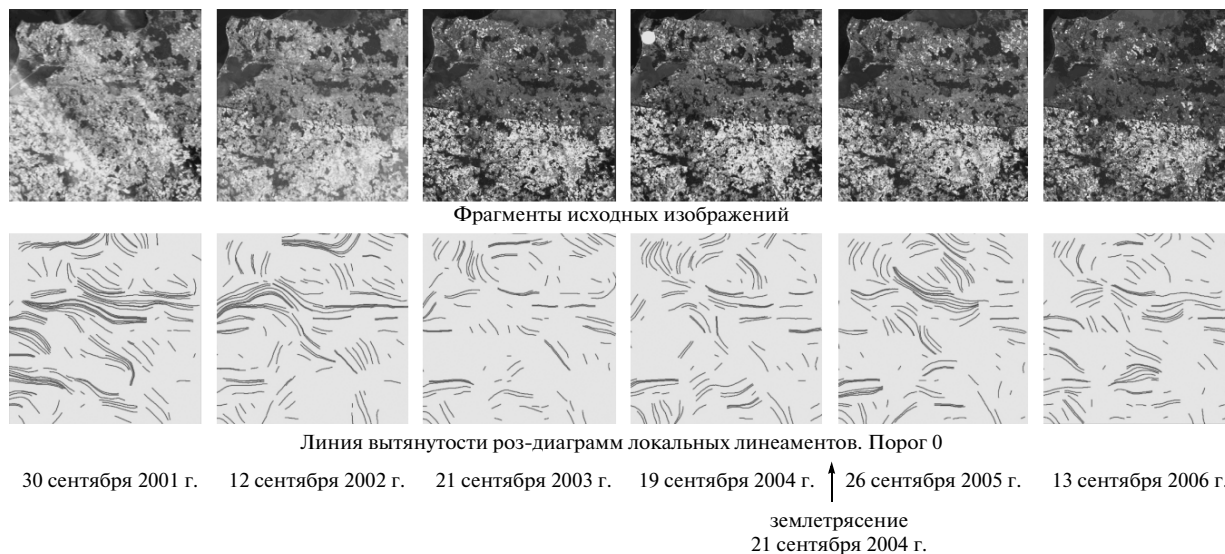


Рис. 11. Космические изображения и линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов для Калининградского землетрясения, состоявшегося 21 сентября 2004 г. ($M = 4.8-5.0$).

тории были отработаны три тестовых участка, расположенных в пределах территории, охваченной одним космическим изображением. Первые два участка (размером $1600 \times 1600 \text{ км}^2$ и $500 \times 500 \text{ км}^2$) охватывали территорию эпицентра землетрясения, а третий (размером $500 \times 500 \text{ км}^2$) находился в 600 км к востоку от него. Для каждого года обрабатывались лишь сентябрьские изображения – в месяц, когда произошло землетрясение в 2004 г., что позволило устранить влияние сезонной изменчивости растительного покрова и климата на результаты линеаментного анализа (Бондур и др., 2010б).

Сравнительный анализ результатов, полученных в работе (Бондур и др., 2010б), показал, что на схемах сквозных линеаментов и розах-диаграммах, полученных для трех тестовых участков, присутствуют три основных направления – два диагональных и субширотное. Однако четкой закономерности в динамике систем линеаментов, позволяющей использовать их как предвестник, не было выявлено.

Более мобильной оказалась локальная система линеаментов. На рис. 11 приведены фрагменты исходных изображений и линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов (порог 0). На схемах линий вытянутости штрихов, показанных на этом рисунке, хорошо заметно изменение плана локальных деформаций, проявляющихся в период с 30 сентября 2001 г. по 19 сентября 2004 г. (год землетрясения), который лишь частично восстановился после землетрясения в 2005 и 2006 г.

В районе эпицентра землетрясения вместо субширотных стали преобладать субмеридиональные направления линий вытянутости. Появились коль-

цевые образования (см., например, линии вытянутости за 19 сентября 2004 г. и 26 сентября 2005 г. на рис. 11), которые не выражены в явной форме на изображениях поверхности Земли, и, возможно, связанные с неоднородностями структуры фундамента, имеющими изометричную форму.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТНОШЕНИЙ СУММАРНЫХ ДЛИН ЛИНЕАМЕНТОВ РАЗНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

Важную информацию о динамике систем линеаментов можно получить, используя парные отношения суммарных длин локальных линеаментов разных направлений, которые выделяются при нулевом пороге. Так как анализировались восемь основных (средних) направлений, таких парных сочетаний было 28. Возрастание (или убывание) при приближении к моменту землетрясения и убывание (или возрастание) после него является предвестником землетрясения. В отдельных случаях (например, при землетрясении в Калининграде) только благодаря анализу этих отношений появилась возможность выявить наличие предвестниковой цикличности в динамике систем линеаментов, которая проявляется в закономерном увеличении (или уменьшении) величины отношения при приближении к дате землетрясения и уменьшении (или увеличении) после него (Бондур и др., 2010б; 2011).

В отдельных случаях отношения могут служить и индикатором силы землетрясения. Для примера рассмотрим три землетрясения разной силы, состоявшиеся в Калифорнии. Для землетрясения, произошедшего 9 сентября 2001 г. ($M = 4.2$) в западной части Поперечных Хребтов, предвестни-

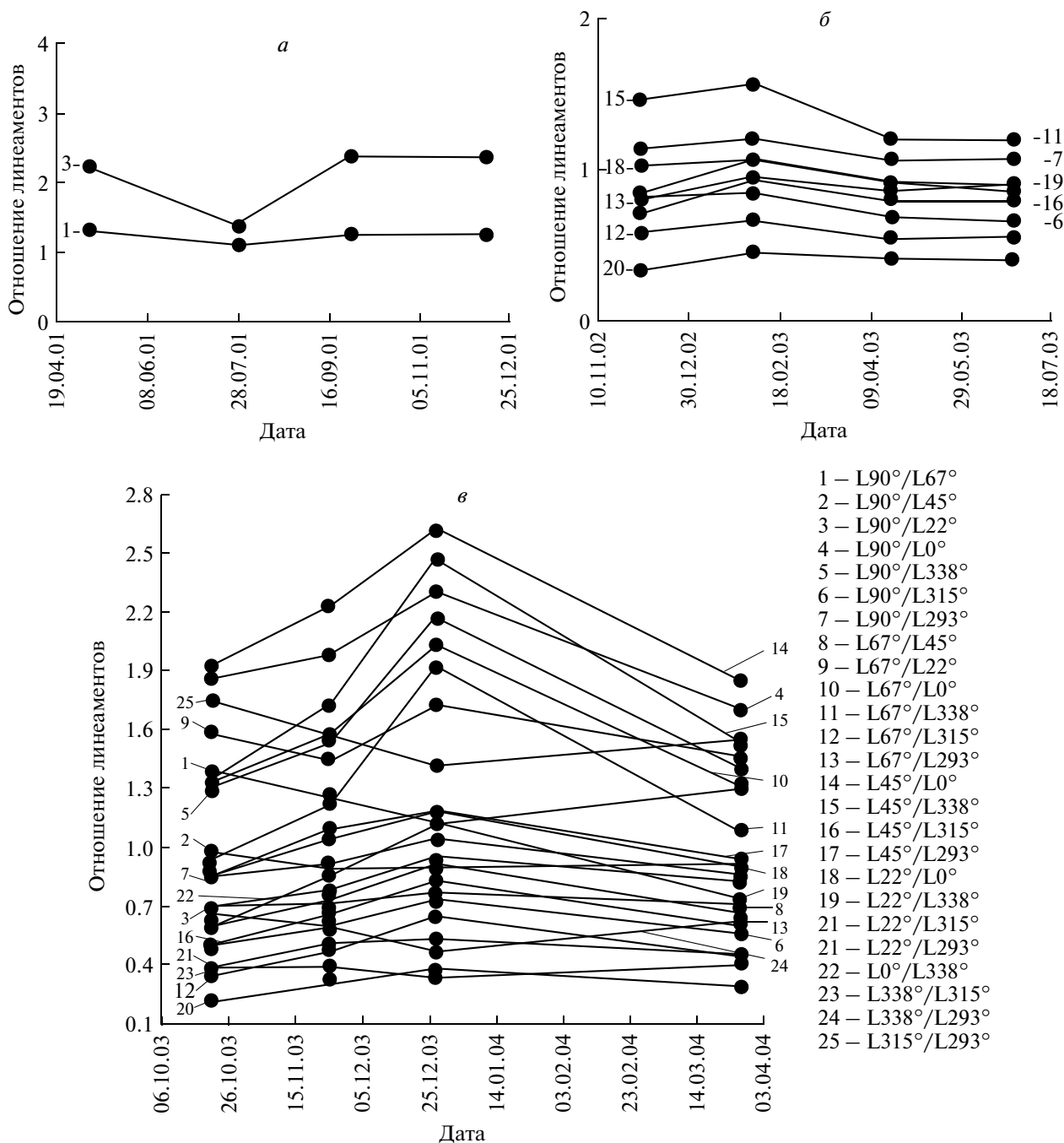


Рис. 12. Изменение величины отношения суммарных длин линеаментов разных направлений для землетрясений, произошедших в Калифорнии: *а* – 9 сентября 2001 г. ($M = 4.2$); *б* – 22 февраля 2003 г. ($M = 5.2$) в восточной части Поперечных Хребтов; *в* – 22 декабря 2003 г. вблизи г. Сан-Симеон ($M = 6.5$).

ковая цикличность изменения величины отношения проявлена всего в двух случаях парных сочетаний отношений линеаментов разных направлений (рис. 12*а*). Для землетрясения, произошедшего 22 февраля 2003 г. ($M = 5.2$) в восточной части Поперечных Хребтов, предвестниковая цикличность выявлена в 10 случаях (см. рис. 12*б*), что составляет 36% от всех изученных парных сочетаний. Для землетрясения, произошедшего

22 декабря 2003 г. ($M = 6.5$) вблизи г. Сан-Симеон, предвестниковая цикличность проявлена в 24 случаях из 28 возможных, что составляет 86% (рис. 12*в*).

Анализ изменения величин отношений суммарных длин региональных (так называемых сквозных) линеаментов позволяет не только выявить предвестниковую цикличность их измене-

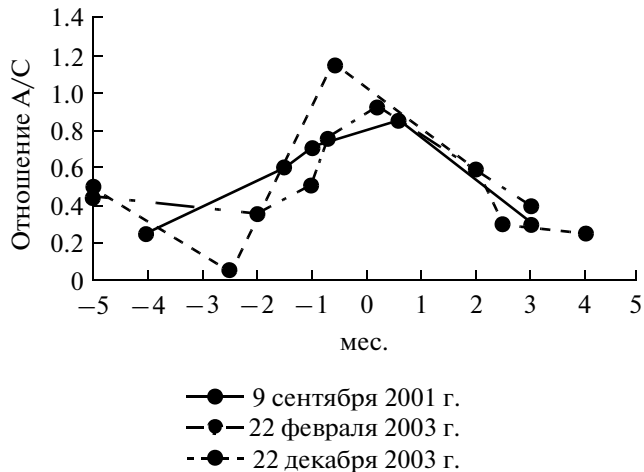


Рис. 13. Отношения количества секущих (А) и согласных (С) линеаментов при пороге 85 для землетрясений, состоявшихся в Калифорнии 9 сентября 2001 г. ($M = 4.2$), 22 февраля 2003 г. ($M = 5.2$) и 22 декабря 2003 г. ($M = 6.5$).

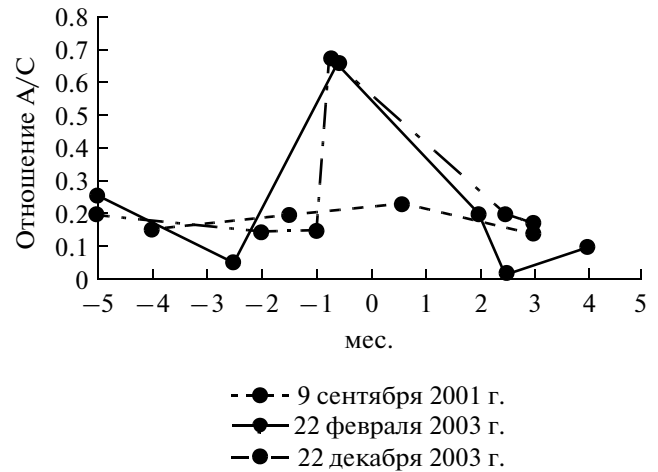


Рис. 14. Отношение количества секущих (А) и согласных (С) линеаментов при пороге 100 для землетрясений, состоявшихся в Калифорнии 9 сентября 2001 г. ($M = 4.2$), 22 февраля 2003 г. ($M = 5.2$) и 22 декабря 2003 г. ($M = 6.5$).

ния, но и иногда дифференцировать их по силе. На рис. 13, 14 в качестве примера приведены зависимости, характеризующие изменение величин отношений секущих и согласных линеаментов в периоды подготовки и завершения трех землетрясений в Калифорнии при различных порогах.

Как следует из рис. 13, величина отношения секущих (А) линеаментов к согласным (С) при пороге 85 непрерывно растет по мере приближения к моменту землетрясения, достигая максимальных значений за 20–30 дней до него и после него. Обращает на себя внимание уменьшение величины отношения А/С за 2–2.5 мес. 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 мес. и достигает примерно того же значения, которое она имела за 2.5–3 мес. до землетрясений. Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 13, следует, что величина А/С больше для более сильных землетрясений.

Данная закономерность еще четче проявляется при анализе кривых отношений А/С для порога 100 (см. рис. 14). 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. ($M = 6.5$). Немного меньше величина А/С характерна для относительно более слабого землетрясения, произошедшего 22 февраля 2003 г. ($M = 5.4$). Наименьшая величина А/С характерна для наиболее слабого (из изученных) землетрясения, состоявшегося 9 сентября 2001 г. ($M = 4.2$).

Выявленная закономерность, проявляющаяся при использовании больших порогов в процессе обработки космических изображений, может быть использована для прогнозирования интенсивности землетрясений.

Если сопоставить полученные кривые для линеаментов, выделенных при пороге 100 (рис. 14), то можно выявить еще одну особенность. Как и при пороге 85 (рис. 13), перед землетрясением величина А/С понижается, а за 2.5 мес. (до землетрясения, состоявшегося 22 февраля 2003 г.) или за 1 мес. (до землетрясения, состоявшегося 22 декабря 2003 г.) — резко увеличивается. Этот факт указывает на то обстоятельство, что степень выраженности согласных линеаментов (С) начинает увеличиваться гораздо раньше, чем секущих (А). Однако для секущих линеаментов характерен более интенсивный рост непосредственно перед самим землетрясением.

Данная особенность, выявленная при исследовании различных землетрясений, может использоваться для среднесрочного (за 2–3 мес. до землетрясения) и краткосрочного (за 20 дней до землетрясения) выявления предвестников землетрясений. Эта особенность, по-видимому, обусловлена перестройкой напряженно-деформированного плана и флюидного режима коры в период подготовки землетрясения и возвратом его в первоначальное состояние после него.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перестройка поля напряжений и деформаций в период подготовки землетрясений сопровождается закономерным изменением не только систем линеаментов, но и других краткосрочных пред-

вестников — сейсмических, геофизических, геодезических, геохимических, гидрогеодинамических, биологических и др.

Изменение напряженно-деформированного состояния земной коры вызывает изменение скорости пробега продольных — p и поперечных — s волн в очаговой области непосредственно перед землетрясением, электрического сопротивления горных пород, вариациями магнитного и гравитационного полей, а так же другими эффектами. Продолжительность предвестниковых циклов подобных закономерных изменений различна и составляет от нескольких суток (иногда даже часов) до нескольких месяцев и лет. Так, к примеру, период развития предвестников, зафиксированных по сейсмическим обменным волнам в земной коре Тянь-Шаня, составляет от нескольких месяцев (2–4) до нескольких лет (6–12) (Базавлук, Юдахин, 1993).

Большинство геофизических полей позволяют выявить предвестниковую цикличность гораздо меньшей продолжительности (несколько месяцев и меньше), сопоставимой с выявленной нами при помощи автоматизированного линеаментного анализа. В качестве примеров можно указать на выявленные электротеллурические предвестники продолжительностью до 30 сут перед землетрясением (Пономарев и др., 1991), аномалии электросопротивления горных пород от пяти дней до трех недель (Пруцкая и др., 2005), предвестниковые изменения амплитуд приливов в земной коре за 2–3 мес. (Нерсеров и др., 1991), синхронные аномальные вариации содержания газов в подземной воде за 3–5 сут до землетрясения (Барсуков и др., 1992), предвестниковые изменения уровня воды в скважинах за 3–4 мес. и менее до толчка (Киссин, 2009; Пруцкая и др., 2005).

Среди характеристик предвестников землетрясений особый интерес представляют кривые их вариаций с экстремумом, который связывают с изменением знака или скорости деформации (Киссин, 2009). В этой работе отмечается, что в ступенчатой кривой, не имеющей экстремума, характерной точкой является прекращение наклона или подъема, что свидетельствует об изменении скорости деформации. Это справедливо для всех деформационных предвестников и в большинстве случаев — для гидрогеодинамических предвестников. Такие характерные точки на кривых можно рассматривать как наступление завершающей стадии в процессе подготовки землетрясения.

В случае появления при подготовке землетрясения на кривой точки экстремума изменения характера деформации вплоть до момента сейсмического разрыва уже не происходит и ход кривой сигнала-предвестника уже не испытывает резких изменений. Появление экстремума или перелома

(резкого изменения градиента) кривой предвестника сигнализирует о переходе процесса подготовки к его последней стадии. В работе (Киссин, 2009) предлагается принять начало активизации предвестника вплоть до появления на кривой экстремума за среднесрочный предвестник землетрясения, а после экстремума — за краткосрочный.

На основе обобщения продолжительных наблюдений на территории бывшего СССР и Китая в работе (Киссин, 2009) показано, что для больше половины гидрогеодинамических предвестников время экстремума составляет 0–10 сут, а почти для 70% таких предвестников — от 0 до 20 сут. В месячный интервал укладываются 75–80% всех значений экстремума. Это значит, что завершающий этап подготовки землетрясений продолжается сравнительно недолго, в большинстве случаев не более 10–20 сут.

Результаты наших исследований предвестниковой динамики линеаментных систем, полученные на основании данных дистанционного зондирования, достаточно хорошо вписываются в экспериментально-теоретические построения, полученные в работе (Киссин, 2009) в основном по результатам гидрогеодинамического мониторинга, а также позволяют их детализировать и уточнить. Период регистрации экстремума до момента землетрясения, выявленный нами, как и в случае гидрогеодинамических предвестников, достигает 10–20 сут. Он фиксируется по изменению роз-диаграмм региональных линеаментов, особенно наглядно проявляющемуся в изменении относительного количества продольных (согласных с геологическими структурами) и секущих региональных линеаментов (см. рис. 2–11). Однако экстремум сохраняется и после толчка примерно в течение тех же 10–20 сут. Это указывает на то, что период максимального возбуждения регионального поля напряжений и деформаций имеет примерно одинаковую продолжительность до землетрясения и после него.

Начало возбуждения напряженно-деформированного состояния земной коры перед землетрясением, фиксируемое по региональным линеаментам, составляет 1–3 мес., т.е. соответствует продолжительности гидрогеодинамического предвестника, зафиксированного в 70% изученных землетрясений в СССР и Китае (Киссин, 2009).

На кривых изменения величины суммарных длин отношений линеаментов разных направлений (см. рис. 12–14) экстремум не выражен. Относительные изменения размеров локальных систем линеаментов идут, постепенно повышаясь (или понижаясь) к моменту землетрясения и понижаясь (или повышаясь) после него. Это подтверждается и характером постепенного изменения линий вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов (см. рис. 2–11), которые показывают в наглядной форме прохождение предвестни-

кового возбуждения за весь период (1–3 мес. до толчка и 1–3 мес. после него), отражающей перестройку поля напряжений и деформаций в период подготовки землетрясения.

Анализ линий вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов вскрывает еще одну очень важную закономерность — нередко разный характер планов деформаций в соседних блоках земной коры, разделенных сейсмогенерирующим разломом. В исследованных землетрясениях в одном контактирующем блоке поле напряжений и деформаций мало изменялось, а в другом блоке по другую сторону от сейсмогенерирующего разлома оно резко менялось и линии вытянутости роз-диаграмм локальных линеаментов приобретали другую ориентировку, которая вновь возвращалась в исходное состояние после землетрясения (см. рис. 2–11).

Данная закономерность позволяет говорить о возможности прогноза не только времени, но также места землетрясения и пространственного положения сейсмогенерирующего разлома, разделяющие блоки с разной динамикой локальных линеаментов.

Таким образом, изучение предвестниковых деформационных волн путем автоматизированной статистической обработки региональных и локальных линеаментов, выявляемых по разновременным космическим изображениям, позволяет осуществить как среднесрочный (1–3 мес.), так и краткосрочный (до 10–20 дней) прогноз землетрясений с указанием времени, места и возможной силы землетрясения. Последнее подтверждается на основании выявленной прямой зависимости закономерных изменений величины отношений суммарных длин сквозных линеаментов разных направлений от силы землетрясения (см. рис. 12–14).

Причиной достаточно высокоскоростной (дни, недели, месяцы) цикличности многих предвестников (геохимических, термических, деформационных, геофизических и др.), видимо, являются флюиды, имеющие мантийное и внутрикоровое происхождение (Гуфельд, 2008; Киссин, 2009; Бондур, Зверев, 2005а; 2005б; Пруцкая и др., 2005). Флюидогенный механизм землетрясений, связанный с механическим (в случае, если флюиды обладают давлением равным или более литостатического) и термическим воздействием на геологическую среду, а также с их ролью в качестве смазочного материала, снижающего трение блоков, является достаточно мобильным, чтобы изменить физические и химические поля внутри земной коры и вызвать развитие средне- и краткосрочных предвестников в период подготовки землетрясений.

Другие механизмы (термические, магматические, конвективные, тектонические и т.д.) не столь мобильны и воздействуют на земную кору более

продолжительное время и более однонаправлено. Поэтому они не могут привести к достаточно быстрым одновременным закономерным флуктуациям предвестников разной природы (сейсмической, геофизической, геохимической, деформационной, гидрогеологической, биологической и т.д.) с периодичностью в дни, недели и месяцы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные на основании автоматизированного линеаментного анализа разновременных космических изображений в различных сейсмоактивных районах земного шара, позволили выявить закономерные циклические изменения региональных и локальных систем линеаментов в период подготовки землетрясений. Данная предвестниковая цикличность динамики систем линеаментов зафиксирована в характере изменения ориентировки и формы роз-диаграмм, в изменении величины отношений суммарных длин линеаментов разных направлений и осредненных линий вытянутости роз-диаграмм линеаментов.

Предвестниковая цикличность динамики статистических показателей локальных и региональных систем линеаментов охватывает периоды до нескольких месяцев: обычно 1–3 мес. до начала сейсмических событий и 1–3 мес. после них. Максимальная (экстремальная) интенсивность изменения количества и направленности региональных и локальных систем линеаментов охватывает, как правило, интервал времени за 10–20 дней до толчка и 10–20 дней после него. Судя по линиям вытянутости роз-диаграмм локальных и региональных линеаментов, эпицентры землетрясений нередко приурочены к границам блоков, различающихся планом и интенсивностью предвестниковых деформаций.

Данные статистические закономерности, проявляющиеся в динамике региональных и локальных систем линеаментов, позволяют осуществить среднесрочный (за 1–3 мес. до событий) и краткосрочный (за 10–20 дней до событий) прогноз землетрясений по данным дистанционного мониторинга с указанием времени, места и возможной силы землетрясения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках госконтрактов № 02.740.11.0330; № П213.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базавлук Т.А., Юдахин Ф.Н. Деформационные волны в земной коре Тянь-Шаня по сейсмологическим данным // Докл. РАН. 1993. Т. 329. № 5. С. 565–570.

Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А., Игумнов В.А., Ибрагимова Т.Л., Серебренников В.С.,

- Султанходжаев А.Н. Геохимические методы прогноза землетрясений М.: Наука, 1992. 213 с.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // Докл. РАН. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеamentов // Исслед. Земли из космоса. 2005б. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Кузнецова Л.В. Космический мониторинг динамики систем линеamentов в период подготовки землетрясений в Калифорнии // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. № 5. 2005. С. 47–55.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Физическая природа линеamentов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. № 3. Т. 2. С. 177–183.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Кузнецова Л.В. Космический мониторинг геодинамических предвестников крупных землетрясений. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. № 3. Т. 2. С. 184–189.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линеamentов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Булатова А.Л., Гапонова Е.В. Изучение изменения поля напряжений в период подготовки землетрясения при помощи линий вытянутости роз-диаграмм линеamentов // Сб. тез. конф. М.: ИКИ РАН, 2010а. С. 250–251.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Булатова А.Л., Гапонова Е.В., Цидилина М.Н. Автоматизированная обработка временных рядов космических изображений для исследования динамики линеamentов с целью прогноза землетрясений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010б. № 4. С. 69–77.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т., Булатова А.Л., Гапонова Е.В. Выявление деформационных волн-предвестников землетрясений путем линеamentного анализа разновременных космических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 6.
- Гидрогеохимические предвестники землетрясений / Под ред. Г.М. Варшал. М.: Наука, 1985. С. 41–48.
- Гуфельд И.Л. Физико-химическая механика сильных коровых землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2008. № 1. С. 62–65.
- Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып. 5. Том 1. М.: ООО “Азбука-2000”, 2008. С. 102–112.
- Киссин И.Г., Гумен А.М. Гидрогеологические индикаторы современных движений земной коры в асейсмичном районе // Докл. РАН. 1994. Т. 334. № 6. С. 768–772.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.
- Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Изд-во Моск. гос. горного унив., 2004. 262 с.
- Нерсеров И.Л., Передерин В.П., Боканенко Л.И., Галаганов О.Н. Локальные деформации, наклоны земной поверхности и вариации уровня грунтовых вод на Гармском полигоне в 1981–1987 гг. // Землетрясение и процессы их подготовки. М.: Наука, 1991. С. 164–181.
- Никонов А.А. Землетрясение... (Прошлое, современность, прогноз). М.: Знание, 1984. 192 с.
- Певнев А.К. О не востребуемых возможностях геодезического метода в проблеме прогноза землетрясений // Геодезия и картография. 2000. № 7. С. 24–37.
- Пономарев А.В., Салов Б.Г., Завьялов А.Д., Ирисова Е.Л. Исследования вариаций электротеллурического поля // Комплексное исследование по прогнозу землетрясений. М.: Наука, 1991. С. 199–207.
- Пруцкая Л.Д., Здоров А.Г., Батурина Н.В., Круткина О.Н. Основные результаты двадцатилетних исследований по проблеме прогноза землетрясений на Северном Кавказе // Регион. геол. и металлогения. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005. Вып. 25. С. 190–199.
- Bondur V., Kuznetsova L. Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using The Method of Lineament Analysis // 31st Intern. Symp. on Rem. Sens. of Environment. ISRSE, 2006. P. 376–379.

Space Methods in Predictive Cyclic Dynamics of Lineament System Before Preparation of the Earthquakes

V. G. Bondur¹, A. T. Zverev², E. V. Gaponova¹, A. L. Zima¹

¹Scientific Research Institute for aerospace monitoring “AEROCOSMOS”, Moscow

²Moscow State University for Geodesy and Cartography, Moscow

The results of the study predictive cyclic stress-strain state of the lithosphere during the preparation of significant seismic events through automated lineament analysis of multi-temporal satellite images. The proposed method was tested by the example of the strong and devastating earthquakes over the last decade in different parts of the world. Identified predictive cyclical dynamics of the lineament system has a period of 1 to 3 months and allows you to predict the time, place and possible earthquake intensity.

Keywords: space images, precursors of earthquakes, geodynamics, lineaments, rose-diagrams, seismic hazard areas