

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЛИНЕАМЕНТОВ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Академик **В.Г. Бондур**¹, профессор, доктор геол.-мин. наук **А.Т. Зверев**²,
ст. инженер **А.Л. Булатова**¹, инженер **Е.В. Гапонова**¹, зав. отделом **М.Н. Цидилина**¹

¹*Научный центр аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»*

²*Московский государственный университет геодезии и картографии*

E-mail: office@aerocosmos.info

Аннотация. Развит метод прогноза землетрясений, который позволяет выявить предвестниковые изменения напряженно-деформированного состояния земной коры по данным наблюдений за системами линеаментов путем автоматизированного анализа регулярно поступающих космических изображений. В данной работе использованы длинные временные ряды серий космических изображений, охватывающие несколько лет, при обработке которых анализировались парные отношения длин линеаментов восьми направлений. Исследования выполнены на примере Калининградского землетрясения (21.09.2004г., $M=4.8-5$) и трех землетрясений состоявшихся в Калифорнии в 2001–2004 гг. с магнитудами $M=4.2-6.5$. В результате проведенных исследований, установлено, что степень выраженности предвестниковой цикличности повышается с увеличением силы землетрясения. Подобная же закономерность характерна и для радиуса изменения напряженно-деформированного состояния земной коры в период подготовки землетрясения.

Ключевые слова: космический мониторинг, сейсмоопасные территории, геодинамика, линеаменты

Abstract. A predictive method for earthquakes is developed. The method enables foreshock changes in deflected mode of the Earth crust to be detected after observing the lineament system by automated analysis of ever-incoming space imagery. The work deals with long time series of space images covering several years, and coupled ratios of lineament lines in eight directions. The investigations are carried out by example of the Kaliningrad earthquake (09.21.2004, $M=4.8-5$), and three Californian ones (2001–2004, $M=4.2-6.5$). The intensity degree of the foreshock cycles rises with the increasing earthquake power. Similar mechanism is typical for changing radius of the Earth crust deflected mode during an earthquake preparation.

Keywords: satellite monitoring, seismic hazard areas, geodynamics, lineaments

Введение. Одним из перспективных методов мониторинга сейсмоопасных территорий является линеаментный анализ космических изображений [1–7]. На основании результатов обработки изображений для различных сейсмоспокойных районов в работах [1–7] установлено, что в этих районах развиты стабильные системы линеаментов, устойчивые в течение многих лет. Противоположная картина наблюдается при космическом мониторинге сейсмоактивных районов, для которых выявлена динамика систем линеаментов с периодичностью в первые недели–месяцы. Это соответствует закономерному изменению напряженно-деформированного состояния земной коры в периоды подготовки и завершения землетрясений.

Таким образом, динамика систем линеаментов в период подготовки землетрясения служит хорошим предвестником сейсмических событий. Высокая стабильность (консерватизм) систем линеаментов, выявляемых по космическим изображениям на древних

консолидированных платформах, и высокая их динамичность (мобильность) в подвижных поясах доказывает реальность их существования в природе и не связана с технологическими особенностями обработки космических изображений. Физическая природа линеаментов должна быть обусловлена очень высокомобильными процессами, быстро реагирующими на изменение полей напряжений в периоды подготовки, совершения и завершения землетрясений. Из известных природных процессов по своей мобильности для объяснения высокой динамичности систем линеаментов наиболее подходит флюидный режим планеты, который может практически мгновенно «проявить» ослабленные зоны земной коры (в том числе и зоны трещиноватости), обладающие максимальной проницаемостью [7]. При этом тепломассоперенос из земной коры к поверхности вызывает изменение спектральных характеристик почв, грунтов, растительности и степени прозрачности приземных слоев атмосферы. Интегральный эффект от данных факторов

приводит к изменениям текстуры космических изображений, распознаваемой при обработке. Это позволяет выявить «скрытые» полосчатолинейные образования, обусловленные изменением напряженно-деформированного состояния земной коры и флюидодинамическими процессами [7].

Методика обработки космических изображений. В настоящей работе для дешифрирования систем линеаментов использовался автоматизированный анализ космических изображений, в результате которого осуществлялась пороговая фильтрация линеаментов и определялись их статистические характеристики (плотность, суммарная длина линеаментов разных направлений, розы-диаграммы направленности и др.) [2, 3, 5, 8]. Первые же опыты применения автоматизированного линеаментного анализа космических изображений показали его высокую оперативность, информативность и достоверность как при изучении геологического строения земной коры, так и при поисках полезных ископаемых [1–8].

Методика выделения линеаментов на космических изображениях (особенно среднего и низкого разрешения) принципиально отличается от методик из выделения по геологогеофизическим материалам и по аэроснимкам. Это обусловлено в первую очередь свойствами, присущими только космическим изображениям — обзорностью, естественной генерализацией и рентгеноскопичностью. В силу данной специфики линеаменты, регистрируемые на космических изображениях, часто нельзя выделить никаким другим способом.

Для практической реализации метода автоматизированного линеаментного анализа предварительно обработанные (трансформированные) космические изображения в выбранной картографической проекции экспортятся в специально разработанный программный пакет. При помощи этого пакета проводится линеаментный анализ, который обычно начинается с выделения относительно коротких штрихов (штрихов-линеаментов) — прямых участков линии или границы полутоновой области. При этом используются методы полосовой пространственной фильтрации. Затем одинаково ориентированные штрихи-линеаменты объединяются в прямые

линии, пересекающие все анализируемое изображение, — так называемые, сквозные линеаменты. Далее производится построение схем дешифрирования линеаментов и их статистическая обработка — построение полей плотности и вытянутости — розы-диаграмм и их отличий от соседних и т.д. В наших исследованиях использован модуль LESSA для программного комплекса ERDAS IMAGINE [8]. С его помощью для каждого штриха определялось направление с точностью до $22,5^\circ$ по восьми направлениям — $0^\circ; 22,5^\circ; 45^\circ; 67,5^\circ; 90^\circ; 111,5^\circ; 135^\circ; 157,5^\circ$. Сквозные линеаменты изучены при разной степени их выраженности (проявленности) на космических изображениях при помощи изменения порогов. Степень выраженности сквозных линеаментов отражает какая часть линеамента в пределах изображения отмечена найденными штрихами. Чем выше задан порог выраженности штрихов, тем соответственно должна быть больше их плотность, и поэтому сквозных линеаментов выделяется меньшее число, т.к. большая часть линеаментов характеризуется относительно невысокой плотностью штрихов.

Регулярно поступающие материалы космической съемки поверхности Земли позволяют организовать мониторинг предвестниковой изменчивости напряженно-деформированного состояния земной коры в реальном масштабе времени, практически, для всех сейсмоопасных зон земного шара. С этой целью нами использован метод автоматизированного линеаментного анализа разновременных космических изображений, свободный от субъективных оценок, и позволяющий оценить сейсмическую обстановку в исследуемом регионе. Автоматизированное дешифрирование позволяет выявить незаметную визуально линейно-полосчатую текстуру космического изображения. При этом можно использовать космические изображения как среднего, так и низкого разрешения, к примеру изображения со спутников МЕТЕОР, LANDSAT, TERRA и др.

Метод мониторинга сейсмической активности на основе материалов космической съемки поверхности Земли отработан на примере сильных землетрясений, произошедших за последние 15 лет в Калифорнии (США),

Перу, Иране, Турции, на Кавказе, в Прибалтике (Калининградское землетрясение) [1–7]. Выполненные исследования в Калифорнии, Перу и на Кавказе показали, что в этих сейсмоопасных районах за 2–3 месяца до землетрясения начинает резко возрастать степень проявленности секущих (поперечных) линеаментов, достигающая максимума за 20 дней до события. Затем через 20 дней после землетрясения их количество начинает уменьшаться и через 2–3 месяца проявленность линеаментов возвращается к прежнему (фоновому) уровню [1–7].

Результаты исследований. В настоящей работе проанализированы землетрясения, произошедшие в районе г. Калининграда и в Калифорнии. Для Калининградского землетрясения выявлена предвестниковая цикличность динамики линеаментных систем, а также радиус деформаций земной коры при подготовке землетрясения. С этой целью изучена динамика изменения количества (в пикселях) и суммарной длины (в км) систем линеаментов восьми направлений (с осреднением $22,5^\circ$) при нулевом пороге в пределах трех тестовых участков (рис. 1). Первые два тестовые участка захватывают эпицентр и имеют размеры 125×125 км и 400×400 км соответственно. Третий участок расположен в 600 км к востоку от эпицентра и имеет размеры 125×125 км.

Ниже приводится линеаментный анализ космических изображений для калининградского землетрясения за пять лет. В качестве исходного материала использовались космические изображения, полученные со спутника TERRA (аппаратура MODIS, пространственное разрешение 250 м, площадь охвата 2230 км^2) в течение 2001–2006 гг., т.е. начиная за три года до землетрясения и заканчивая через два года после него. Все три тестовых участка выделены в пределах территории, охваченной одним космическим изображением. Это позволило изучить системы линеаментов на всех участках в одно и то же время при сходных погодных условиях. При этом в каждом году обрабатывались лишь сентябрьские изображения — в месяц, когда произошло землетрясение в 2004 г., что позволило сгладить возможное влияние на результаты линеаментного анализа сезонной изменчивости растительного покрова и увлажнения почв.

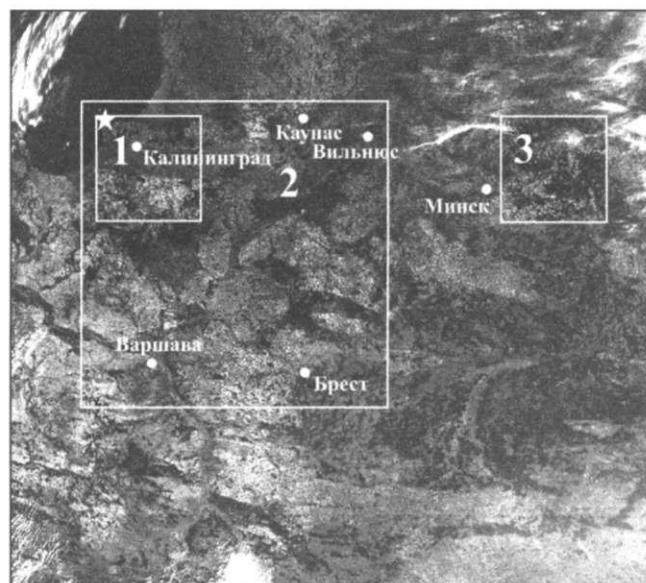


Рис. 1. Схема размещения тестовых участков при изучении динамики систем линеаментов при Калининградском землетрясении 21 сентября 2004 г. ($M=4.8-5.0$); 1, 2, 3 — номера тестовых участков

При анализе относительных изменений суммарной длины линеаментов по отношению друг к другу, у ряда пар линеаментных систем выявляется вполне определенная закономерная изменчивость, которая может трактоваться как предвестниковая цикличность. На участке 1 (рис. 2, а) закономерное изменение (цикличность) величины отношения суммарных длин линеаментов наблюдается у 10 пар систем линеаментов из 28 возможных их сочетаний. При этом для них величина отношения суммарных длин закономерно растет при приближении к моменту землетрясения, а после него — уменьшается. Наиболее четко данная закономерность проявлена у шести пар: $L67^\circ/L315^\circ$; $L67^\circ/L293^\circ$; $L45^\circ/L315^\circ$; $L45^\circ/L293^\circ$; $L0^\circ/L293^\circ$; $L338^\circ/L293^\circ$. Для них выявлен рост систем линеаментов субширотных, СВ и ВСВ направлений по отношению ко всем остальным в период подготовки землетрясений. Среди других направлений наблюдается относительный рост систем линеаментов субмеридиональных и ССЗ направлений по отношению к ЗСЗ. На участке 2 (рис. 2, б) изменение (цикличность) величины отношения суммарных длин линеаментов отличается у шести пар линеаментов, но они менее четко выражены по сравнению с участком 1. На участке 3 (рис. 2, в), удаленном от эпицентра

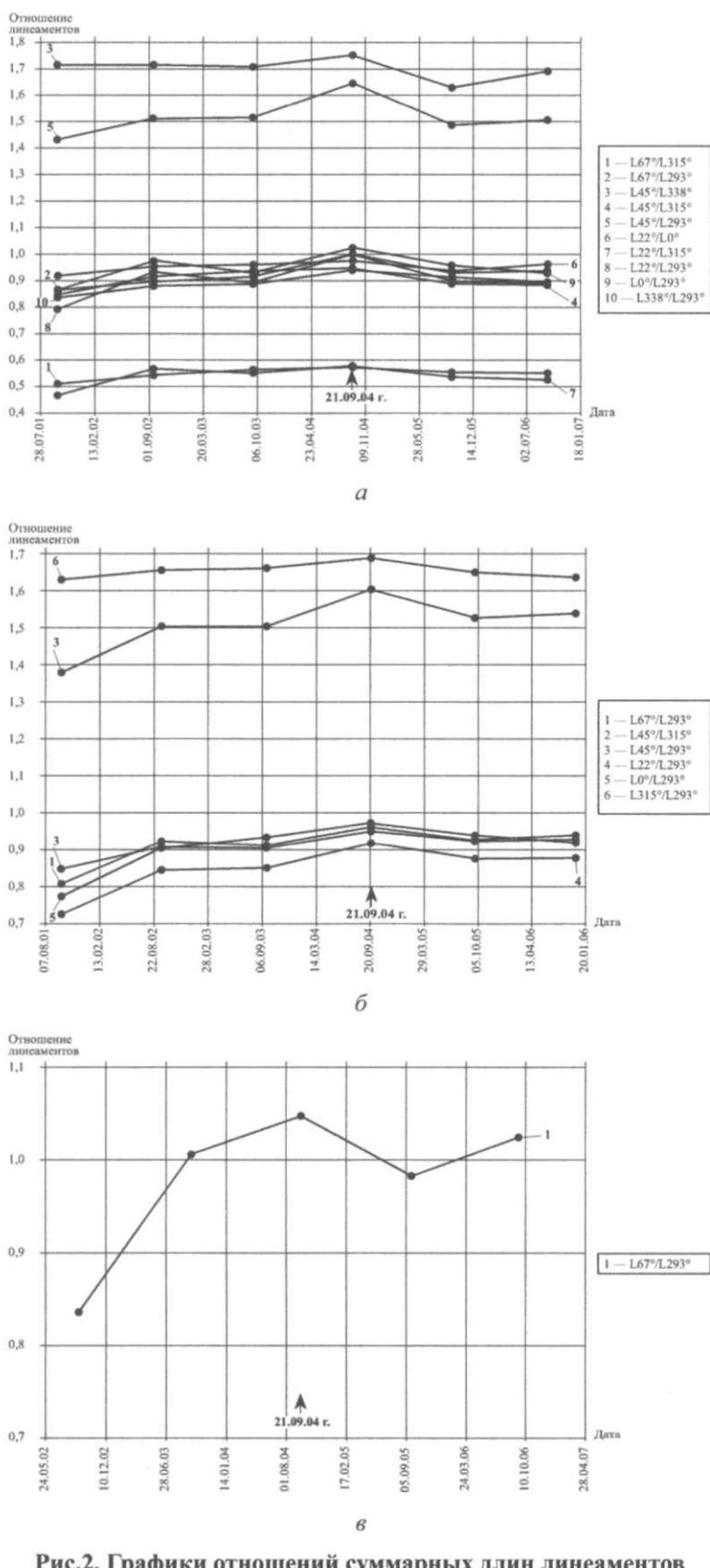


Рис.2. Графики отношений суммарных длин линеаментов разных направлений с выраженной предвестниковой цикличностью их изменений в 2001-2006 гг.: а — участок 1; б — участок 2; в — участок 3

калининградского землетрясения на 600 км (см. рис.1), циклические изменения величин отношений суммарных длин линеаментов разных направлений наблюдаются всего у одной пары ($L67^\circ/L293^\circ$).

Приведенные в настоящей работе данные для калининградского землетрясения (21 сентября 2004 г., магнитуда 4,8–5,0) показали, что на платформах подготовка землетрясений начинается за несколько лет до события, захватывая территорию радиусом до 500–600 км. В год землетрясения радиус активизации предвестниковой деформации земной коры значительно увеличивается. Предвестниковая цикличность выражена и в изменении величины отношения длин линеаментов разных направлений. При этом чем сильнее землетрясение, тем четче проявлена предвестниковая цикличность динамики систем линеаментов.

При изучении трех калифорнийских землетрясений, произошедших 9 сентября 2001 г. ($M=4,2$), 22 февраля 2003 г. ($M=5,2$) и 22 декабря 2003 г. ($M=6,5$), использованы серии разновременных изображений, полученных с борта спутника TERRA (аппаратура MODIS, пространственное разрешение 250 м) за несколько месяцев до и после землетрясений с интервалом от 1–2 недель до 1–1,5 месяцев в зависимости от наличия благоприятных (безоблачных) погодных условий съемки. При отработке методики обрабатывались изображения трех оптических зон — зеленой, красной и в ближнем ИК-диапазоне. Но для ускорения процесса обработки и уменьшения объема работ преимущество отдавалось космическим зональным изображениям красной зоны спектра ($\Delta\lambda=620\div670$ мкм), обладающим достоинствами, присущими как зеленой зоне, так и ближнему ИК-диапазону. Захват одного кадра съемочной аппаратуры MODIS — 2230 км. Обрабатывались фрагменты этого изображения, соответствовав-

шие участкам земной поверхности от 200×200 км до 300×300 км, что отвечало размерам изображения от 800×800 до 1200×1200 пикселей — наиболее оптимальным размерам при использовании программы LESSA.

Первое из исследованных землетрясений произошло 9 сентября 2001 г. в западной части Поперечных хребтов ($M=4,2$). Координаты эпицентра: $34,059^\circ$ с.ш., $118,387^\circ$ з.д. (рис. 3). На рис. 4, а приведены розы-диаграммы 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 розы-диаграммах преобладают два главных направления линеаментов: СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ. Первое направление соответствует общему простианию зоны разрыва Сан-Андреас, а второе является секущим (поперечным) по отношению к нему. При приближении момента землетрясения число проявленных (выраженных) на космических изображениях линеаментов постепенно увеличивается. При этом наиболее интенсивным ростом обладают секущие линеаменты, которые очень слабо проявлены за 6 мес до землетрясения. 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 наблюдается вдоль побережья Тихого океана, а узел пересечения всех систем разнонаправленных линеаментов соответствует области расположения эпицентра землетрясения.

Второе из исследованных землетрясений в Калифорнии произошло 22 февраля 2003 г. в восточной части Поперечных хребтов ($M=5,2$). Координаты эпицентра: $34,31^\circ$ с.ш., $116,848^\circ$ з.д. (см. рис. 3). На рис. 4, б приведены розы-диаграммы линеаментов, построенные при автоматизированной обработке космических изображений (при пороге 85), полученных за 2,5 мес и 20 дней до землетрясения и через 2 и 4 мес после него. Как и при землетрясении 9 сентября 2001 г., для землетрясения, состоявшегося в феврале 2003 г., четко выражена цикличность, заключающаяся в закономерном изменении систем линеаментов при подготовке землетрясения и после него. При этом наиболь-

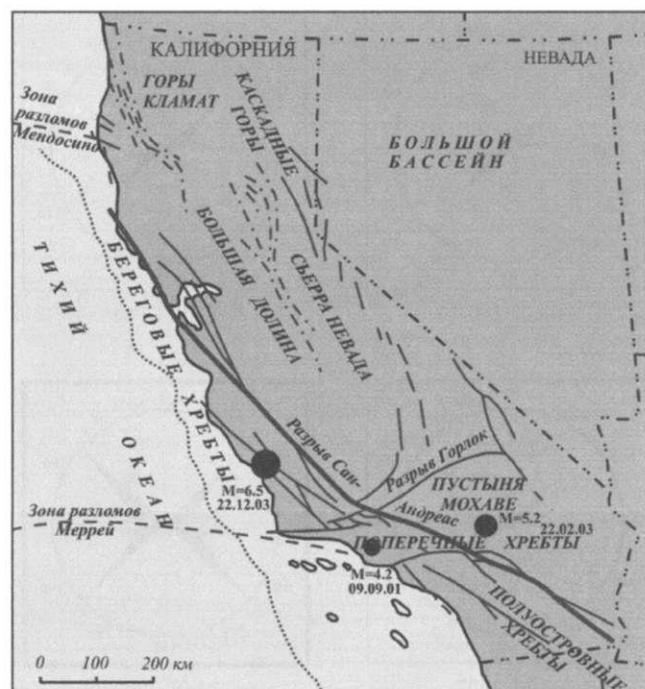


Рис. 3. Схема расположения эпицентров землетрясений

шим флюктуациям, как и в случае первого землетрясения, подвержены секущие линеаменты. За 2,5 мес до землетрясения они проявлены на космическом изображении очень слабо. За 20 дней их число резко возрастает и становится даже больше по сравнению с согласными (СЗ-ЮВ) линеаментами. Через 2 мес после землетрясения, состоявшегося 22 февраля 2003 г., число секущих линеаментов сократилось почти в 2 раза, хотя по-прежнему их число еще достаточно велико, но резко уменьшается через 4 мес после землетрясения. Максимальная плотность согласных линеаментов, выявленных в период подготовки землетрясения и через 2 мес после него характерна для прибрежных районов Тихого океана, отвечающих зоне разрыва Сан-Андреас. Область эпицентра находится в широкой зоне увеличенной плотности секущих линеаментов.

Третье, из изученных в Калифорнии землетрясений, произошло 22 декабря 2003 г. ($M=6,5$) вблизи г. Сан-Симеон, расположенного на побережье Тихого океана. Координаты эпицентра: $35,706^\circ$ с.ш., $121,102^\circ$ з.д. (см. рис. 3). На рис. 4, в приведены розы-диаграммы линеаментов, построенные при автоматизированной обработке космических изображений (при пороге 85), полученных за 2 мес, 1 мес и за 27

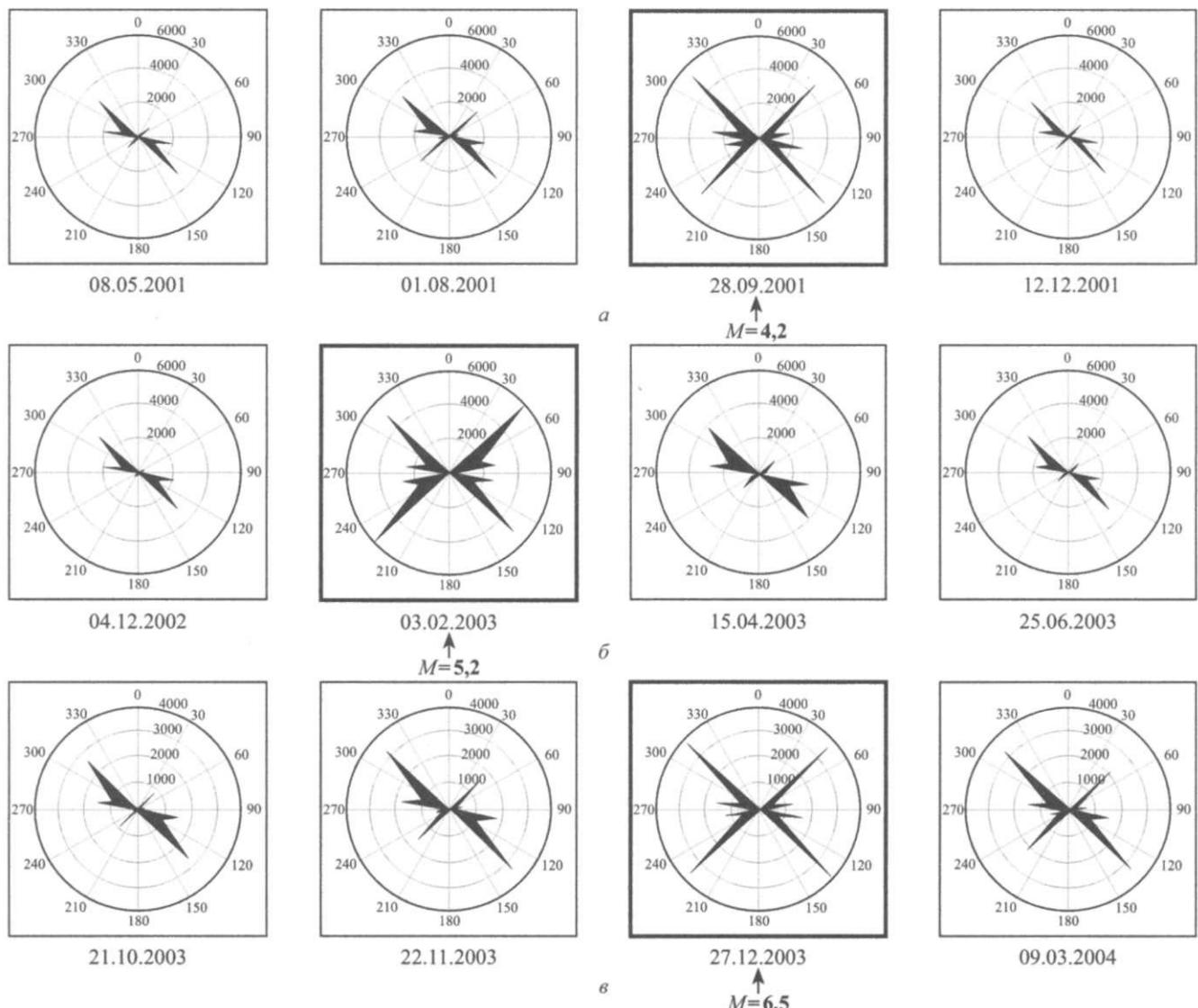


Рис. 4. Розы-диаграммы линеаментов для землетрясений в Калифорнии:

a — 09.09.2001 г. в западной части Поперечных хребтов ($M=4,2$);
b — 22.02.2003 г. в восточной части Поперечных хребтов ($M=5,2$); *c* — 22.12.2003 г. вблизи г. Сан-Симеон ($M=6,5$)

дней до землетрясения, а также через 5 дней и через 3 мес после землетрясения. Как и ранее изученных землетрясениях, в динамике линеаментов четко выражена цикличность, заключающаяся в изменении числа выявленных на космических изображениях линеаментов в период подготовки и после землетрясения. Число линеаментов начинает увеличиваться за 2 мес до землетрясения, достигая наибольшего значения за 27 дней до события и через 5 дней после него. Через 3 мес после землетрясения их значительно меньше. Более точная датировка изменений, как и в предыдущих двух землетрясениях, затруднена, потому что не удавалось получить изображений на промежу-

точные даты из-за сильной облачности в этот период времени.

Анализ результатов исследований.
Анализ динамики систем линеаментов на исследуемых участках показал следующее:

в Калининградском регионе преобладает диагональная система линеаментов, имеющих преимущественные направления ЮВ–СЗ (315°) и ЮЗ–СВ (45°). Промежуточное значение по распространенности занимает субширотная система линеаментов З–В (90°). Остальные системы линеаментов имеют явно подчиненное значение по отношению к этим трем системам;

закономерное (циклическое) относительное

изменение отношений суммарных длин систем линеаментов разных направлений являются предвестником землетрясений;

радиус предвестниковой деформационной активности земной коры за год до землетрясения не превышает 600 км, а в год землетрясения значительно больше.

Анализ космических изображений с меньшими временными интервалами съемки, проведенной в год землетрясения, показал несколько другую картину в отношении участка 3 (см. рис. 1). Результаты анализа, обобщенные на рис. 5, показали следующее. На участке 1 (см. рис. 5, а) предвестниковая цикличность выражена у 12 пар систем линеаментов, т.е. ~50% случаев из всех исследованных отношений суммарных длин линеаментов разных направлений. На участке 2 (см. рис. 5, б) 14 случаев с предвестниковой цикличностью. На участке 3 (см. рис. 5, в) цикличность проявлена в 25 случаях, что составляет 89% из всех изученных взаимоотношений систем линеаментов. Другими словами, если за год и более до землетрясения на участке 3 не было выявлено никаких предвестниковых изменений на расстоянии 600 км от эпицентра, то в год землетрясения земная кора здесь пришла в самое сильное возбуждение, по своей интенсивности превосходившее возбуждение систем линеаментов на участках 1, 2 (см. рис. 5, а, б). Этот достаточно неожиданный результат требует проведения дополнительных исследований других землетрясений, время от времени случающихся на платформах.

Исследование землетрясений разной силы, произошедших в Калифорнии, которые можно использовать в качестве эталонов, позволило установить наличие прямой зависимости интенсивности перестройки структурного плана линеаментов от времени, места и силы землетрясения, т.е.

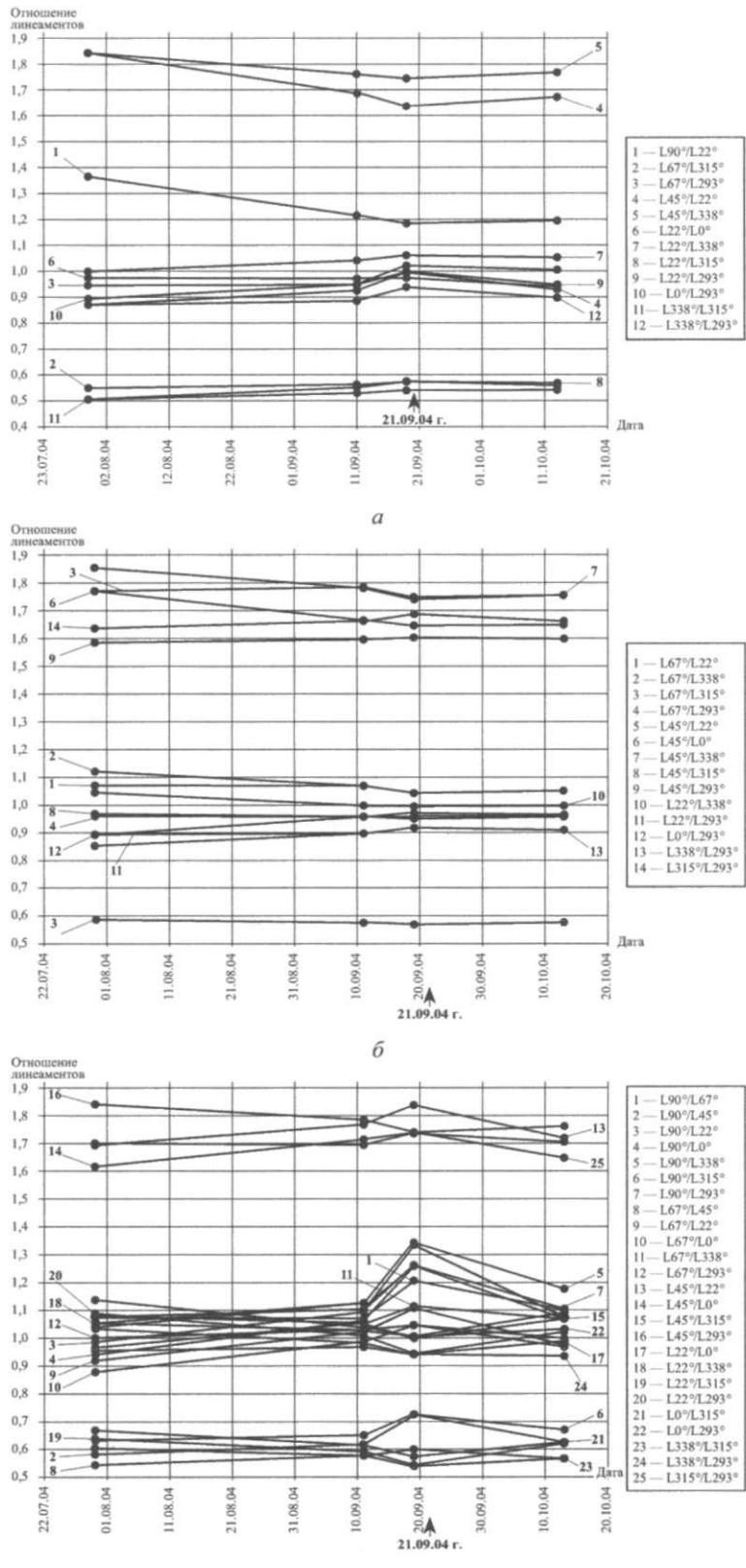


Рис. 5. Графики отношений суммарных длин линеаментов разных направлений с выраженной предвестниковой цикличностью их изменений в 2004 г.: а — участок 1; б — участок 2; в — участок 3

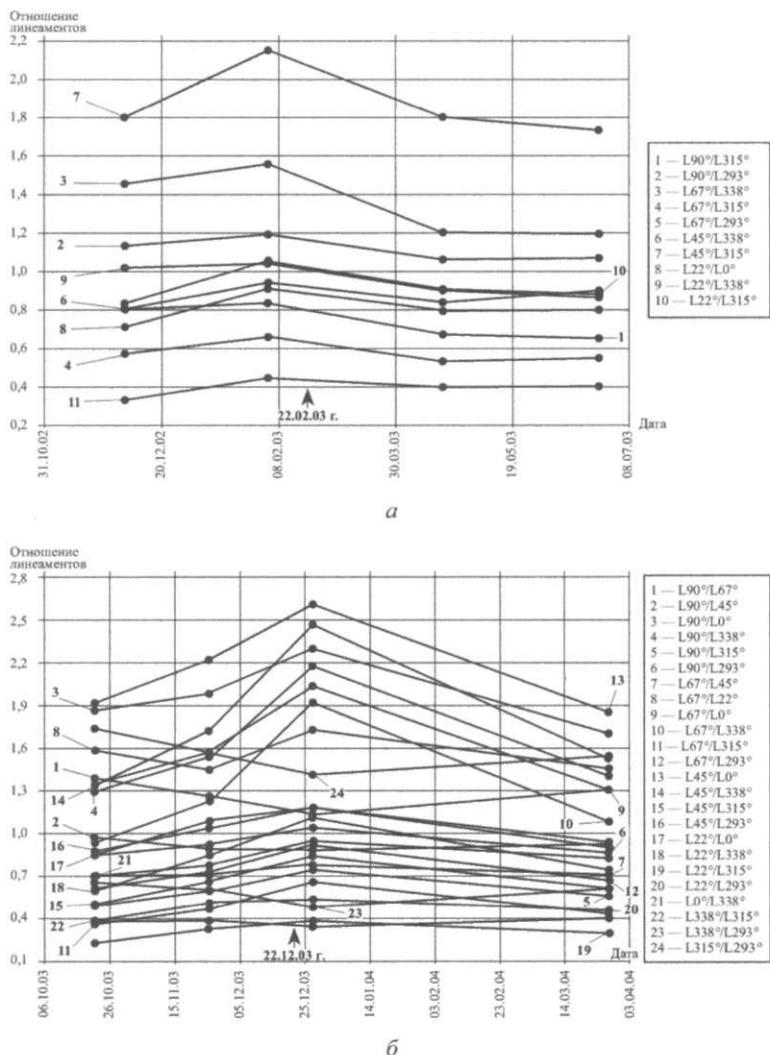


Рис. 6. Предвестниковая цикличность, выраженная в изменении величины отношений суммарных длин линеаментов разных направлений при землетрясениях в Калифорнии:

а — в восточной части Поперечных хребтов 22.02.2003 г. ($M=5,2$);
б — вблизи города Сан-Симеон 22.12.2003 г. ($M=6,5$)

осуществить прямой прогноз места, времени и силы землетрясения путем линеаментного анализа космических изображений.

Исследование изменений величины отношения длин линеаментов разных направлений показало, что подобная закономерность проявляется при землетрясении, произошедшем в Калифорнии 9 сентября 2001 г. ($M=4,2$), в одном случае ($L90^\circ/L293^\circ$) из 28, при землетрясении в Калифорнии, произошедшем 22 февраля 2003 г. ($M=5,2$), в 10-ти случаях из 28-ми, а при землетрясении в этом регионе 22 декабря 2003 г. ($M=6,5$), в 24-х случаях из 28-ми, что составляет 82% из изученных пар соотношений длин линеаментов разных направлений

(рис. 6). То есть чем сильнее землетрясение, тем для большего числа пар линеаментов разных направлений выражена предвестниковая цикличность в изменении величины отношения их длин.

Наличие подобных закономерностей выявлено нами и в других сейсмических районах мира, в частности, в Перу (землетрясения 27 января 2004 г. с $M=5,2$ и 15 августа 2007 г. с $M=8,0$) и Иране (землетрясение 26 декабря 2003 г. с $M=6,6$ около г. Бам).

Заключение. Выполненные исследования показали, что метод автоматизированной обработки временных рядов космических изображений с целью прогнозирования позволяет осуществить в активных сейсмических районах среднесрочный (за недели–месяцы), а на платформах долгосрочный (за несколько лет до события) прогноз землетрясения. Полученные данные подтверждают выводы, сделанные в работах [1–7], о целесообразности использования метода линеаментного анализа космических изображений для прогноза места, силы и времени землетрясения при организации планомерного мониторинга сейсмоопасных территорий.

При организации космического мониторинга следует иметь в виду, что конкретный характер динамики систем линеаментов во многом зависит от особенностей истории геологического строения исследуемого региона [1]. Общей закономерностью для всех изученных нами регионов мира (Кавказ, Алтай, Турция, Иран, Калифорния, Перу, Восточно-Европейская платформа) является цикличность динамики проявленности линеаментов в период подготовки землетрясения и после него. Однако в каждом конкретном случае динамика линеаментов выражена по-разному. В одних случаях цикличность охватывает почти все системы линеаментов разных направлений (например, Калифорния, Иран, Кавказ, Восточно-Европейская платформа). В других случаях цикличность проявлена в количественных изменениях лишь одной или нескольких систем (например, Перу,

Турция, Алтай), которые чаще всего соответствуют зонам глубинных разломов, определяющих особенности современного развития этих регионов. Поэтому для осуществления прогноза землетрясений с использованием изложенного космического метода необходимо предварительное изучение особенностей динамики систем линеаментов разных направлений в исследуемом регионе на примере уже случившихся там ранее сильных землетрясений, как это было сделано нами на примере Калифорнии. И лишь после того, как будут выявлены и учтены эти особенности, следует приступать к организации регионального (глобального) космического сейсмического мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондур В.Г., Кративин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. –М.: Научный мир, 2009. –692 с.
2. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений. / Докл. Академии наук. –2005. Т. 402. –№1. –С. 98–105.
3. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов. // Исследование Земли из Космоса. –2005. –№3. –С. 37–52.
4. Бондур В.Г., Зверев А.Т., Кузнецова Л.В. Космический мониторинг динамики систем линеаментов в период подготовки землетрясений в Калифорнии. // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2005. –№5. –С. 47–55.
5. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений по результатам линеаментного анализа космических изображений. // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2005. –№1. –С. 76–83.
6. Bondur V.G., Kuznetsova L.V. Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using The Method of Lineament Analysis. Proc. Of 31 Int. Symp. On Remote Sensing of Environment. St. Petersburg. 2005
7. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий. // Исследование Земли из космоса, 2007, –№1, –С. 47–56.
8. Zlatopolsky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA. Computers Geosciences. 1997. V.23. №1. p. 45-62

Поступила 16 марта 2010 г.