

Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий

В.Г. Бондур, А.Т. Зверев

*Научный центр аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»,
105064 Москва, Гороховский пер., 4
E-mail: vgbondur@online.ru*

В настоящей работе анализируется физическая природа систем линеаментов, регистрируемых при автоматизированной обработке космических изображений. Линеаменты, выделяемые на космических изображениях и не различимые визуально, обычно совпадают с диагональной системой планетарной трещиноватости. Автоматизированная компьютерная обработка космических изображений позволяет выделить не заметную визуально линейно-полосчатую структуру, обусловленную планетарной трещиноватостью и образующей две характерные взаимосвязанные системы линеаментов – ортогональную и диагональную.

В сейсмоопасных регионах была обнаружена изменчивость систем линеаментов, связанная с газовой-флюидным режимом планеты и способная выявлять ослабленные зоны земной коры, что может использоваться в качестве предвестника землетрясения.

Введение

Одним из перспективных методов мониторинга сейсмоопасных территорий является линеаментный анализ космических изображений. Изменчивость систем линеаментов служит хорошим предвестником сейсмических событий [1-4].

При обработке космических изображений, полученных в сейсмостойких районах, выявляются стабильные системы линеаментов, устойчивые в течение многих лет. Противоположная картина наблюдается при космическом мониторинге сейсмоактивных районов. Здесь выявлена изменчивость систем линеаментов, выделяемых на космических изображениях, с периодичностью от первых недели до месяцев [1-4]. Это отвечает закономерному изменению деформационно-напряженного состояния земной коры в периоды подготовки и завершения землетрясений.

Высокая стабильность (консерватизм) систем линеаментов на древних консолидированных платформах и их высокая динамичность (мобильность) в подвижных поясах доказывает реальность их существования в природе, которая не обусловлена технологическими особенностями проведения автоматизированного линеаментного анализа космических изображений [1-3]. Физические механизмы выраженности линеаментов на этих изображениях должны быть связаны с высоко мобильными процессами, быстро реагирующими на изменение поля напряжений в периоды подготовки, совершения и завершения землетрясений.

В настоящей работе показано, что из известных природных процессов по своей мобильности наиболее подходит газовой-флюидный режим планеты, который может практически мгновенно «проявить» ослабленные зоны земной коры (в том числе и зоны трещиноватости), обладающие максимальной проницаемостью. Тепломассоперенос из земной коры к поверхности вызывает изменение спектральных характеристик почв, грунтов, растительности и пропускной способности атмосферы. Интегральный эффект (суммирование) данных факторов приводит к изменениям текстуры космического изображения, распознаваемым при обработке. Регистрируемые при этом небольшие различия и выявляет «скрытые» полосчато-линейные текстуры космических изображений (линеаменты), обусловленные изменением деформационно-напряженного состояния земной коры и флюидно-газовым «дыханием» недр [5].

Проявление линеаментов на космических изображениях в период подготовки и протекания землетрясений

В процессе космического мониторинга сейсмоопасных территорий нами была обнаружена следующая особенность линеаментной тектоники – высокая динамичность систем линеаментов, периодичность изменения которых при подготовке землетрясений составляет недели-первые месяцы [1-3]. Подобная динамичность систем линеаментов подтверждена нами при изучении землетрясений последних лет в Калифорнии (США), Перу, Турции, Иране, Пакистане и других [1-4, 6].

На рис.1-4, в качестве примеров, приведены системы линеаментов и розы-диаграммы их направленности, построенные по космическим изображениям (аппаратура MODIS спутника TERRA) за несколько месяцев, недель и дней до сильных землетрясений и после них, произошедших вблизи г. Сан-Бернардино (Калифорния) 22 февраля 2003 г. (рис.1), в г.Сан-Симеон (Калифорния) 22 декабря 2003 г. (рис.2), в г.Бам (Иран) 26 декабря 2003 г. (рис.3) и в г.Паркфилд (Калифорния) 28 сентября 2004 г. (рис.4).

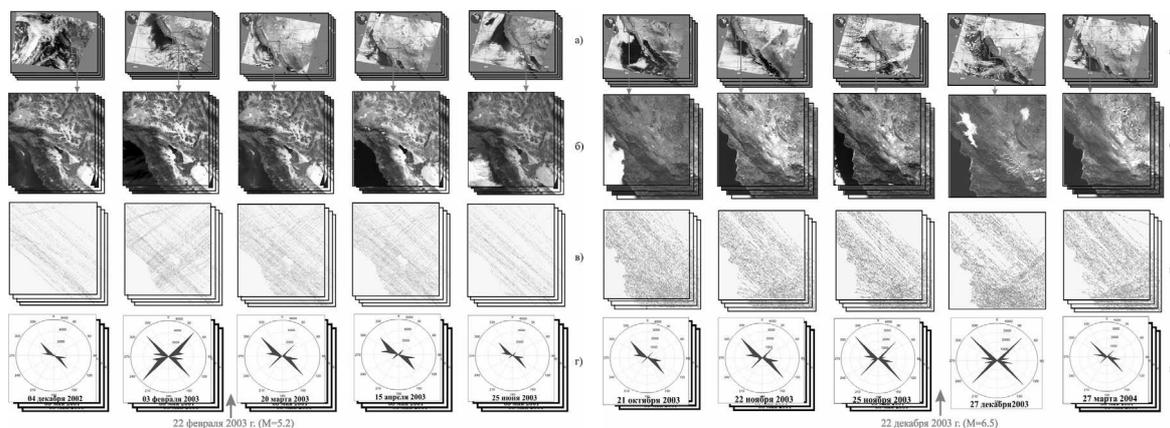


Рис. 1. Динамика систем линеаментов при землетрясении в районе г.Сан-Бернардино 22.02.2003г. (M=5.2).

а - исходные космические изображения; б – обработанные фрагменты; в – схемы линеаментов; г – розы-диаграммы направленности линеаментов

Рис. 2. Динамика систем линеаментов при землетрясении в районе г.Сан-Симеон 22.12.2003г. (M=6.5).

а - исходные космические изображения; б – обработанные фрагменты; в – схемы линеаментов; г – розы-диаграммы направленности линеаментов

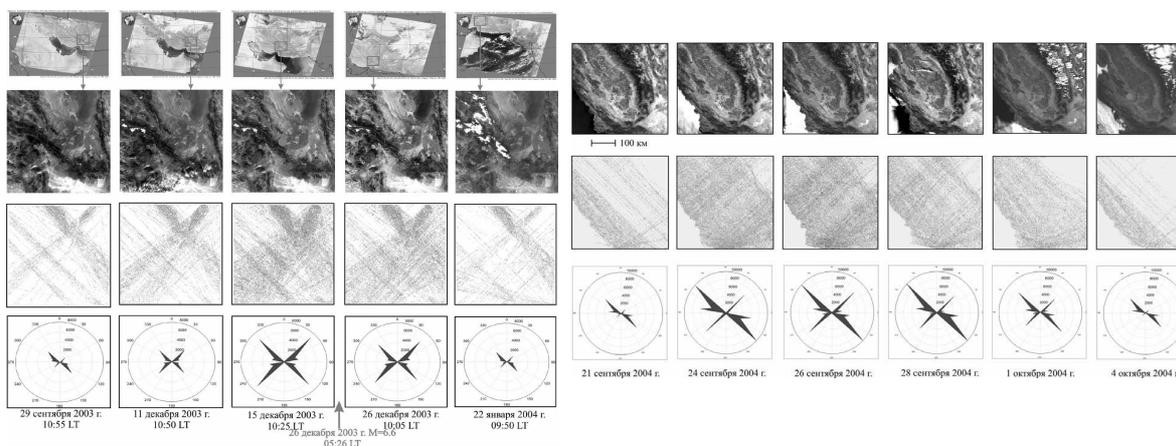


Рис. 3. Динамика систем линеаментов в период землетрясения в г.Бам (Иран) 26 декабря 2003 г. (M=6.6)

Рис. 4. Динамика систем линеаментов в период землетрясения в районе г.Паркфилд 28 сентября 2004 г. (M=6.0)

Анализ представленных рисунков показывает, что динамика систем линеаментов во всех рассматриваемых случаях одна и та же: за 2-3 месяца до землетрясения количество линеаментов начинает постепенно увеличиваться, достигая максимума в среднем за 20 дней до землетрясения, и уменьшается после землетрясения, снижаясь через 2-3 месяца до исходного (первоначального) количества. Наиболее сильные изменения претерпевают секущие по отношению к главным разломам системы трещин северо-восточного – юго-западного (СВ-ЮЗ) простирания. Они являются наиболее динамичными и могут использоваться в качестве предвестника землетрясений (рис.1-4).

Оперативный космический мониторинг, организованный нами в Калифорнии в период с июля по октябрь 2004 г., выявил еще более короткопериодические изменения систем линеаментов [4, 6]. На рис.4 приведены космические изображения, полученные со спутника TERRA (аппаратура MODIS) и результаты их автоматизированного линеаментного анализа для дней, предшествующих сильному землетрясению в районе г.Паркфилд, состоявшемуся 28 сентября 2004 г. (магнитуда 6.0), и на дни после него.

Наличие подобной закономерной периодичности в изменении степени выраженности линеаментов на космических изображениях, подтвержденной в различных сейсмических районах, позволяет утверждать, что анализ современной динамики линеаментных систем по космическим данным может являться важным для оценки сейсмической опасности.

Как видно из приведенных примеров, наиболее четко выявляется диагональная система линеаментов, но степень ее выраженности (количество сквозных линеаментов) достаточно сильно варьируется. Совершенно очевидно, что подобные высокочастотные (сверх короткопериодические) изменения линеаментов, выделенных по космическим изображениям, не могут быть зафиксированы в ландшафтах, геологических структурах и горных породах. Безусловно, данный вывод не относится также и к быстрым сейсмическим подвижкам, так как они строго локализованы во времени.

Проанализируем физическую природу линеаментов.

Физическая природа линеаментов

Системы линеаментов очень динамичны. Это доказывается как результатами автоматизированного линеаментного анализа космических изображений сейсмических областей [1-4, 6], так и геодезическими наблюдениями в пределах платформ и подвижных поясов [7, 8].

По данным работы [7] в разломных зонах земной коры, как на платформах, так и в подвижных поясах наблюдаются очень активные аномальные высокоамплитудные деформационные процессы со скоростями движений поверхности свыше 50 мм/год, то есть порядка $10^{-4} - 10^{-5}$ в год. Они короткопериодичны (от первых месяцев до первых лет), пространственно локализованы (от первых сотен метров до первых километров) и обладают пульсационной и/или знакопеременной направленностью. При этом деформации на платформах значительно интенсивнее деформаций сейсмогенерирующих разрывных нарушений. И лишь в период подготовки землетрясений в последних резко возрастает интенсивность деформаций.

Существующие модели глубинной геодинамики не способны объяснить наблюдающийся пространственно-временной спектр современных движений земной коры и особенно возникновение интенсивных движений в зонах платформенных разломов. Выполненные в работе [7] эмпирические обобщения позволили автору сделать вывод о том, что в качестве источников активности зон разломов должны выступать процессы, протекающие внутри самих разломных зон.

В целом физическую природу возникновения интенсивных деформаций в разломных зонах платформ и подвижных поясов (как в сейсмических, так и асейсмических их участках) можно представить следующим образом [7, 8]. Геологическая среда находится в обстановке внешних и внутренних (эндогенные и экзогенные), квазистатических (глобальные и региональные поля напряжений) и динамических (приливы, неравномерности вращения Земли, процессы подготовки землетрясений, сейсмические волны, техногенные процессы и т.д.) нагрузок. Кроме того, в разломных зонах, особенно осадочных бассейнов, постоянно присутствует и перераспределяется динамически основная и химически агрессивная флюидная система.

Взаимодействие и совместное влияние всех этих факторов реализуется, в первую очередь, в условиях повышенной концентрации дефектов среды, то есть в зонах разломов с неустойчивыми механическими характеристиками, посредством кратковременных флуктуаций жесткостных характеристик горных пород в локальных объемах. Это приводит к возникновению интенсивных деформаций в разломных зонах, а, следовательно, выражению их в ландшафтных (микрорландшафтных) признаках, проявляющихся на космических изображениях в виде линеаментов.

На основе аналитических и численных моделей, связывающих характеристики интенсивных деформаций разломных зон, наблюдаемых на поверхности Земли, с параметрами источников на глубине, можно оценить распределение аномальных напряжений и деформаций по глубине и определить местоположение источников аномалий (областей повышенной трещиноватости) внутри разломных зон.

С использованием технологий решения обратных задач современной геодинамики разломов можно определить диапазоны глубин, размеры, форму и степень разупрочения областей формирования интенсивных деформаций. Совместный анализ этих результатов с геодинамической и геолого-геофизической обстановкой ряда регионов, проведенный в работах [7, 8], показал, что источники этих деформаций залегают в диапазоне глубин от первых десятков метров до первых километров, имеют (в сечении) форму длинных, субвертикально ориентированных прямоугольников, приуроченных к зонам залегания флюидонасыщенных, трещиноватых пород. Ранее близкие выводы были сделаны в работе [5], в которой показано, что линеаменты, трассирующие зоны повышенной нарушенности, деформированности или раздробленности земной коры, могут отражать подводящие каналы различных флюидов и растворов.

В связи с этим облик линеаментов, выявляемых на космических изображениях, является генерализованным отражением на земной поверхности как деформаций, так и флюидного режима приповерхностных частей земной коры.

Физические механизмы проявления линеаментов на космических изображениях

Природу линеаментов, проявляющихся на космических изображениях, обычно связывают с отражением на земной поверхности разноглубинных видимых и скрытых разломов земной коры [9]. В наиболее простом варианте, когда разрывное нарушение достигает земной поверхности, линия разлома визуальнo дешифрируется на космическом изображении в виде явно выраженного линеамента, интенсивности и четкость проявления которого связана с контрастностью движений по линии разлома. Интенсивность линеаментного проявления разлома зависит также от угла наклона поверхности разлома: единичные линеаменты или узкие линеаментные зоны при вертикальном положении разлома, а положении, при котором в приразломной части (вблизи поверхности сместителя) возникает целая серия (зона) сопутствующих разрывов (трещин).

Если разлом не достигает поверхности, затухая на той или иной глубине, его поверхностное выражение представляет собой некую зону рассеянных (трещинных) деформаций, которые визуальнo выделяются на космических изображениях в виде узких или достаточно широких линеаментов в зависимости от мощности перекрывающего его осадочного чехла (чем мощность больше, тем линеамент шире) и от интенсивности движений по скрытому разлому (чем больше интенсивность, тем шире зона трещин и линеамент).

Линеаменты, визуальнo регистрируемые на космических изображениях, могут отражать через вторичные индикаторы не только формы дислокационного происхождения (разрывы, трещины, складки), но и некоторые линии (зоны, полосы) повышенного или пониженного напряженного состояния коры [9].

Линеаменты и линеаментные зоны являются зонами (каналами) повышенной проницаемости земной коры. Они служат проводящими путями растворов и газов, как правило, более высокотемпературными по сравнению с поверхностью Земли или морского дна. Данное обстоятельство нередко приводит к уникальным современным явлениям и процессам: протаивание протяженных узких зон, возникновение зон дробле-

ния льда, к которым, например, на Байкале обычно приурочены нерпичьи лунки пропаривания, апвеллинг, линейность облачного покрова и др. [5].

Степень видимости систем линеаментов на космических изображениях во многом зависит от напряженно-деформационного состояния земной коры. Как нами [1-4, 6], так и другими исследователями, например [5, 9], установлено, что ориентировка линеаментов в пространстве и их геодинамическая реализация достаточно тесно взаимосвязаны: диагональные линеаменты образуют преимущественно зоны скалывания, ортогональные – зоны сжатия (широтные) и растяжения (меридиональные). Поэтому особенности физической природы линеаментов, выделяемых на космических изображениях, связаны прежде всего именно с этими особенностями поля напряжений, обуславливающих характер деформаций и проницаемости земной коры.

Таким образом, степень видимости (различимости) линеаментов на космических изображениях и физические механизмы, ответственные за их проявления, зависят, прежде всего, от характера напряженно-деформированного состояния земной коры и связанной с ним проницаемостью земной коры, которые обуславливают «физиономичность» линеаментов, то есть выраженность в ландшафтах и физико-химических свойствах поверхности Земли, за счет изменения влажности, температуры, степени окисленности, выщелоченности, выветриваемости и других свойств почво-грунтов и горных пород и растительного покрова.

Напряжения, деформации и проницаемость земной коры тесно связаны между собой и зависят от характера поля напряжений, которое в глобальной линеаментной тектонике обусловлено ротационными силами.

Что же прежде всего влияет на степень выраженности линеаментов на космических изображениях – деформации или проницаемость земной коры, то есть ее флюидно-газовый режим?

Как показали геодезические обобщения, выполненные для платформенных структур и подвижных поясов по регулярной сети наблюдений один раз в неделю-месяц, деформации в разломных зонах короткопериодичны и активизируются с тем же или противоположным знаком движения земной поверхности в течение первых месяцев и первых лет [7, 8]. На этом основании делается вывод о том, что причину деформаций следует искать внутри разломных зон, а не вне их, так как никакой из известных тектонических процессов не может обеспечить столь малую периодичность деформационных процессов.

Физическая природа данного явления должна быть связана с очень высоко мобильным механизмом, практически мгновенно (применительно к анализируемому случаю) реагирующим на изменение поля напряжений в периоды подготовки и свершения землетрясения и после него. Из всех вышеназванных причин, способствующих развитию деформаций в зонах разломов, по своей мобильности подходит лишь флюидно-газовый режим, который может практически мгновенно «проявить» ослабленные зоны земной коры (в том числе и зоны трещин), обладающие максимальной проницаемостью.

Основной индикатор движения жидких и газовых растворов у поверхности – изменение газового состава, влажности и температурного режима почво-грунтов, в какой-то мере растительности (листьев и травы), а также приземного слоя атмосферы. Чем выше проницаемость (трещиноватость), тем больше тепло-массоперенос из земной коры к поверхности, тем больше нарушается гидродинамический режим подземных, грунтовых и приповерхностных капиллярных вод и почвенных растворов, а следовательно, тем больше насыщаются почвы и приземные слои атмосферы парами воды, инертными и другими газами (гелием, водородом, оксидами и диоксидами азота и серы и т.д.). Это вызывает изменение спектральных характеристики почв, грунтов, растительности и пропускание атмосферы для электромагнитных волн видимого диапазона спектра.

Интегральный эффект от перечисленных факторов приводит к изменению текстуры космического изображения. Эти изменения могут быть очень незначительными и незаметными для человеческого глаза, но легко распознаются современными методами обработки, которые выделяют небольшие различия и позволяют выявить «скрытую» полосчато-линейную текстуру космических изображений, обусловленную изменением поля напряжения и флюидно-газовым «дыханием» недр Земли.

Вполне очевидно, что даже подобный «высокоскоростной» процесс не может объяснить выявленные при космическом сейсмическом мониторинге сверхскоростные вариации космолинеаментов продолжительностью в часы и первые дни, так как региональное и тем более глобальное поле напряжений не могут изменяться с подобной скоростью.

Как было сказано выше продолжительность короткопериодических изменений деформационно-напряженного состояния геологической среды и обусловленной им проницаемости земной коры составляет от первых месяцев до первых лет. В сейсмических областях в период подготовки сильных землетрясений, как было установлено нами в целом ряде регионов, начало перестройки поля напряжений и связанных с ним деформаций и проницаемости начинается за 2-3 месяца до него, достигая максимума за 20 дней до события. Это максимально повышенное напряженно-деформационное состояние сохраняется приблизительно в течение 40 дней (20 дней до землетрясения и 20 после), а объем возбуждения – в течение 4-6 месяцев (2-3 месяца до землетрясения и 2-3 месяца после).

Предложенный механизм формирования линеаментов на космических изображениях позволяет вполне просто и объективно объяснить наличие высокочастотных (часы, дни) флуктуаций систем этих линеаментов, обнаруженных в результате осуществления космического сейсмического мониторинга в Калифорнии (рис.4). Основной причиной высокочастотных флуктуаций могут являться погодные условия – сила ветра, атмосферные осадки (в момент или накануне космической съемки), интенсивность солнечной радиации, влажность почвы и воздуха.

Сильный ветер, высокая температура воздуха и почвы, дождь, высокая влажность почвы и воздуха могут нивелировать влияние «дыхания» недр и делают аномалии, возникающие под действием изменения напряженно-деформированного состояния и проницаемости геологической среды, менее существенными по сравнению с воздействием погодных факторов. Поэтому обнаруживаемые аномалии становятся менее различимыми на космических изображениях, хотя они и обладают большой обзорностью, высокой степенью генерализации и рентгеноскопичностью.

Эти обстоятельства накладывают определенные ограничения на осуществление космического сейсмического мониторинга. Наиболее достоверные результаты по оперативному прогнозированию землетрясений достигаются в условиях отсутствия сильного ветра и дождливой погоды.

Данный вывод принципиально важен для организации и проведения автоматизированного космического сейсмического мониторинга и поэтому требует проведения комплекса специальных исследований по изучению корреляции степени выраженности систем линеаментов, выделяемых на космических изображениях, от погодных условий.

Заключение

Выполненные исследования продемонстрировали необходимость строгого разграничения понятий собственно «линеаменты» и «космолинеаменты», выделяемые по космическим изображениям. Собственно линеаменты отражают планетарную сеть глубинных разломов и трещиноватости. Они выделяются по геологическим, геофизическим, геохимическим, топографическим и другим мелкомасштабным картам.

Космолинеаменты выявляются по интегральным геолого-географическим признакам, благодаря обзорности, естественной генерализации и рентгеноскопичности космических данных. Автоматизированная компьютерная обработка космических изображений позволяет выявить не заметную визуально линейно-полосчатую текстуру, обусловленную планетарной трещиноватостью и образующей две характерные взаимосвязанные системы линеаментов – ортогональную и диагональную.

Физическая природа линеаментов, выявляемых по космическим изображениям, связана с газово-флюидным режимом в ослабленных зонах полей напряжений земной коры, характеризующихся высокой проницаемостью. Жидкие растворы и газы (глубинные, близповерхностные, капиллярные и почвенные) изменяют температуру, влажность и газовый состав воды, почвы и приземного слоя атмосферы, что вызывает изменения их спектральных характеристик и тем самым находит свое отражение на космическом изо-

бражении в виде появления на нем линейно-полосчатой текстуре, обычно не различимой визуально, но распознаваемой компьютером.

Неблагоприятные погодные условия (сильный ветер, атмосферные осадки, высокая солнечная радиация) уменьшают степень выраженности космолинеаментов и затрудняют решение задач оперативного космического мониторинга сейсмоопасных территорий. Поэтому для их решения необходимо применять специальные методы или использовать дополнительные типы предвестников землетрясений, регистрируемых из космоса и классическими геофизическими методами.

Литература

1. *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.
2. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 1. С. 76-83.
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 // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 5. С. 47-55.
5. *Кац Я.Г., Полтаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеаментной тектоники // М.: Недра, 1986. 144 с.
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. *Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон // Физика Земли, 2004. № 10. С. 95-111.
8. *Кузьмин Ю.О., Жуков В.С.* Современная геодинамика и вариации физически свойств горных пород // М.: Мос. Гос. Горный Университет, 2004. 262 с.
9. Космическая информация в геологии. Отв. Редакторы: В.Г. Трифонов, В.И. Макаров, Ю.Г. Сафонов, П.В. Флоренский // М.: Наука. 1983. 370 с.