

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

УДК 550.34

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРИ МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2007 г. В. Г. Бондур, А. Т. Зверев

Научный центр аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос", Москва

E-mail: vgbondur@online.ru

Поступила в редакцию 10.09.2006 г.

Проанализированы закономерности изменения систем линеаментов, регистрируемых при обработке космических изображений, полученных в процессе мониторинга сейсмичных и асейсмичных районов. Выявлены относительная устойчивость систем линеаментов в асейсмичных районах вне зависимости от вида космической съемки и их высокая динамичность в сейсмичных районах в период подготовки к землетрясениям. Показано, что характерная для систем линеаментов ортогональная и диагональная ориентировки связаны с планетарной трещиноватостью, а высокая динамичность систем линеаментов в сейсмических районах – с динамикой напряженно-деформированного состояния и флюидного режима земной коры в период подготовки землетрясений. Цикличность проявления систем линеаментов на космических изображениях сейсмоопасных районов является предвестником землетрясений и может быть обусловлена флюидогеодинамическим механизмом.

ВВЕДЕНИЕ

Линеаментный анализ разновременных космических изображений, полученных в эпохи землетрясений, позволил выявить закономерную динамику (цикличность) развития систем линеаментов в периоды подготовки и завершения землетрясений. Цикличность динамики линеаментов может служить надежным предвестником значительных сейсмических событий [1–5]. Это подтверждается сопоставлением результатов автоматизированного линеаментного анализа космических изображений асейсмичных и сейсмичных районов.

В работах [1–5] установлено, что при обработке космических изображений для сейсмоспокойных районов проявляются стабильные системы линеаментов, устойчивые в течение многих лет.

Противоположная картина наблюдается при космическом мониторинге сейсмоактивных районов, для которых характерна изменчивость систем линеаментов в эпохи землетрясений с периодичностью в первые недели-месяцы [1–5]. Это соответствует закономерному изменению напряженно-деформированного состояния земной коры в периоды подготовки и завершения землетрясений. В этом случае продолжительность циклов возбуждения систем линеаментов составляет в среднем 4–6 мес. и достигает максимума, как правило, за 20 дней до землетрясения. Данный цикл нередко осложнен короткопериодной составляющей продолжительностью в несколько дней, которая может быть связана как с наличием высокочастотной составляющей у механизмов формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях, так

и с влиянием неблагоприятных погодных условий, маскирующих проявление линеаментов на местности.

В настоящей работе показано, что одними из главных механизмов развития линеаментов являются ротационный, тектонический и флюидогеодинамический. Цикличность обусловлена динамикой флюидного режима земной коры в период подготовки землетрясений. 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 аномалиям на космических изображениях, выделяемым при обработке. Регистрируемые при этом небольшие различия и выявляют "скрытые" полосчато-линейные образования, обусловленные изменением напряженно-деформированного состояния земной коры и флюидогеодинамическими процессами.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ

За более чем 100-летний период своего существования понятие линеаментов (от лат. *lineamentus* – линия, контур) менялось. Вначале под линеаментами понимались все линейные образования, выраженные в ландшафте и структуре земной коры: границы геологических образований, прямолинейные участки береговых линий, ограничения горных массивов и прочие спрямленные элементы ландшафтов и геологических структур [6].

В дальнейшем была показана принципиально важная роль линеаментов и их систем в тектоническом развитии земной коры. В работе [7] было выявлено шесть основных направлений линеаментов Западной Европы – 20° , 45° , 340° , 290° , 315° и 70° .

После этого многие геологи начали искать и повсеместно находить в разных регионах мира новые направления линейных тектонических дислокаций (линейных складок, разрывных нарушений, трещиноватости, флексур и др.). Правда, следует отметить, что эти преобладающие направления у разных исследователей не всегда совпадали, что, по-видимому, было обусловлено геологической спецификой исследованных регионов, разнотипностью и разномасштабностью использованных ими карт (геологических, топографических, геоморфологических, геофизических и др.) [7–10].

Обычно проблема линеаментной тектоники рассматривается в рамках решения задач планетарной трещиноватости, которая по праву считается одной из основных причин не только закономерной делимости литосферы, но и направленности развития ее структурных особенностей, а также основных форм ландшафта планеты [9, 10].

Ориентировка планетарных систем трещин (включая их выражение в виде глубинных и других типов разрывных нарушений) относительно оси вращения Земли обусловлена напряжениями, возникающими в литосфере при изменении фигуры Земли (степени ее эллипсоидности), при изменении скорости ее вращения, а также ротационными напряжениями, обусловливающими возникновение характерной трещиноватости при остывании плутонов, при диагенезе и литификации осадочных пород [8].

То обстоятельство, что планетарная трещиноватость сохраняет свою ориентировку, с небольшими вариациями, в породах самого разного возраста, говорит о большой устойчивости и длительном существовании данной ориентировки, контролирующей местоположение и ориентировку тектонических процессов и структур, как пликативных, так и дисъюнктивных. Это вполне объяснимо, т.к. разрядка внутренних напряжений, накопившихся в теле Земли, легче происходит по имеющимся в ней ослабленным (благодаря планетарной трещиноватости) зонам по сравнению с более монолитными ее участками [9, 10].

Планетарная трещиноватость изначально определила дискретные свойства геофизической среды и блоков – иерархическую модель литосферы. Блоки горных пород в этой системе отделяются друг от друга прослойками более измельченных пород, но которые также построены из блоков разных размеров меньшего масштаба [11].

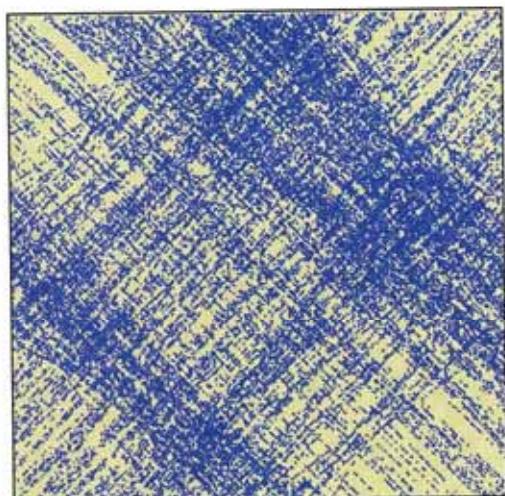
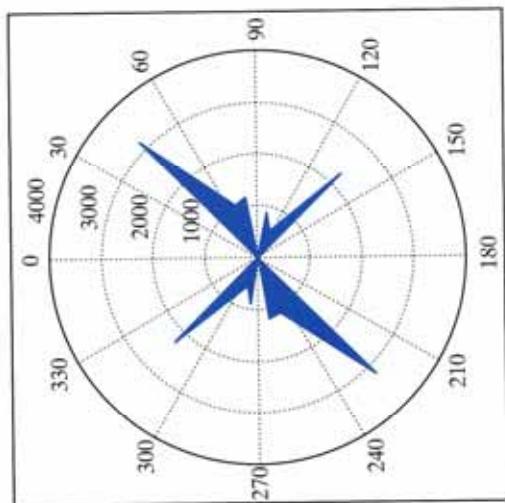
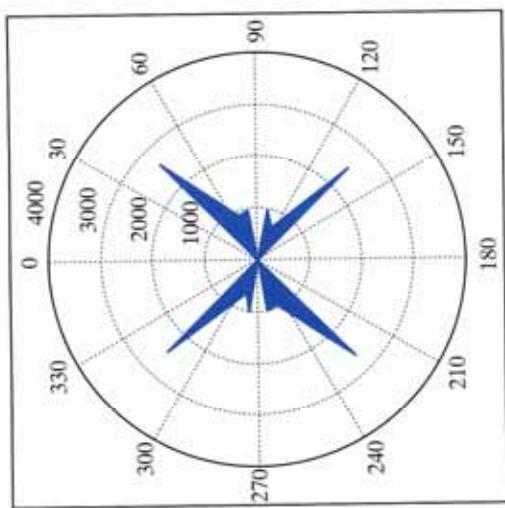
В предисловии к сборнику научных трудов [12] М.А. Садовский подчеркивал, что дискретные свойства среды проявляются и в сравнительно медленно протекающих процессах деформирования горных масс, что находит отражение в дискретных (в пространстве и во времени) характеристиках современных движений земной коры по разломам.

С появлением материалов космических съемок поверхности Земли термин линеамент получил новое значение и стал широко применяться в геологии и геодинамике. На космических изображениях достаточно отчетливо проявляются широкие (километры и первые десятки километров) и протяженные (многие сотни, нередко несколько тысяч километров) зоны локализации трещин, разрывов, даек, складок, поднятий и опусканий, которые пересекают как платформы, так и складчатые пояса.

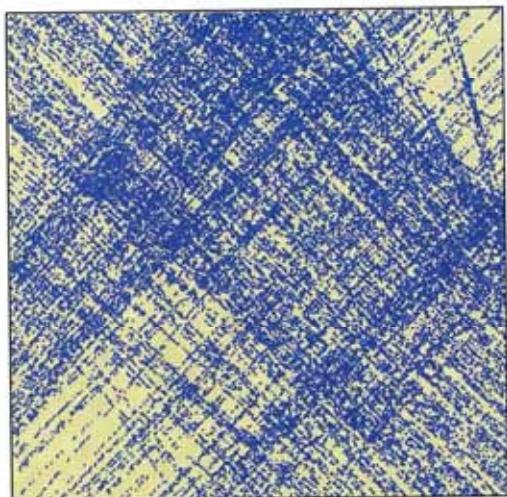
Многочисленные исследования показали, что отдельные линеаменты с увеличением обзорности, т.е. с уменьшением масштаба космических изображений, концентрируются в системы – зоны и пояса регионального, трансрегионального и планетарного (глобального) значения [10]. Они образуют две планетарные системы – ортогональную (линеаменты ориентированы по меридиану и параллели), а также диагональную (линеаменты вытянуты в направлениях СЗ–ЮВ и СВ–ЮЗ). При этом выявлено, что на платформах преобладает диагональная система, а в подвижных поясах – линеаменты, согласующиеся с общим простиранием тектонических структур [13]. В последние годы по космическим изображениям начали выделять огромное количество сравнительно небольших линеаментов (размеры $\sim 0.7 \dots 1$ км), которые образуют сообщества.

Планетарные линеаментные системы выделяются в основном по комплексным ландшафтным признакам (геологическим, геоморфологическим, почвенным, геоботаническим, гидрологическим и др.). Для них, как правило, характерно не одиночное, а групповое распространение с образованием отдельных зон из субпараллельных сближенных линеаментов, пересечение которых дает “решетчатый” рисунок.

Некоторые исследователи, например [10], отмечают, что линеаменты и их сообщества могут служить весьма объективной характеристикой дискретности земной коры. При этом наиболее информативны параметры линеаментного рисунка и линеаментного поля. Первый дает представление об основных направлениях дискретности, а второй – характеризует степень дискретности глубинных уровней земной коры.



a



b

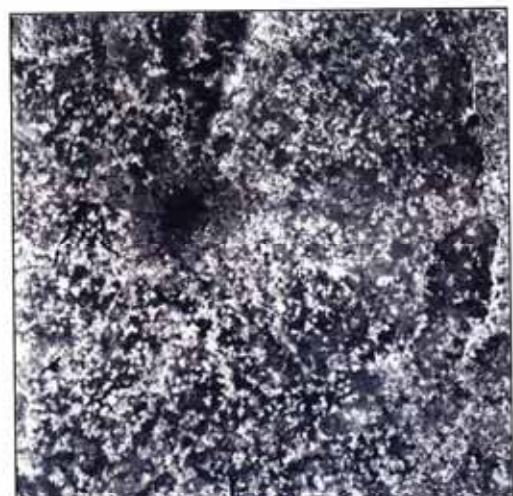
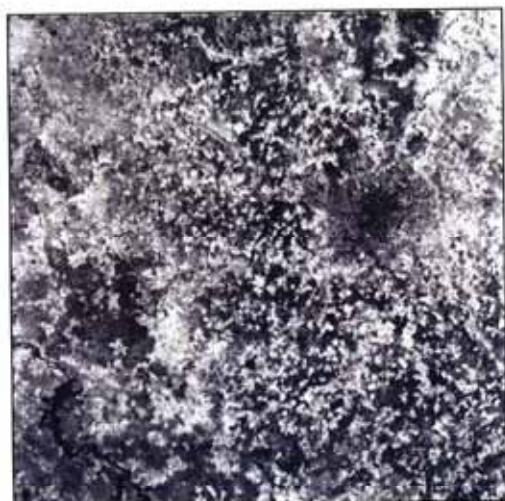
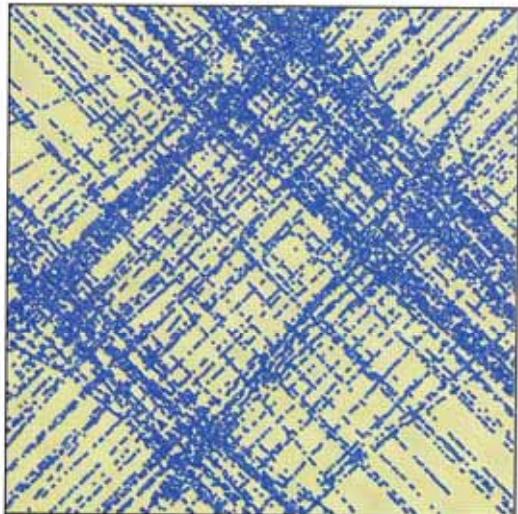
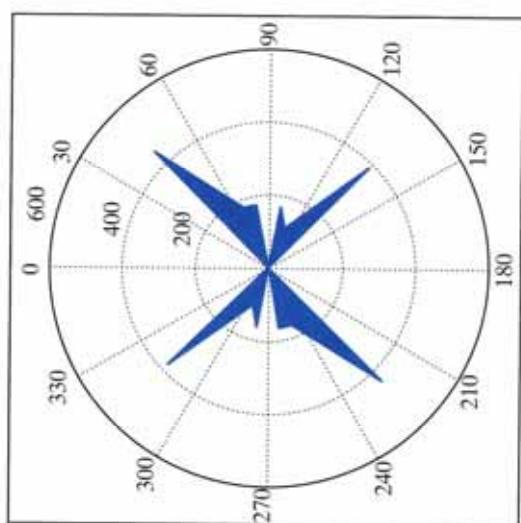
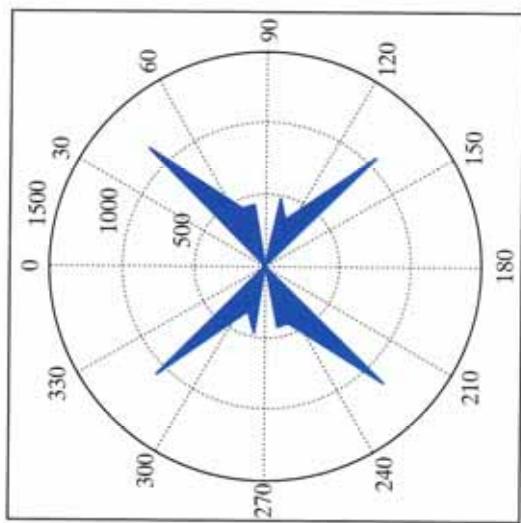
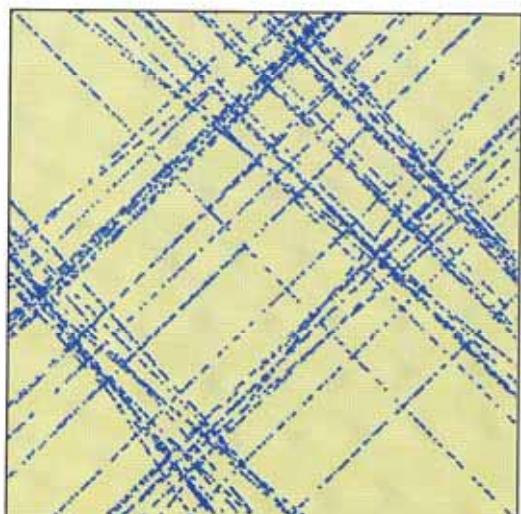


Рис. 1. Фрагменты космических изображений, полученных с ИСЗ "Ресурс-Ф1" в августе 1992 г. (размеры анализируемых участков земной поверхности $160 \times 160 \text{ км}^2$), а также схемы линсаментов и розы-диаграммы, построенные по результатам автоматизированной обработки при пороге 90: *a* – северная часть Московского региона; *b* – южная часть Московского региона.



a



б

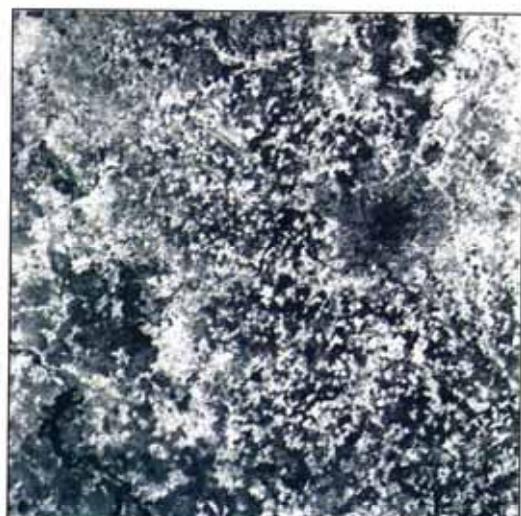
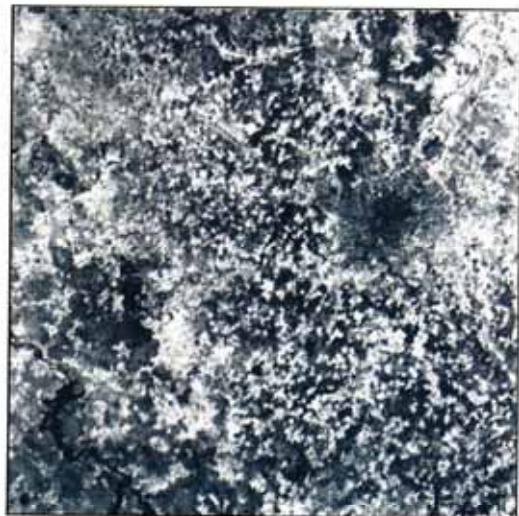
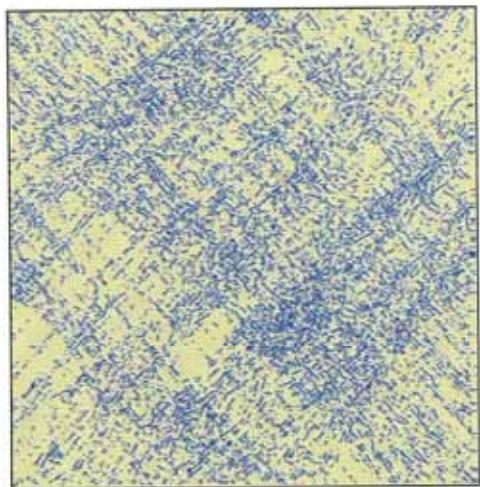
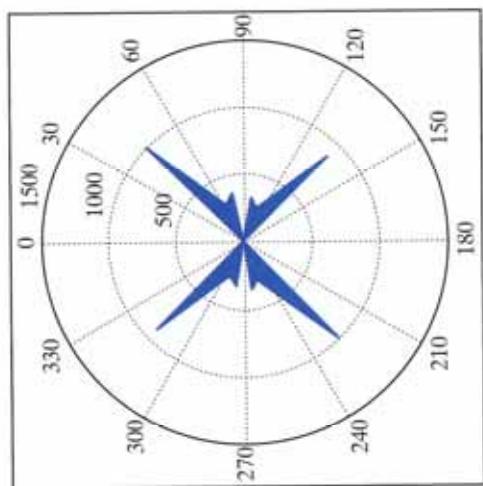
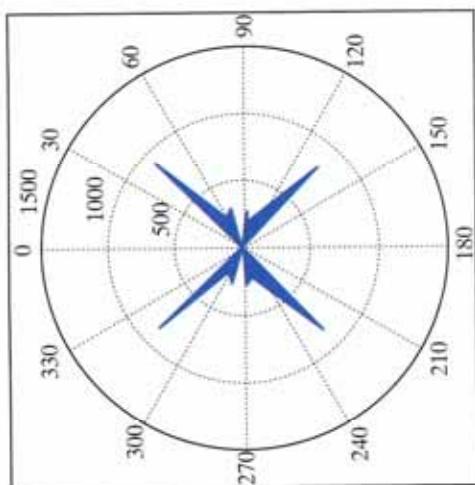
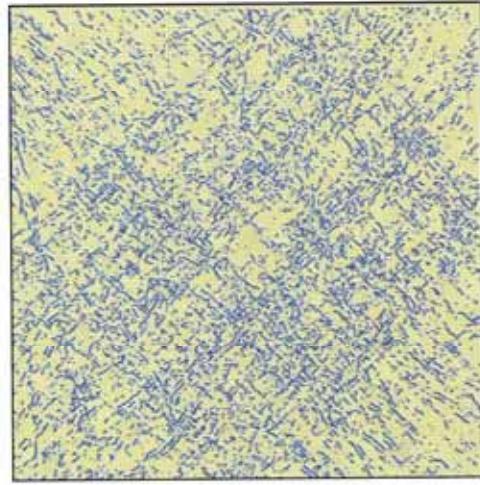


Рис. 2. Фрагмент космического изображения, полученного для северной части Московского региона с ИСЗ "Ресурс-Ф1" в 1992 г. (размер участка $160 \times 160 \text{ км}^2$), а также схемы линементов и розы-диаграммы, построенные по результатам автоматизированной обработки при различных порогах: *а* – порог 95; *б* – порог 100.



a



b

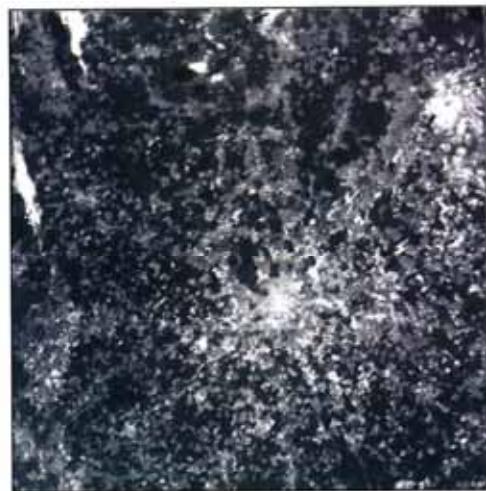


Рис. 3. Фрагменты различных космических изображений (размеры участков $160 \times 160 \text{ км}^2$), а также схемы линеаментов и розы-диаграммы, полученные при автоматизированной обработке: а – изображение, полученное с ЦСВ Landsat-7 (аппаратура ETM+) 31 июля 2001 г., порог, используемый при обработке, 110; б – изображение, полученное со спутника Terra (аппаратура MODIS) 21 августа 2005 г., порог, используемый при обработке, 95.

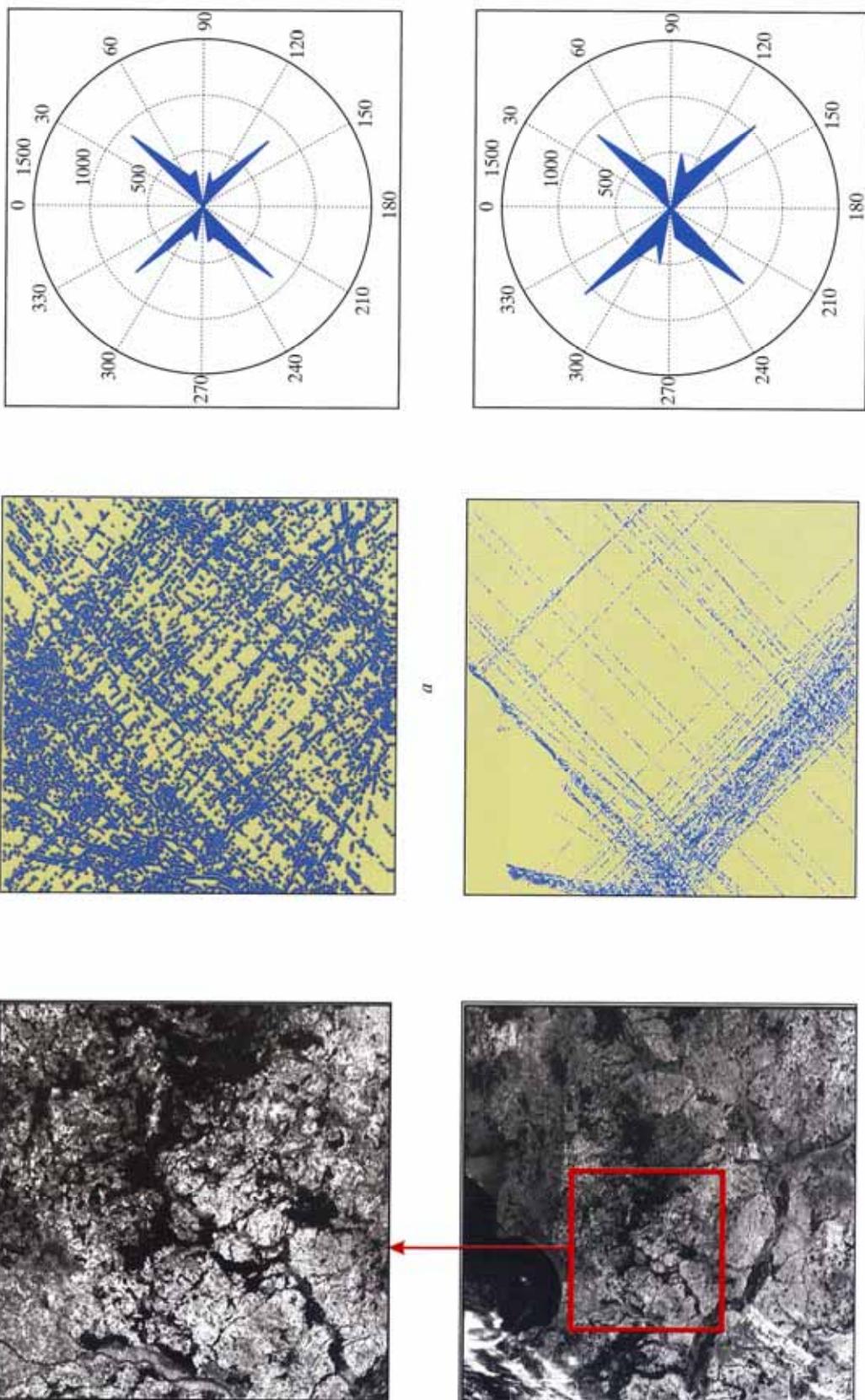
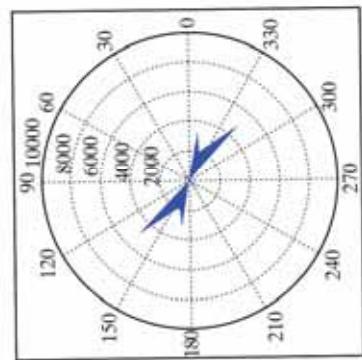
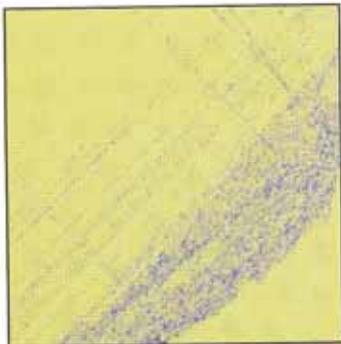
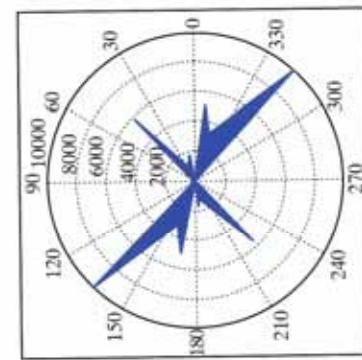
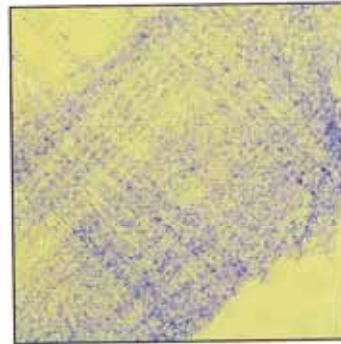
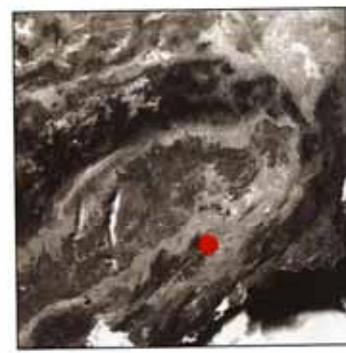


Рис. 4. Фрагменты космического изображения, полученного для Калининградского региона с ИСЗ Terra (аппаратура MODIS) 19 августа 2004 г. схемы линеаментов, розы-диаграммы, построенные по результатам автоматизированной обработки (пороги, используемые при обработке – 100); а – размер фрагмента $150 \times 150 \text{ км}^2$; б – размер фрагмента $400 \times 400 \text{ км}^2$.

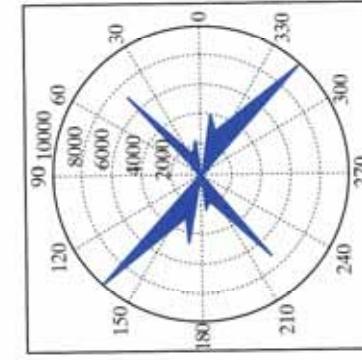
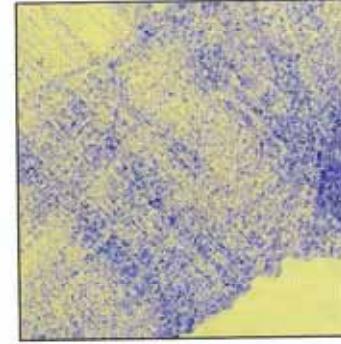


4 октября 2004 г.

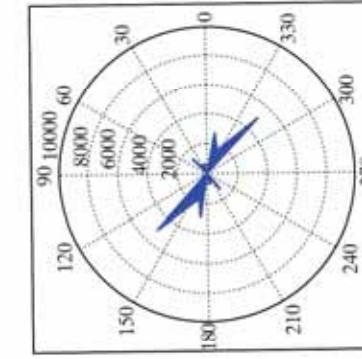
Землетрясение



28 сентября 2004 г.



26 сентября 2004 г.



21 сентября 2004 г.

Рис. 5. Схемы и розы-диаграммы, полученные при автоматизированной обработке космических изображений, полученных с ИСЗ Terra (аппаратура MODIS) при пороге 85 для района землетрясения вблизи г. Паркфилд (Калифорния), произошедшего 28 сентября 2004 г. (магнитуда 6,0). Эпицентр обозначен красной точкой.

ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методика выделения линеаментов на космических изображениях (особенно среднего и низкого разрешения) принципиально отличается от методик их выделения по геолого-геофизическим материалам и по крупномасштабным аэроснимкам. Это обусловлено в первую очередь присущими только космическим изображениям свойствами – обзорностью, естественной генерализацией и “рентгеноскопичностью”.

В силу данной специфики линеаменты, выделяемые на космических изображениях, часто нельзя выделить никаким другим способом. Поэтому некоторыми исследователями было предложено именовать их космолинеаментами [10] в отличие от линеаментов, выделяемых на аэроснимках, и собственно линеаментов, выделяемых по наземным геолого-геоморфологическим и геофизическим материалам.

Необходимость выделения подобных линеаментов в отдельную группу стала еще более очевидной с появлением автоматизированных (компьютерных) методов обработки космических изображений, когда стали дешифроваться системы линеаментов, не различимые визуально на самих изображениях. Стремление к автоматизации процесса дешифрования определилось стремлением повысить оперативность и объективность результатов при обработке материалов космической съемки. При этом исключаются субъективные и объективные причины, которые очень часто приводят к различным конечным результатам разных дешифровщиков.

Первый же опыт применения автоматизированного линеаментного анализа космических изображений продемонстрировал его большую оперативность, информативность и достоверность как при изучении геологического строения земной коры, так и при поисках полезных ископаемых [14–16].

Для практической реализации метода автоматизированного линеаментного анализа предварительно обработанные (трансформированные) космические изображения в выбранной картографической проекции экспортируются в специально разработанные программные пакеты. При помощи этих пакетов 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 дешифрования

линеаментов и их статистическая обработка – построение полей плотности и вытянутости роздиаграмм и их отличий от соседних и т.д.

В наших исследованиях использован специально модифицированный программный модуль LESSA для программной системы ERDAS IMAGING [17]. Для каждого штриха определялось направление с усреднением 22.5° 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 изучались при разной степени их выраженности (проявленности) на космических изображениях при помощи порогов. Степень выраженности сквозных линеаментов позволяет сделать выводы о том, какая их часть в пределах изображения отмечена найденными штрихами. Чем выше задан порог выраженности штрихов, тем соответственно больше должна быть плотность штрихов. Поэтому для более высоких порогов сквозных линеаментов выделяется меньше, так как большая часть линеаментов характеризуется относительно невысокой плотностью штрихов.

Необходимо отметить, что методически чрезвычайно важен выбор шага дискретизации изображения (реального размера пикселя) и размера пространственного окна анализа. Этим выбором пользователь задает размер линеаментов, которые он хотел бы учесть, и размер линеаментов, которые он предполагает выявить, а также тип линеаментов – линии (при реальных размерах пикселя до первых метров) или границы областей (зон, полей), отличающихся спектральными (тоновыми) характеристиками (при реальном размере пикселя десятки-сотни метров).

Для выявления линейных геологических и ландшафтных элементов, обычно достаточно хорошо различимых на местности (уступы, рвы, узкие линейные складки, прямые элементы речной и овражно-балочных систем, прямые береговые линии озер и морей, дайки, системы крупных трещин на платформах и т.д.), необходимо использовать космические изображения высокого разрешения с размером пикселя, не превышающим поперечные размеры (ширину) изучаемого линейного объекта. В противном случае данный объект не будет выявлен компьютером.

При малых размерах пикселя дешифрируются не только природные, но также и искусственные линеаменты – дороги, каналы, канавы, просеки и т.п. Поэтому необходимо предварительно в интерактивном режиме их убирать с анализируемых космических изображений. Если же подобная операция не выполнима в автоматизированном режиме, то необходимо их выявлять и удалять с уже полученных схем дешифрования линеаментов “вручную”.

В случае присутствия на космическом изображении сплошной зоны (полосы), отличающейся

яркостью от окружения, при автоматизированном дешифрировании будут выделены два линеамента, соответствующих границам зоны. Эту специфику линеаментов, выделяемых компьютером при обработке космических изображений, необходимо учитывать при их статистической обработке и тектонофизической интерпретации.

Реальность существования систем линеаментов, выявленных при визуальном дешифрировании космических изображений, подтверждается сходными результатами дешифрирования, получаемыми независимыми экспертами-профессионалами с одинаково высоким научным и практическим опытом.

В случае автоматизированной обработки космических изображений достоверность получаемых результатов может подтвердить сходство результатов дешифрирования космических изображений разных типов: оптических (панхроматических, многоспектральных), радиолокационных и др., или же при дешифрировании изображений одного типа, но на территории, имеющей частично взаимное перекрытие. Естественно, что подобные сравнения могут проводиться лишь на примере территорий со спокойным тектоническим режимом, т.е. на примере платформенных областей. Проанализируем системы линеаментов для таких областей на основании результатов обработки космических изображений, полученных в разное время с различных спутников.

На рис. 1 (см. на вклейке с цветн. рис.) приведены результаты автоматизированной обработки космических изображений, полученных в августе 1992 г. со спутников "Ресурс-Ф1" (аппаратура КАТЭ-200, панхроматический канал), для северной (рис. 1 a) и южной (рис. 1 b) зон Московского региона, находящегося на древней Восточно-Европейской платформе. Разрешение изображений было загружено до 100 м. Размер площади, охваченной каждым изображением, составлял 160 × 160 км². Ширина полосы их перекрытия – около 100 км.

На каждом из рисунков представлены исходные фрагменты космических изображений, выделенные схемы линеаментов, а также их розы-диаграммы. Порог при проведении обработки составлял 90.

Изображение северной части региона (рис. 1 a) захватывало Смоленско-Московскую возвышенность, Клинско-Дмитровскую гряду, частично долины рек Волги, Москвы, Клязьмы и др. Отдешифрованные линеаменты отвечают направлениям основных орографических и гидрографических элементов. Действительно, преобладающие направления возвышенности, гряды, долины рек Волги, Сестры, верховьев р.Москвы – ЮЗ–СВ. Преобладающее направление долин рек Москвы (средняя и нижняя часть долины), Истры, Дубны,

Яхромы, Вори, Нары – ЮВ–СЗ. Преобладающее направление долин рек Клязьмы, Пахры и некоторых других – субширотное. Меридиональные простирации практически отсутствуют. Есть лишь долины рек, протягивающиеся в направлениях ССВ–ЮЮЗ (реки Лобь, Лама) и ССЗ–ЮЮВ (реки Исьма, Шерна).

Данные главные направления орографических и гидрографических элементов ландшафта являются индикаторами основных современных деформационных зон (зон сжатия – растяжения) в пределах Русской плиты Восточно-Европейской платформы. В рисунке деформационной сети преобладает диагональная система деформаций. Существование подобной регулярной сети деформаций подчеркивается наличием большого числа колен у русел больших и малых рек, которые указывают на существование большого числа поперечных (секущих) (по отношению к общему простиранию речных долин) ослабленных зон (зон трещиноватости пород).

Космическое изображение южной зоны анализируемого региона (рис. 1 b) захватывало северную часть Среднерусской возвышенности, южную часть Смоленско-Московской возвышенности, долины рек Оки, Москвы, Нары, Клязьмы, Истры и др. Границы возвышенностей, нижней половины долины реки Оки, а также долины рек Пахры и частично верхнего течения реки Москвы имеют субширотные простирации. Остальные орографические и гидрографические элементы, как и на первом изображении, образуют диагональный рисунок, т.е. подчеркивают преобладание во всем Московском регионе диагональной системы линеаментов.

Схемы и розы-диаграммы сквозных линеаментов, выявленных в результате проведенной автоматизированной обработки космических изображений, полученных со спутника "Ресурс-Ф1", при выбранном пороге (90) подтверждают наличие в платформенном чехле диагональной системы трещиноватости.

При сравнении двух взаимно перекрывающихся схем линеаментов (рис. 1 a , b) видно, что линеаменты на этих схемах достаточно хорошо увязываются, переходя с одной схемы на другую. Они имеют близкую плотность и схожие розы-диаграммы, что говорит об устойчивости сети планетарной трещиноватости, контролирующей общий рисунок речной и овражно-балочной сети, форму и местоположение водораздельных возвышенностей.

На рис. 2 (см. вклейку с цветн. рис.) приведены схемы и розы-диаграммы линеаментов, полученных при автоматизированной обработке космического изображения на северную часть Московского региона при порогах 95 и 100. Как видно из представленного рисунка и рис. 1 a , при измене-

нии порогов общий характер ослабленных зон не изменяется, но количество сквозных линеаментов постепенно сокращается при увеличении порога из-за снижения степени их выраженности. Это подтверждают и розы-диаграммы линеаментов. На схемах линеаментов при увеличении порогов находят отражение лишь наиболее мощные зоны трещиноватости, к которым приурочены долины рек Москвы, Истры, Большой Сестры, Нерли. Данные зоны разделяют крупные блоки, вытянутые в направлении СЗ–ЮВ и имеющие размеры 60×140 км и более.

Результаты, полученные при порогах 95 и 100, находятся в хорошем согласии с геологическими данными и свидетельствуют о том, что на космических изображениях Русской плиты наиболее четко выражены протяженные линеаменты северо-западного простирания, ограничивающие Днепрово-Донецкий и Пачелмский авлакогены, Кандалакшский раздвиг и Припятский грабен, а также Тимансскую складчатую область [10].

На рис. 3а (см. цветную вклейку с рис.) приведено синтезированное сканерное космическое изображение для Московского региона (размер 160×160 км 2), полученное со спутника Landsat-7 в 2000 г. (пространственное разрешение загрублено до 240 м), а также полученные при автоматизированной обработке схемы и роза-диаграмма линеаментов при пороге 110. Это принципиально другой тип космического изображения, которое к тому же получено на восемь лет позже представленного ранее фотоизображения, полученного спутником “Ресурс-Ф1”.

На рис. 3б приведены сканерное космическое изображение, снятое в 2005 г. для этого региона (размер 160×160 км 2) со спутника Terra (аппаратура MODIS, спектральный канал $\Delta\lambda = 0.62\text{--}0.67$ мкм, пространственное разрешение 250 м), а также схема и роза-диаграмма линеаментов, полученных при пороге 95.

Сравнительный анализ схем и роз-диаграмм линеаментов, полученных при автоматизированном анализе разновременных космических изображений различных типов, приведенных на рис. 1 и 3, указывает на их большое сходство, а следовательно, и на высокую устойчивость систем линеаментов в Московском регионе. Сходство результатов автоматизированного линеаментного анализа разнотипных космических изображений подтверждает их высокую достоверность. Причем эти результаты не зависят от способа, времени космической съемки и типов используемых изображений.

На рис. 4 (см. вклейку с цветн. рис.) приведены фрагменты сканерного космического изображения для участков поверхности Земли размерами 150×150 км 2 (рис. 4а) и 400×400 км 2 (рис. 4б), полученного для Калининградского региона и

смежных территорий со спутника Terra (аппаратура MODIS, пространственное разрешение 250 м, спектральный диапазон $\Delta\lambda = 0.62\text{--}0.67$ мкм), а также схемы и розы-диаграммы линеаментов, построенных при пороге 100 по результатам автоматизированной обработки. Анализируемое космическое изображение получено 19 сентября 2004 г. – за два дня до произошедшего здесь землетрясения (магнитуда 5.0).

На схемах линеаментов для Калининградского района (рис. 4а) выражена та же диагональная система линеаментов, которая была выявлена в Московском регионе (см. рис. 1–3). Это еще раз подтверждает высокую устойчивость диагональных систем линеаментов, выделяемых на космических изображениях, в пределах Восточно-Европейской платформы, вне зависимости от районов исследований, типов изображений и времени их получения.

Оба направления (СЗ–ЮВ и СВ–ЮЗ) в Калининградском регионе, как и в Московском регионе, выражены примерно в равной степени.

На рис. 4б приведены схема дешифрирования и роза-диаграмма линеаментов фрагмента того же космического изображения, но охватывающего большую площадь 400×400 км 2 . Несмотря на увеличение анализируемой площади, общий рисунок линеаментов остался прежним и очень похож на рисунок линеаментов Московского региона, выявленный по фотоснимкам, полученным со спутника “Ресурс-Ф1” при пороге 100 (рис. 2б). В отличие от поля линеаментов Московского региона в районе г. Калининграда наиболее длинные блоки вытянуты в направлении ЮЗ–СВ, в то время как в Московском регионе блоки вытянуты в направлении СЗ–ЮВ.

Таким образом, проведенный анализ показал, что на результаты автоматизированного линеаментного анализа не оказывают принципиального влияния ни тип космического изображения, ни условия (высота) съемки, ни размер исследуемой площади. Это говорит об устойчивости общего рисунка линеаментов и подтверждает высокую стабильность и объективность результатов автоматизированного компьютерного дешифрирования линеаментов по космическим изображениям.

МЕХАНИЗМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ НА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Как было отмечено выше, визуально дешифрируемые на космических изображениях линеаменты отражают положение планетарной сети глубинных разломов и зон трещиноватости (ослабленных зон), нашедшие отражение в ландшафте в виде специфического рисунка гидросети, морфоструктур, и увлажненности и обводненно-

сти почв и грунтов и т.д. [9, 10]. Данная планетарная система трещиноватости характеризует дискретность строения земной коры, обусловленную вариациями во времени поля напряжений из-за изменения скорости вращения и, как следствие, фигуры Земли. Изменения скорости происходят как в короткие интервалы времени, так и в вековом масштабе [18].

Древнее заложение линеаментного каркаса Земли и его постоянное “омоложение” (активизация) обусловливают автономность этого каркаса, его транзитность и консервативность. Для линеаментов и их систем как бы не существует ни структурных барьеров, ни разницы физико-механических свойств горных пород, ни сложной геологической эволюции гетерогенных блоков земной коры.

Одной из особенностей линеаментной тектоники, которая условно была названа кинематичностью [10], является то, что составляющие линеаментного рисунка планеты часто имеют кинематику, тождественную кинематике разрывных нарушений аналогичных простираций: например, некоторые линеаменты северо-западных простираций имеют правосдвиговую составляющую, а северо-восточных – левосдвиговую и т.д. [19, 20].

Заложившаяся на самых ранних этапах развития Земли линеаментная сеть постоянно и непрерывно обновляется, поскольку постоянно и непрерывно вплоть до настоящего времени продолжает действовать ротационный механизм. При этом в эпохи интенсивных деструкций земной коры, связанных с развитием тектонических процессов, планетарные линеаментные системы затушевывались мозаикой вновь образованных тектонических структур, перекрывались толщами деформированных пород. По окончании же очередной тектонической эпохи планетарный линеаментный рисунок возобновляется по первичным направлениям.

В свете изложенного причину достаточно заметных землетрясений (магнитуда 4–5) на платформах в г. Калининграде (сентябрь 2004 г.), Германии (июль 2002 г.), Англии (октябрь 2002 г.), Нидерландах (апрель 1977 г.) и других платформенных областях можно трактовать как развитие сколовых деформаций при преобразовании фигуры Земли под действием ротационных сил.

Системы линеаментов, выделенные автоматизированным способом по космическим изображениям, очень динамичны. Это доказывается как результатами нашего линеаментного анализа в сейсмических областях [1–5], так и геодезическими наблюдениями в пределах платформ и подвижных поясов. По данным работы [21] в разломных зонах земной коры, как на платформах, так и в подвижных поясах, наблюдались очень активные аномальные высокоамплитудные дефор-

мационные процессы со скоростью движений поверхности свыше 50 мм/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 [21].

Выполненные эмпирические обобщения позволили прийти к выводу о том, что в качестве источников активности зон разломов должны выступать процессы, протекающие внутри самих разломных зон, так как существующие модели глубинной геодинамики не способны объяснить наблюдающийся пространственно-временный спектр современных движений земной коры и особенно возникновение интенсивных движений в зонах платформенных разломов.

В целом физическую природу возникновения интенсивных деформаций в разломных зонах платформ и подвижных поясов (как в сейсмичных, так и асейсмичных их участках) представляют следующим образом [21]. Геологическая среда находится в обстановке внешних и внутренних (эндогенные и экзогенные) квазистатических (глобальные и региональные поля напряжений) и динамических нагрузок (приливы, неравномерности вращения Земли, процессы подготовки землетрясений, сейсмические волны, техногенные процессы и т.д.). Кроме того, в разломных зонах, особенно осадочных бассейнов, постоянно присутствует и перераспределяется динамически активная и химически агрессивная флюидная система.

Совместное влияние всех этих факторов реализуется в первую очередь в условиях повышенной концентрации дефектов среды, т.е. в зонах разломов с неустойчивыми механическими характеристиками, посредством кратковременных флюктуаций жесткостных характеристик горных пород в локальных объемах, что приводит к возникновению интенсивных деформаций в разломных зонах и, следовательно, выражению их в ландшафтах (микроландшафтных признаках) и на космических изображениях в виде линеаментов.

На основе разработанной методики решения обратных задач современной геодинамики разломов определены диапазоны глубин, размеры, форма и степень разупрочнения областей формирования интенсивных деформаций. Анализ этих результатов и их сопоставление с геодинамической и геолого-геофизической обстановкой ряда регионов показал, что источники этих деформаций залегают в диапазоне глубин от первых десятков метров до первых километров. Они имеют

(в сечении) форму длинных, субвертикально ориентированных прямоугольников, приуроченных к зонам залегания флюидонасыщенных, трещиноватых пород [21].

Ранее к близким выводам пришли авторы работы [10]. В этой работе подчеркивалось, что линеаменты, трассирующие зоны раздробленности земной коры, могут отражать подводящие каналы различных флюидов и растворов. В связи с этим облик линеаментов, выделяемых на космических изображениях, является генерализованным отражением на земной поверхности как деформаций, так и флюидного режима приповерхностных частей земной коры.

В работе [22] природу линеаментов, регистрируемых на космических изображениях, авторы связывали с отражением на земной поверхности видимых и скрытых разноглубинных разломов земной коры. В наиболее простом варианте, когда разрывное нарушение достигает земной поверхности, линия разлома визуально дешифрируется на космическом изображении в виде явно выраженного линеамента, интенсивность и четкость проявления которого связана с контрастностью движений по линии разлома. Кроме того, интенсивность линеаментного проявления разлома зависит от угла наклона поверхности разлома: единичные линеаменты или узкие линеаментные зоны проявляются при вертикальном положении разлома, а при наклонном положении в приразломной части (вблизи выхода 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 визуально выделяются на космических изображениях в виде узких или достаточно широких зон линеаментов в зависимости от мощности перекрывающего его осадочного чехла (чем мощность больше, тем линеамент, выделяемый на космическом изображении шире) и от интенсивности движений по скрытому разлому (чем больше интенсивность, тем шире зона трещин и линеаментов).

Линеаменты, визуально фиксируемые на космических изображениях, через вторичные индикаторы могут отражать не только формы дислокационного происхождения (разрывы, трещины, складки), но и некоторые линии (зоны, полосы) повышенного или пониженного напряженного состояния коры [22].

Линеаменты и линеаментные зоны являются зонами (каналами) повышенной проницаемости земной коры. Они служат проводящими путями водных растворов и газов, как правило, более высокотемпературными по сравнению с поверхностью суши или морского дна. Данное обстоятельство не-

редко приводит к уникальным современными явлениям и процессам: протаивание протяженных узких зон, возникновение зон дробления льда, к которым, например, на Байкале обычно приурочены нерпичьи лунки пропаривания, апвеллинг, линейность облачного покрова и др. [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛИНЕАМЕНТОВ В СЕЙСМОПАСНЫХ ОБЛАСТЯХ

Нами и другими исследователями [1–5, 10] установлено, что ориентировка линеаментов в пространстве и их геодинамическая реализация достаточно тесно взаимосвязаны: диагональные линеаменты образуют преимущественно зоны скальвания, ортогональные – зоны сжатия (широтные) и растяжения (меридиональные). Поэтому физическая природа линеаментов связана прежде всего именно с этими особенностями полей напряжений, обусловливающими характер деформаций и проницаемости земной коры.

Таким образом, степень видимости (различности) линеаментов на космических изображениях и их физическая природа зависят прежде всего от характера напряженно-деформированного состояния земной коры и обусловленной им проницаемостью этой коры, которые определяют их “физиономичность”, то есть выраженность в ландшафтах и физико-химических свойствах поверхности Земли, проявляющихся за счет изменения влажности, температуры, степени окисленности, выщелоченности, выветрелости и других свойств почво-грунтов и горных пород, растительного покрова и приземных слоев атмосферы.

Наши исследования, выполненные при космическом мониторинге сейсмоопасных территорий в зоне разлома Сан-Андреас (Калифорния, США), Перу, Турции и других сейсмических регионах мира [1–5], показали очень высокую динамичность систем линеаментов. Оказалось, что за 2–3 мес. до землетрясения начинает увеличиваться степень выраженности (проявленности) всех систем линеаментов, которая достигает максимума за 20 дней до землетрясения.

Конкретная степень выраженности линеаментов, выделяемых на космических изображениях, зависит от тектонофизических особенностей строения земной коры и особенностей флюидогеодинамического режима. Например, в условиях правосдвигового разрыва Сан-Андреас, имеющего общую ориентировку СЗ–ЮВ и кососекущее субмеридиональное простижение развитых здесь основных тектонических структур Береговых хребтов и Сьерра-Невады, за 2–3 мес. до землетрясения начинает резко возрастать степень проявленности секущих (поперечных) по отношению к разлому Сан-Андреас линеаментов. При подго-

товке сильных землетрясений степень проявленности поперечных линеаментов за 20 дней до события достигает максимума и в отдельных случаях превосходит степень выраженности линеаментов, согласных с общим простиранием разрыва Сан-Андреас. Затем через 20 дней после землетрясений их количество начинает уменьшаться и через 2–3 мес. проявленность линеаментов возвращается к прежнему уровню, т.е. за счет релаксации напряжений в земной коре после землетрясения проявлены в основном лишь линеаменты, согласные с простиранием разлома Сан-Андреас [1–5].

Космический сейсмический мониторинг, организованный нами в Калифорнии, выявил еще более короткопериодические изменения систем линеаментов. На рис. 5 (см. на вклейке с цветн. рис.) в качестве примеров приведены космические изображения, полученные со спутника Тетта (аппаратура MODIS), и результаты их автоматизированного линеаментного анализа при пороге 85, полученные на дни, предшествующие сильному землетрясению в Паркфилде 28 сентября 2004 г. (магнитуда 6.0) и на дни после него. Размеры анализируемых участков земной поверхности составляли $400 \times 400 \text{ км}^2$.

Как видно из представленного рисунка, наиболее четко выявляется диагональная система линеаментов, но степень ее выраженности (количество сквозных линеаментов) достаточно сильно варьируется. Совершенно очевидно, что подобные высоко мобильные (сверх короткопериодические) изменения линеаментов не могут быть зафиксированы в ландшафтах, геологических структурах и горных породах.

Следует иметь в виду, что данный вывод не относится к быстрым сейсмическим подвижкам. Они строго локализованы и не могут обеспечить высокую мобильность всей системы линеаментов.

Природа данного явления должна быть связана с очень высоко мобильным физическим механизмом, практически мгновенно (применительно к разбираемому случаю) реагирующему на изменение поля напряжений в периоды подготовки, в момент землетрясения и после него.

Из всех возможных причин, способствующих проявлению линеаментов на космических изображениях, по своей высокой мобильности в наибольшей степени подходит лишь флюидный режим (флюидогеодинамический механизм), который может практически мгновенно “проявить” ослабленные зоны земной коры, обладающие максимальной проницаемостью.

Основной индикатор движения жидкых и газовых растворов к поверхности – изменение газового состава, влажности и температурного режима почво-грунтов, в какой-то мере растительности (листьев и травы), а также приземного слоя атмо-

сферы. Чем больше проницаемость (трещиноватость), тем интенсивнее происходит тепломассоперенос из земной коры к поверхности, тем больше нарушается гидродинамический и гидрохимический режимы подземных, грунтовых и капиллярных вод, а также почвенных растворов и тем больше насыщаются почвы и приземные слои атмосферы параметрами воды, инертными и глубинными газами (гелием, водородом, радоном, оксидами и диоксидами азота и серы и т.д.).

В связи с этим изменяются отражающие спектральные характеристики почв, грунтов, растительности и степень прозрачности приземных слоев атмосферы. Интегральный эффект (суммирование) данных факторов приводит к изменению текстуры космического изображения. Эти изменения могут быть очень незначительными и незаметными для человеческого глаза. Но при автоматизированной обработке распознаются даже небольшие различия, что и выявляет “скрытую” полосчато-линейную текстуру космоизображения, обусловленную изменением напряженно-деформированного поля и флюидного “дыхания” недр.

Флюидогеодинамический механизм формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях, позволяет вполне просто и объективно объяснить наличие высокочастотных (десятка часов, дни) флюктуаций систем линеаментов, обнаруженных в результате осуществления космического сейсмического мониторинга в Калифорнии (рис. 5).

Высокочастотные флюктуации, по-видимому, могут быть по своей природе также вторичными (наложенными), обусловленными метеоусловиями – ветром, атмосферными осадками, интенсивностью солнечной радиации, влажностью почвы и воздуха, которые могут легко снизить (замаскировать) влияние газового “дыхания” недр. Таким образом, метеоусловия могут усиливать или, наоборот, ослабить степень проявленности линеаментов на космоизображении.

Это обстоятельство, возможно, может влиять на эффективность космического сейсмического мониторинга. Наиболее устойчивые результаты при прогнозировании землетрясений могут быть получены в наиболее благоприятных метеоусловиях, т.е. при отсутствии сильного ветра, дождя и других “маскирующих” факторов. Данное обстоятельство принципиально важно для космического сейсмического мониторинга и поэтому требует проведения комплекса специальных исследований по изучению корреляции степени выраженности линеаментных систем, выделяемых на космических изображениях, и метеоусловий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали необходимость строгого разграничения понятий собственно тектонических линеаментов и линеаментов, регистрируемых по космическим изображениям. Собственно линеаменты выделяются по геологическим, геофизическим, геохимическим, топографическим и другим мелкомасштабным картам. Они отражают планетарную сеть глубинных разломов и трещиноватости. Дешифрируемые визуально на космических изображениях линеаменты выявляются по интегральным геологогеографическим признакам, благодаря обзорности, естественной генерализации и “рентгеноскопичности” космических изображений.

Автоматизированная компьютерная обработка космических изображений позволяет выявить их визуально незаметную линейно-полосчатую текстуру, обусловленную планетарной трещиноватостью и образующей две характерные взаимосвязанные системы линеаментов – ортогональную и диагональную.

В результате выполненных работ подтверждено мнение ряда исследователей о преобладании на платформах диагональной системы линеаментов. В подвижных поясах развитие той или иной системы зависит от конкретных геологических условий.

В настоящей работе показано, что формирование систем линеаментов, выявляемых при обработке космических изображений, обусловлено, главным образом, флюидогеодинамическим механизмом. Флюиды циркулируют в ослабленных зонах земной коры, характеризующихся высокой проницаемостью. Они вызывают изменение физико-химических свойств приповерхностных частей литосферы, гидросферы и атмосферы, т.е. изменение их спектральных характеристик, что находит свое отражение на космических изображениях в виде линейно-полосчатой текстуры, обычно не различимой визуально, но распознаваемой компьютером.

Неблагоприятные метеоусловия (сильный ветер, атмосферные осадки, высокая солнечная радиация и др.) могут уменьшить степень выраженности линеаментов. Данное обстоятельство еще раз убеждает в том, что самым надежным способом повышения достоверности прогноза землетрясений (особенно при локализации их места) является комплексирование многих, различных по природе прогностических параметров. Среди них достойное место должен занять автоматизированный линеаментный анализ космических изображений, позволяющий оперативно оценить сейсмическую опасность на больших территориях в любом районе земного шара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
2. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Изв. 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 // Исслед. 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. Bondur V.G., Kuznetsova L.V. Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using The Method of Lineament Analysis // Proc. of 31 Int. Symp. Rem. Sens. of Environment. St. Petersburg, 2005.
6. Hobbs W.N. Liniaments at the Atlantic border region // Bull. Geol. Soc. Amer. 1904. V. 15. P. 483–506.
7. Sonder R.A. Die Liniament tektonik und ihre Probleme // Ed. Geol. Helv. 1938. V. 31. № 1. P. 199–238.
8. Хайн В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ, 1995. 480 с.
9. Методическое руководство по изучению планетарной трещиноватости и линеаментов. Л.: ЛГУ, 1977. 270 с.
10. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.
11. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831.
12. Дискретные свойства геофизической среды / Под ред. Садовского М.А. М.: Наука, 1989. 174 с.
13. Рогожин Е.А. Блоковое строение земной коры Северной Евразии // Физика Земли. 2004. № 10. С. 81–94.
14. Автоматизированный линеаментный анализ природных линеаментных систем. Л.: ВСЕГЕИ, 1988. 131 с.
15. Короновский Н.В., Златопольский А.А., Иванченко Г.Н. Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 1. С. 111–118.
16. Зверев А.Т., Кахтан Амин Али. Поиски месторождений полезных ископаемых на основе автоматизированного линеаментного анализа космических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 6. С. 74–79.
17. Zlatopol'sky A. Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Comp. Geosci. 1997. V. 23. № 1.

18. Шейдеггер А. Основы геодинамики. М.: Недра, 1987. 384 с.
19. Шульц С.С. (мл.). Концентрические сводовые структуры восточной части Туранской плиты на космических снимках // Изв. вузов. Геология и разведка. 1974. № 12.
20. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
21. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Мос. Гос. Горный университет, 2004. 262 с.
22. Космическая информация в геологии / Под ред. Трифонова В.Г. и др. М.: Наука, 1983. 370 с.

Lineament System Formation Mechanisms Registered in Space Images During the Monitoring of Seismic Danger Areas

V. G. Bondur, A. T. Zverev

Scientific Center of Aerospace Monitoring "Aerocosmos", Moscow

Lineament system changes registered during the processing of space imagery obtained by the monitoring of seismic and seismic areas have been analyzed. It is discovered that the lineament systems are relatively stable in seismic areas and they are highly dynamic in seismic danger areas in the period of preparation of earthquakes. It is shown that typical for the lineament system orthogonal and diagonal orientations are related to planetary fissuring, and high dynamics of the lineament system in seismic danger areas concern to the mode of deformation and fluid state of the Earth's crust in the period of preparation of earthquakes. Cyclicity of manifestation of lineament systems in the space images of seismic danger areas is the precursor of earthquakes and may be caused by fluid geodynamic mechanism.