Линеаментный анализ данных MODIS и возможности интерпретации его результатов

С. Г. Крицук, И. Ш. Латыпов

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности, Санкт-Петербург, 194110, Россия E-mails: sit.bloom@gmail.com, liscander@mail.ru

На примере линеаментного анализа спутниковых изображений MODIS пустыни Шехдал на юге Ирана показана нестабильность во времени текстурных характеристик этих изображений и их зависимость от условий съёмки. Эту зависимость предопределили характеристики системы EOS и сканера MODIS: 16-дневный цикл вариаций углов визирования и времени съёмки, полосовая структура данных со сложно изменяющимся пространственным разрешением. Распределения по направлениям линейных элементов спутникового изображения MODIS оказались чувствительными к положению Солнца и могут существенно изменяться в течение 1,5-2 ч и отличаться для изображений, полученных спутниками Terra и Aqua в один день. Кроме того, характеристики распределения линеаментов по направлениям зависят от пространственного разрешения данных и/или геометрии визирования и, следовательно, будут различны на материалах съёмки MODIS за две соседние даты. Распределения линейных элементов изображения по направлениям показывают определённую нестабильность даже при близких условиях съёмки — положении Солнца и геометрии визирования. Это может быть связано со свойствами атмосферы, влияющими на функцию рассеяния точки и, как следствие, на пространственное разрешение данных. Таким образом, при мониторинге территории материалы съёмок MODIS не предоставляют возможности ежедневного получения устойчивого распределения линеаментов и могут использоваться весьма ограниченно.

Ключевые слова: линеаментный анализ, MODIS, спутниковый мониторинг

Одобрена к печати: 21.05.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-45-53

Введение

Будем называть схемой линеаментов (СЛ) совокупность протяжённых линейных элементов, выявленных для определённой территории на материалах дистанционной съёмки. Анализ СЛ широко используется при интерпретации картографических материалов в рамках геологических, геофизических и инженерно-геологических исследований и при мониторинге сейсмоопасности территорий, например, в работах (Бондур и др., 2012; Космогеология..., 1987; Трифонов и др., 1988). В круге инженерно-геологических и геофизических задач можно выделить два класса. Первый — это исторически сложившееся прослеживание линейных (тектонических) структур. Достаточно широкий спектр такого рода задач описан с соответствующими ссылками, например, в статье М. Рахнама и К. Глоэг (Rahnama, Gloaguen, 2014а). Второй класс — это картографирование статистических характеристик СЛ, используемых, с одной стороны, для сегментирования территории (например, Горный и др., 2008), а с другой — для построения временных рядов (мониторинга сейсмоопасности (например, Бондур и др., 2012)).

Для автоматизированного построения и анализа СЛ разработан обширный инструментарий (например, Rahnama, Gloaguen, 2014a, b; Zlatopolsky, 1992). Однако вопросам устойчивости СЛ и её зависимости от условий съёмки уделяется недостаточно внимания. Разработчики программного обеспечения справедливо считают эти вопросы прерогативой пользователей, поскольку они могут быть решены лишь в рамках конкретной задачи. В качестве готовых решений предлагается использование «других» методов построения СЛ и байесовской модели сравнения (Rahnama, Gloaguen, 2014a, b) либо экспертная оценка (http://lineament.ru). Цель настоящей работы — оценить устойчивость статистических характеристик СЛ и описать зависимость их наиболее характерных искажений от изменений условий съёмки на примере материалов съёмок в оптическом диапазоне системой спутников EOS.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана пустыня Шехдад, расположенная в провинции Керман на юго-востоке Ирана (рис. 1). Это территория с характерными линейными формами рельефа, и если считать альбедо и индикатрису земной поверхности незначительно изменяющимися во времени факторами*, то можно ожидать, что контрасты на спутниковых снимках в оптическом диапазоне будут зависеть главным образом от условий съёмки: положения Солнца, азимута и угла визирования. На северо-западе выделена область (СЗ-участок), для которой характерны протяжённые линейные скалистые гряды (СЗ-простирания) высотой первые сотни метров, разделённые долинами шириной 200-500 м. Эта территория является почти идеальным объектом с линейчатой архитектурой поверхности. Рельеф северо-восточного участка (СВ-участок) напоминает соты с доминирующими СВ-дугообразными грядами высотой до первых сотен метров, расположенными на расстоянии 2–3 км друг от друга, и их менее протяжёнными ССЗ- и ЮВ-отрогами. СВ-участок — это песчаная пустыня. Использовались материалы 2-го канала MODIS (ближний инфракрасный — 841–876 нм) с разрешением в надире 250 м (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov). А для эмуляции контрастов яркости на этих материалах использовалась подсвеченная цифровая модель рельефа (LIMP) — ASTER DEM GTM2 (https://earthexplorer.usgs.gov).



Рис. 1. Юг Ирана (провинция Керман); выделены СЗ- и СВ-участки

Все материалы были трансформированы в UTM с разрешением 250 м, а последующий линеаментный анализ выполнен при фиксированных параметрах процедур для получения сравнимых результатов. Трансформация ЦМР проводилась с интегрированием, поскольку исходное разрешение ASTER DEM GTM2 составляет 30 м.

При проведении настоящего исследования был использован авторский пакет линеаментного анализа (ILA — Image Lineaments Analysis, авторы И.Ш. Латыпов и С.Г. Крицук). Линейные элементы в нём строятся по экстремумам яркости изображения. Выделение экстремумов проводится путём бинаризации изображения в скользящем окне. По бинаризованному изображению в скользящем окне с использованием попиксельной маски линеамента

^{*} Это возможно, поскольку в пустыне нет сезонных вариаций альбедо и индикатриссы, связанных со сменой фенофаз растительности. Некоторое влияние на характеристики поверхности мог бы оказать также режим почвенной влаги, которым мы здесь пренебрегаем.

и критерия покрытия^{*} строятся линейные элементы заданного диапазона длин, которые могут объединяться в более длинные. На *рис. 2* представлены результаты предварительной обработки и схема линеаментов для одного из снимков MODIS пустыни Шехдад.



Рис. 2. Исходное изображение: 2-й канал MODIS от 24.01.2004 (*a*). Результаты ILA: бинаризация по экстремумам яркости (*б*); схема линейных элементов (*в*)

Из-за недостаточного качества географической привязки использование байесовского подхода для сравнения СЛ, полученных по материалам MODIS при различных условиях съёмки, не представляется возможным. Поэтому были использованы статистические характеристики СЛ: степень покрытия**, средняя нормированная длина*** и роза-гистограмма направлений линейных элементов (РГН), построенная по всему изображению. Для сравнения РГН апробирована статистика Колмогорова – Смирнова, позволяющая оценить вероятность того, что два распределения направлений линейных элементов являются однородными (выборками из одной генеральной совокупности). Для оценки порогового значения критерия Колмогорова – Смирнова рассматривались розы для схем линеаментов по материалам съёмки MODIS в почти идентичных по положению Солнца и спутника условиях (*puc. 3*, см. с. 48); ожидалось, что они будут идентичными (с некоторой точностью). Розы действительно схожи, минимальное значение вероятности однородности распределений — 0,44. Найдя пару роз с такой же или более высокой вероятностью однородности, мы можем в рамках этого исследования считать их сходными. В качестве дополнительного показателя, хорошо иллюстрирующего различия неоднородных (несхожих) распределений, использован коэффициент корреляции РГН, непригодный, однако, для статистически обоснованных выводов.

^{*} Линейный элемент (ЛЭ) в концепции ILA может иметь «дырки», размер которых ограничивается параметром. Критерий покрытия ограничивает долю экстремальных пикселов изображения под маской ЛЭ по отношению к доле экстремальных пикселов в окне.

^{**} Отношение суммы длин всех линейных элементов в пикселах к количеству экстремальных точек на бинаризованном изображении (количество пикселов, задействованных при построении линейных элементов, ко всем потенциально возможным).

^{***} Отношение средней длины всех линейных элементов к минимальной (номинальной) длине, заданной на этапе построения СЛ.

	23.12.2003	20.12.2002	12.12.2005	28.12.2005	31.12.2006
23.12.2003	\mathcal{X}	0,994	0,968	0,987	0,968
20.12.2002	0,999	\nearrow	0,953	0,971	0,946
12.12.2005	0,795	0,636	X	0,984	0,979
28.12.2005	0,996	0,894	0,995	\mathcal{X}	0,991
31.12.2006	0,542	0,435	0,955	0,999	$\geq \!$

Рис. 3. Сравнение роз-гистограмм направлений линейных элементов изображений СВ-участка по материалам MODIS Aqua (съёмка в надир, 09:15 UTC) в различные годы в декабре. РГН размещены на главной диагонали. Верхняя треугольная матрица — коэффициенты корреляции Пирсона РГН; нижняя — вероятности однородности распределений направлений линейных элементов СЛ по критерию Колмогорова – Смирнова

Результаты и дискуссия

Экстремумы яркости на изображении пустынных территорий и, соответственно, положение линейных элементов СЛ будут определяться положением Солнца и геометрией визирования (в районах с расчленённым рельефом — главным образом положением теней), пространственным разрешением сканирующей системы, вариациями альбедо и индикатрисы подстилающей поверхности.

Схемы линеаментов, полученные по съёмкам MODIS в почти идентичных по положению Солнца и спутника условиях, показали некоторые различия распределений по направлениям линейных элементов (см. *puc. 3*). Они могут быть связаны, в частности, с характерными для южной пустыни вариациями свойств атмосферы, которые влияют на функцию рассеяния точки и, соответственно, на пространственное разрешение данных.

Анализ зависимости характеристик СЛ от положения Солнца (*puc.* 4–6, см. с. 49–50) проведён на основе сравнения схем линеаментов, полученных по изображениям MODIS, с результатами моделирования этих изображений с последующим линеаментным анализом. Моделирование выполнялось на основе подсвеченной Солнцем (в предположении фиксированного альбедо поверхности) ЦМР (ПС ЦМР) (местное время UTC+4).

Линейчатая архитектура поверхности СЗ-участка отражается в закономерном изменении со временем суток розы-гистограммы схемы линеаментов подсвеченной Солнцем ЦМР при наличии особой точки в этой зависимости в условиях освещения вдоль доминирующих ССЗ-гряд с азимутами 330–340° (~06:30 UTC). Длинные линейные элементы ССЗ-направлений практически отсутствуют на СЛ по ПСЦМР за 06:30, и, соответственно, наблюдаются минимальные средняя длина линейных элементов и степень покрытия. Результаты моделирования отличны от данных, полученных по изображениям MODIS, снятым в надир, на что указывает неоднородность (несходство) РГН по критерию Колмогорова – Смирнова, а также низкая корреляция роз. Это позволяет предположить, что контрасты на снимках MODIS определяются не условиями освещения, а вариациями альбедо. Действительно, альбедо скальных гряд и разделяющих их долин различно (по спутниковым данным высокого разрешения и фотографиям Google Earth).

Моделирование при помощи ЦМР контрастов спутниковых изображений MODIS на CBучастке показало закономерное изменение характеристик схемы линейных элементов подсвеченной Солнцем ЦМР со временем суток (*puc. 5*, см. с. 49).



Рис. 4. Характеристики схем линеаментов C3-участка по подсвеченной Солнцем ЦМР для 22 декабря и локального времени съёмки, приближённого ко времени пролёта спутников системы EOS: нормированная средняя длина (1); степень покрытия (2); вероятности однородности распределений направлений линейных элементов по критерию Колмогорова (3–4) и коэффициенты корреляции роз-гисторамм (5–6) СЛ, построенных по подсвеченной Солнцем ЦМР и материалам съёмки в надир MODIS Terra (3 и 5) и MODIS Aqua (4 и 6). Пунктир — пороговое значение вероятности (0,44). В нижней части рисунка приведены розы-гистограммы направлений линейных элементов схем линеаментов по подсвеченной Солнцем ЦМР и под ними — по материалам MODIS (съёмки в надир)



Рис. 5. Характеристики схем линеаментов СВ-участка по подсвеченной Солнцем ЦМР для 22 декабря и времени съёмки, приближённого ко времени пролёта спутников системы EOS: степень покрытия (1); вероятности однородности распределений направлений линейных элементов по критерию Колмогорова – Смирнова (2–3) и коэффициенты корреляции роз-гисторамм (4–5) СЛ, построенных по подсвеченной Солнцем ЦМР и по материалам съёмок MODIS Terra (2 и 4) и MODIS Aqua (3 и 5). Пунктир — пороговое значение вероятности (0,44). В нижней части рисунка приведены розы-гистограммы направлений линейных элементов схем линеаментов по подсвеченной Солнцем ЦМР и под ними — по материалам MODIS (съёмки в надир)



Рис. 6. Сезонные вариации характеристик схем линеаментов на CB-участке по материалам MODIS (визирование в надир): степени покрытия (1); коэффициента вариации яркости изображений MODIS (2); вероятности однородности распределений по направлениям линейных элементов СЛ, построенных по материалам MODIS и по подсвеченной Солнцем для соответствующего времени ЦМР (по критерию Колмогорова – Смирнова) (3). Штирхпунктир — пороговое значение вероятности (0,44). Под графиками приведены розы-гистограммы направлений линейных элементов: в верхнем ряду — по данным MODIS, в нижнем — по подсвеченной Солнцем в соответствии со времени съёмки MODIS ЦМР

В послеполуденное время контрасты ЗСЗ- и ВЮВ-склонов снижаются и количество ВСВ-линейных элементов (~60°) СЛ падает, что приводит к снижению степени покрытия и укорочению СВ-лучей роз. Сходство РГН схем линеаментов подсвеченной Солнцем ЦМР и изображений MODIS, полученных с малыми углами визирования, позволяет предполагать, что аналогичные особенности будут наблюдаться и на материалах спутниковых съёмок, а значит, время съёмки будет играть важную роль даже на коротких интервалах в ~1,5 ч.

С ростом высоты Солнца на спутниковых снимках закономерно падает относительный контраст протяжённых BCB-зон (~60°), что приводит к снижению коэффициента вариации яркости изображений MODIS (*puc.* 6, (2)), количества соответствующих линейных элементов (относительной доли CB- и BCB-элементов) и степени покрытия (см. *puc.* 6, (1)). В апреле, когда Солнце поднимается почти в зенит (широта ~30°; локальное время 13:15 (09:15 UTC)), тенденция декабря – марта изменяется: доля контрастов на спутниковых изображениях, определяемая освещённостью, стабилизируется, но становится меньше доли, связанной с вариациями альбедо поверхности. Об этом же свидетельствуют оценки вероятности однородности распределений по направлениям СЛ за апрель, май и июнь по данным MODIS и подсвеченной Солнцем ЦМР (см. *puc.* 6, (3)).

Для анализа влияния пространственного разрешения данных и углов визирования были выбраны данные MODIS за декабрь 2003 г., т.е. в пределах двух 16-дневных орбитальных циклов. Пространственное разрешение на материалах MODIS увеличивается с ростом угла визирования от 250 до 550–650 м*. При этом снижаются контрасты объектов, что приводит к уменьшению числа линейных элементов и степени покрытия (*puc.* 7, (1), см. с. 51). С увеличением угла визирования размеры пиксела вдоль строки растут быстрее, чем поперёк, поэтому объекты, расположенные вдоль строк, сохраняют, а расположенные поперёк — те-

^{*} В зависимости от рельефа подстилающей поверхности.

ряют свой контраст и, соответственно, розы вытягиваются вдоль строк (BCB)*. Искажение РГН по материалам MODIS при больших углах визирования связано, скорее всего, с этим эффектом (см. *рис.* 7, верхний ряд — РГН СЛ по данным MODIS). Дополнительное влияние изменения локального времени съёмки от 12:30 до 14:00, проявляющееся по результатам моделирования в увеличении доли СЗ-линейных элементов (см. *рис.* 7, нижний ряд — РГН СЛ по ПСЦМР), не нашло отражения на РГН по материалам MODIS; скорее, можно говорить о противоположной тенденции — снижении доли СЗ-элементов. Розы СЛ по MODIS и подсвеченной Солнцем ЦМР можно соотнести только при малых углах визирования (<15°), когда вероятность однородности распределений по направлениям линейных элементов выше порогового значения (см. *рис.* 7, (3)). При бо́льших углах визирования к доминирующему фактору пространственного разрешения может добавиться влияние индикатрисы и эффекта видности**.



Рис. 7. Характеристики СЛ СВ-участка в зависимости от угла визирования и локального времени съёмки Aqua MODIS в сравнении с результатами моделирования СЛ по подсвеченной Солнцем ЦМР: степень покрытия (1); вероятности однородности распределений направлений линейных элементов (по критерию Колмогорова – Смирнова) (2–3) СЛ, полученных при визировании в надир (09:15 UTC) и при других углах визирования (2); СЛ по материалам MODIS и по подсвеченной Солнцем в соответствии со времени съёмки ЦМР (3). Штихпунктир — пороговое значение вероятности (0,44). Под графиками приведены розы-гистограммы направлений линейных элементов: в верхнем ряду — по данным MODIS, в нижнем — по подсвеченной Солнцем в соответствии со времени съёмки MODIS ЦМР

Выводы

Характеристики СЛ закономерно меняются в зависимости от сезона и времени съёмки в связи с вариациями соотношения света и тени на исследуемой территории. Они зависят также от пространственного разрешения спутниковых изображений.

Для построения схемы линейных элементов территории целесообразно использовать серию сцен MODIS, учитывая 16-дневный цикл изменения углов визирования и времени съёмки. Ежедневный мониторинг схемы линеаментов по материалам MODIS, напротив, нецелесообразен, поскольку может привести к ложным выводам при интерпретации (оценке причин изменения СЛ).

^{*} Кроме того, следует учитывать ухудшение разрешения вследствие увеличения длины линии визирования.

^{**} В горах часть местности при больших углах визирования может быть скрыта от наблюдателя.

Литература

- 1. *Бондур В.Г., Зверев А. Т., Гапонова Е.В., Зима А.Л.* Исследование из космоса предвестниковой цикличности при подготовке землетрясений, проявляющейся в динамике линеаментных систем // Исследование Земли из космоса. 2012. № 1. С. 3–20.
- 2. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А.А. Количественная оценка перспектив нефтегазоносности территорий на основе комплексной обработки материалов космических и геофизических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 9. № 5. С. 349–355.
- 3. Космогеология СССР / под ред. В. Н. Брюханова. М.: Недра, 1987. 240 с.
- 4. *Трифонов В. Г., Макаров В. И., Кожухин А. И., Скобелев С. Ф., Шульц С. С. (мл.)*, Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М.: Наука, 1988. 133 с.
- Rahnama M., Gloaguen R. (2014a) TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction // Remote Sensing. 2014. No. 6. P. 5938–5958.
- Rahnama M., Gloaguen R. (2014b) TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 2: Line Segment Linking and Merging // Remote Sensing. 2014. No. 6. P. 11468–11493.
- Zlatopolsky A.A. Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis — experimental results // Computers and Geoscience. 1992. V. 18. No. 9. P. 1121–1126.

Lineament analysis of MODIS data and its results interpretation capabilities

S.G. Kritsuk, I.Sh. Latypov

Scientific Research Centre for Ecology Safety RAS, Saint Petersburg 194110, Russia E-mails: sit.bloom@gmail.com, liscander@mail.ru

The temporal instability of the MODIS data textural characteristics and their dependence on the survey conditions are shown, using the lineament analysis example of the satellite images of Shahdad desert in southern Iran. This dependence was predetermined by the characteristics of the EOS system and MODIS instrument: a sixteen-day cycle of variations in viewing angles and imaging time, a band-shaped data structure with a complicated varying spatial resolution. The lineaments directions distribution of the MODIS satellite image turned out to be sensitive to the position of the Sun and may vary significantly during 1.5–2 hours, and also differ for images received by Terra and Aqua on the same day. Moreover, the properties of the lineaments directions distribution depend on the viewing geometry and/or spatial resolution of the data, and therefore will be different for the MODIS data acquired during two adjacent dates. The distribution of lineaments directions shows some instability, even in close imaging condition: Sun's position and sight geometry. Perhaps this is due to the atmosphere properties affecting the point spread function and thus spatial data resolution. Thus, MODIS data do not provide the possibility of daily obtaining a sustainable distribution of lineaments and are of limited use in territory monitoring.

Keywords: lineament analysis, MODIS, satellite monitoring

Accepted: 21.05.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-45-53

References

1. Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E.V., Zima A.L., Issledovanie iz kosmosa predvestnikovoi tsiklichnosti pri podgotovke zemletryasenii, proyavlyayushcheisya v dinamike lineamentnykh sistem (A study from the cosmos of predictive cyclicity in preparation of earthquakes, manifested in the dynamics of lineament systems), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 1, pp. 3–20.

- 2. Gornyi V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Kolichestvennaya otsenka perspektivnykh neftegazonosnykh zon na osnove kompleksnoi obrabotki materialov kosmicheskikh i geofizicheskikh s"emok (A quantitative assessment of the prospects for the oil and gas potential areas based on the complex processing of materials of space and geophysical surveys), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 9, No. 5, pp. 349–3553.
- 3. Kosmogeologiya SSSR (Cosmogeology of the USSR), V. N. Bryukhanov (ed.), Moscow: Nedra, 1987, 240 p.
- 4. Trifonov V. G., Makarov V. I., Kozhukhin A. I., Skobelev S. F., Shults S. S. (jun.), *Aerokosmicheskoe izuchenie seismoopasnykh zon* (Aerospace study of seismic-dangerous zones), Moscow: Nauka, 1988, 133 p.
- 5. Rahnama M., Gloaguen R. (2014a), TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction, *Remote Sensing*, 2014, No. 6, pp. 5938–5958.
- 6. Rahnama M., Gloaguen R. (2014b), TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 2: Line Segment Linking and Merging, *Remote Sensing*, 2014, No. 6, pp. 11468–114935.
- Zlatopolsky A.A., Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis — experimental results, *Computers and Geoscience*, 1992, Vol. 18, No. 9, pp. 1121–1126.