

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (ПРОГРАММА «LESSA»)

А.А. Златопольский¹, Б.В. Малкин²

¹Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: zlatopolsky@mtu-net.ru ;

²ФГУНПП «Аэрогеофизика»,
117851 Москва, Н. Красносельская 4
E-mail: malkin@aerogeophysics.com

Работа посвящена анализу дистанционных данных на основе их рисунка. Рассчитываются и изучаются ориентационные характеристики рисунка - где и какие ориентации ярко выражены, какие еще ориентации присутствуют и т. п. Результаты расчета представляются для интерактивного (автоматического) анализа картами этих характеристик, схемами, розами-диаграммами, что позволяет исследователю, обнаруживать аномальные зоны, существенно отличающиеся от окружения. Второе направление анализа - поиск в изображении длинных линий, которые могут состоять из разрозненных коротких черточек (штрихов). Исследовался участок юго-западной Африки по снимку системы MODIS, где нас интересовали структуры на суше, фиксируемые геофизическими методами на шельфе. Одна из зон установленных на шельфе имеет продолжение на суше, где отчетливо проявляется в LESSA как в линеаентах, так и в ориентационных характеристиках. Активность этой, ранее не выделявшейся, разломной зоны в меловое время, вероятно, свидетельствует о том, что она могла контролировать магматические проявления кимберлитового типа.

Введение

Доступность качественных изображений Земли позволила широко использовать их в различных областях и автоматизировать анализ этих изображений. В большинстве случаев автоматизирован поиск областей и структур непосредственно по яркости (цвету) и контрасту. В данной работе рассмотрим анализ рисунка (текстуры) изображения, а точнее, ориентационных свойств рисунка – где и какие ориентации ярко выражены или же отсутствуют, на сколько эти ориентации доминируют, присутствуют ли ортогональные направления и т.п. По результатам такого анализа специалист может обнаружить особенности структуры территории, которые не видны или плохо видны на снимке непосредственно.

В наибольшей степени предложенный подход схож с традиционным в геологии анализом фотолинеаментов, при котором эксперт выявляет прямолинейные фрагменты рисунка, связанные с тектоникой, и затем либо статистически анализирует распределение этих мелких линеаментов по направлению в скользящем окне, либо выявляет протяженные линеаменты. Существуют программы в разной степени автоматизирующие анализ линеаментов нарисованных вручную (например, статистический анализ в пакетах TNTmips и ER Mapper; прослеживание протяженных линеаментов в [1])

Предлагается другой подход – непосредственно анализировать рисунок, автоматически выявлять его ориентационные характеристики, отказавшись от попыток следования правилам геологического визуального дешифрирования, предоставить специалисту возможность работать не с исходным изображением, а с результатами достоверных, повторяемых, параметризованных измерений. Эту методику мы разрабатываем 20 лет [2] для исходных данных разного типа: изображения (включая радиолокационные, тепловые), цифровые модели рельефа и линейные схемы. Методика названа LESSA (Lineament Etraction and Stripe Statistical Analysis) и от привычного линеаментного анализа существенно отличается как принципом выявления исходных линейных элементов, так и способы их анализа.

Отметим, что за последние годы предлагались многочисленные способы измерения ориентационных характеристик использующие и специальные математические преобразования, и специальную оптику. Возможно, вполне уместны и близки по результату разные подходы (некоторые сопоставления показаны в [3]), однако, для практического использования, в первую очередь, важна методическая проработка. Необходимо представлять, что именно измеряется, каковы погрешности и артефакты и т.п., но таких данных о других методах не представлено.

В первом разделе – кратко опишем операции предлагаемого метода (подробности есть в [4]). Во втором разделе рассмотрим, как именно анализируются результаты LESSA, как ищутся особенности рисунка, аномальные области и структуры, и дается практическая интерпретация этих результатов. Конкретно, нас интересовали протяжённые, влияющие на алмазность, структуры юго-западной Африки, которые имеют продолжение на шельфе, где они фиксируются геофизическими методами.

Методика демонстрируется на примере изображения юго-западной Африки, рис. 1, которое включает территории Анголы, Замбии, Намибии и Ботсваны. Это изображение получено системой MODIS (6 сентября 2004г, 9ч10мин, от 11гр45мин в.д. до 29гр05мин в.д. и от 8гр20мин ю.ш. до 28гр05мин ю.ш.) и приведено в цилиндрическую проекцию в SMIS. Часть изображения - море, облака, пустое место - не участвует в расчете (замаскирована). Исходное разрешение изображения - 250 м/пиксель, но использовалось разное разрешение вплоть до 4500м/пиксель.

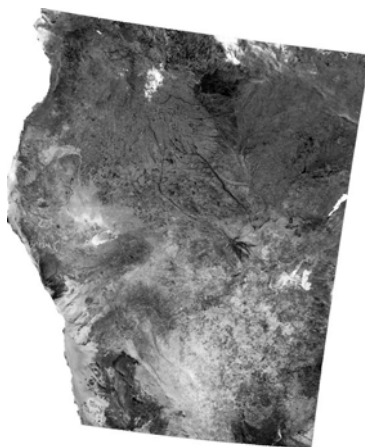


Рис. 1. Изображения юго-западной Африки, 2ой канал системы MODIS.

Принципы анализа рисунка в LESSA

Основа предлагаемого метода – линейные элементы изображения, которые выявляются автоматически (будем называть их - штрихами). В полутоновом изображении штрихи - это границы мелких однородных областей, в цифровых моделях рельефа – это оси долин и хребтов, а в схемах (например, гидросеть) – это сами линии схемы. На рис. 2а показан фрагмент изображения, а на рис. 2б - выявленные в нем штрихи.

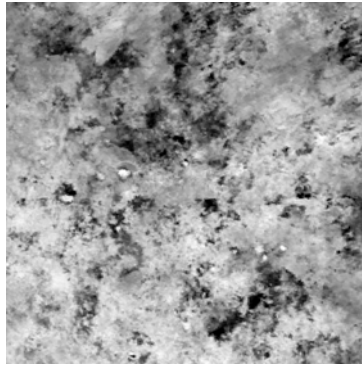
Для анализа полученных штрихов использовано два различных подхода: статистический анализ и построение протяженных линеаментов. Наиболее разработанный и объективный способ анализа - статистический. В этом случае, оценивается расположение штрихов каждого направления на изучаемой площади (в скользящем окне). Соотношение штрихов разного направления (их плотность, а точнее, их суммарная длина) отображается розой-диаграммой, которая, собственно, и отражает ориентационные характеристики рисунка (текстуры) в данной окрестности (рис. 2с). По результатам этих измерений строятся псевдоцветные изображения (“поля”), которые показывают распределение по изображению как штрихов различного направления (плотности), так и характеристик роз-диаграмм таких, как вытянутость, крестообразность, отличие от окружающих и др. (рис. 2д).

Результаты статистического анализа штрихов представляются и в графическом виде: розы-диаграммы, вектора максимального направления, вектора, которые указывают направление и степень вытянутости роз-диаграмм (рис. 2е) и др. Исходя из векторов вытянутости, строятся линии вытянутости (рис. 2ф), наглядно представляющие локальную направленность текстуры и изменение этой направленности.

На примере линий вытянутости рассмотрим возможность многократного анализа изображения в LESSA - многоуровневого и повторного анализа. Многоуровневый анализ – это возможность провести полный анализ изображения, для штрихов разного масштаба (разного разрешения, разной степени генерализации). Структуры видны при соответствующей генерализации. На рис. 3 представлены линии вытянутости рассчитанные в одинаковых окнах (их диаметр на местности 128км), но со штрихами разного уровня. Во втором случае выявлялись штрихи гораздо более мелкого масштаба (грубее в 8 раз). Мы видим и области полного совпадения ориентации текстур разного уровня, и зоны их ортогонального отличия. В данном случае различия связаны, в первую очередь, с большим отражением рисунка гидросети в штрихах мелкого масштаба.

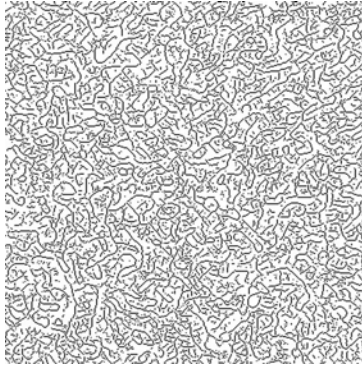
Повторный анализ – это анализ в LESSA полей рассчитанных характеристик, которые заменяют исходное изображение. На рис. 4а показано поле плотности восток-северо-восточного направления, которое было сжато в 18 раз и проанализировано в LESSA, как исходное изображение. На рис. 4б показаны полученные таким образом «вторичные» линии вытянутости. Сравнив их с линиями вытянутости, рассчитанными для исходного снимка того же масштаба (рис. 4с), видим, что «вторичные» линии вытянутости подчеркивают структуры близкие по направлению к восток-северо-восток и ортогональные к нему.

a)



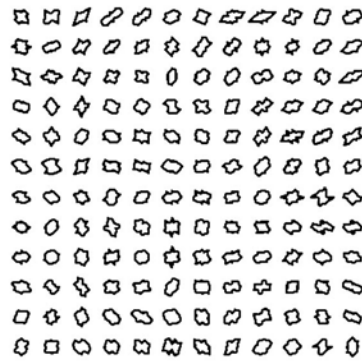
а - фрагмент изображения, 1221*1221;

b)



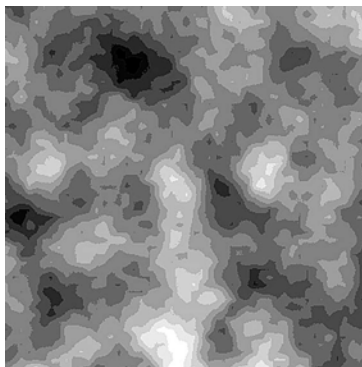
б – штрихи в этом фрагменте изображения;

с)



с – розы-диаграммы, рассчитанные по штрихам, окно 64;

d)



д – плотность (суммарная длина) штрихов;



Рис. 2. Пример некоторых ориентационных характеристик текстуры

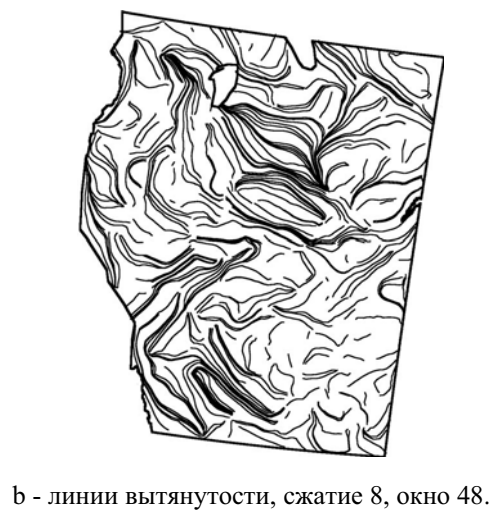


Рис. 3. Многоуровневый анализ



а – плотность штрихов, восток-северо-восточного направления, сжатие 1, окно 64;



б – линии вытянутости по плотности, сжатие 18, окно 64 ;



с - линии вытянутости по исходному изображению, сжатие 18, окно 64.

Рис. 4. Повторный анализ

Принципиально иной подход к анализу штрихов связан с построением протяженных линеаментов. Штрихи объединяются в линии, причем в линии могут быть разрывы, но она должна быть прямой и достаточно длинной. Можно просматривать полученные таким образом линии, задавая интересующее направление, минимальную длину линии и степень ее выраженности (насколько она заполнена штрихами). Найденные линии служат подсказкой для исследователя, показывают возможное расположение линеаментов, а также то, из каких частей (штрихов) они складываются. Пример самых выраженных линий северо-восточного направления пересекающих все изображение представлен на рис. 5.

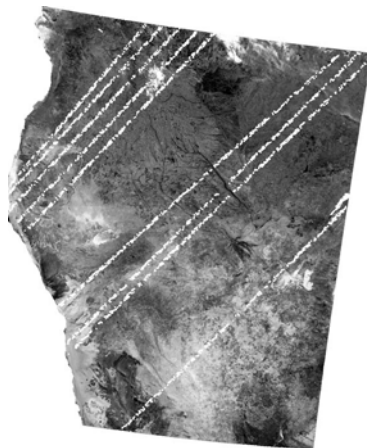


Рис. 5. Наиболее выраженные сквозные линеаменты северо-восточного направления, сжатие 6.

Результаты анализа изображения, полученные в LESSA, могут использоваться для того, чтобы подтвердить, уточнить гипотезы о структуре территории, скорректировать, экстраполировать их, но главное, они показывают аномальные области и линии, которые могут служить подсказкой, "зародышем" новой гипотезы - именно это нас и будет интересовать в первую очередь.

Далее рассмотрим основные способы анализа результатов LESSA, которые сложились в результате многолетнего применения. Хотя здесь мы не будем рассматривать методы автоматического анализа в ГИС и узкоспециальные приемы, которые можно найти в конкретных исследованиях (такие, например, как изучение распределения по территории фотолинеаментов рудоконтролирующего направления, анализ структуры линеаментной зоны и т.п. [3]).

Поиск аномалий

Перейдем к тому, как "читать" результаты LESSA, как искать аномальные участки территории. Вначале отметим, какие именно аномалии можно обнаружить, а затем рассмотрим сочетание разных результатов LESSA между собой и с другими данными.

Начнем с аномалий в полях характеристик. Область изображения может выделяться явно аномальными значениями какой-то из характеристик розы-диаграммы или плотности штрихов. В качестве примера, на рис. 6 показана плотность штрихов восточного (субширотного) направления, в которой отчетливо видна зона повышенной плотности на востоке и в центре анализируемого региона. Можно связать эту область с экзогенными, вероятно ветровыми, структурами осадочного покрова Калахари.



Рис. 6. Плотность штрихов субширотного направления, окно 384.

Следующий тип аномалии - это аномальность формы. В первую очередь должны привлечь внимание длинные прямолинейные зоны экстремумов и градиентов, которые не могут быть обусловлены процессом расчета, так как все окна расчета – круглые. Часто аномалии лучше отражаются в графических характеристиках, скажем, в линиях вытянутости. Например, это могут быть компактные области линий одного направления, а могут быть и линейные «зоны обрыва» линий. Последняя ситуация может означать, что в этой области рисунка кроме основного направления появляется явно выраженное ортогональное направление вдоль зоны обрыва. Рассмотрим рис. 7, в котором можно легко видеть следующие особенности (сверху вниз): (а) прямая зона обрыва пучка (блока) линий северо-северо-западного направления; (б) два соосных

пучка линий северо-восточного направления; (в) два блока линий (субширотного направления на востоке и северо-западного на западе) с очевидной вертикальной границей между ними.

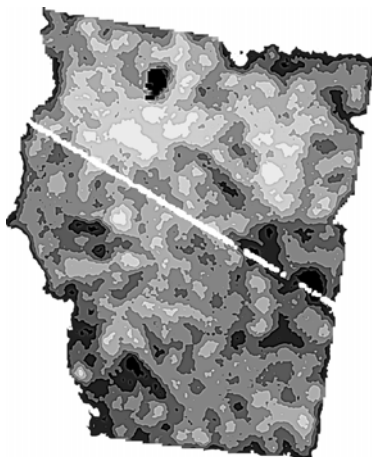


Рис. 7. Наиболее выраженный линеамент запад-северо-западного направления и поле плотности штрихов, сжатие 6.

Перейдем теперь к аномалиям в линеаментах. Основная характеристика линеаментов, полученных в LESSA, - это их выраженность (т.е. подтвержденность линеамента штрихами). Абсолютное значение этой величины не важно, а важно, есть ли линеаменты, у которых эта величина существенно больше, чем у других линеаментов данного направления, в данном изображении и при данных параметрах расчета. Другая важная особенность получаемых линеаментов - их плановое расположение, группировка: образование пучков, зон, узлов пересечения. На рис. 5 линеаменты образуют две явно выраженные полосы.

Мы рассмотрели основные аномальные образования, которые можно обнаружить в результатах LESSA. Но очень существенно сопоставить независимые результаты, как полученные в LESSA так и, что особенно важно, полученных из других источников. В частности, независимы между собой линеаменты, полученные в LESSA, и такие особенности, найденные при статистическом анализе, как полоса экстремумов (иного направления), градиентная зона, зона обрыва линий вытянутости и т.п. Для подтверждения линеаментных полос, приведенных на рис. 5, важно то, что они четко ложатся в рисунок линий вытянутости на рис. 4b. Особенно четко северная полоса очерчена зоной обрыва.

В качестве внешних данных возьмем схему линеаментов, полученных по геомагнитным данным [5]. Почти все указанные там линеаменты подтверждаются в линеаментах LESSA, а линеамент Kalahari хорошо виден в полях: (в центре снимка он совпадает с вертикальной границей области пониженной плотности, а на юге совпадает с вертикальной границей между областями с различной ориентацией). Отметим, что все три полосы линеаментов северо-восточного направления, показанных на рис. 5, лежат на континентальном продолжении трансформных разломов и соответствуют известным геологическим структурам. Так северная полоса совпадает с линеаментной зоной Лукара, в которой много карбонатитовых массивов и кимберлитовых трубок, часть которых алмазоносна. Средняя полоса линеаментов совпадает с зоной Omaputu, которая контролирует проявления щелочного магматизма, в том числе карбонатитовые интрузии. А южный линеамент совпадает с Trans Southern African Lineament Zone.

Такое уверенное подтверждение методами LESSA хорошо известных структур позволяет предположить и возможность обнаружения крупных и неизвестных ранее линейных тектонических зон подобного строения, но иных направлений, в частности, запад-северо-западного простирания. Для района южной Анголы это особенно существенно, так как регулярные геологические исследования не велись здесь более 30 лет. Наиболее выраженная протяженная линеаментная зона этого направления, подтвержденная также и в полях (рис. 7), продолжает на суше разломную зону, установленную на шельфе по альтиметрическим данным [6].

Будем называть эту зону Санта-Мария по имени мыса, в пределах которого она начинается на суше. Учитывая, что простирание зоны Санта Мария составляет около 60 градусов к направлению зоны Лукара, а простирание зоны Лукара большинство исследователей связывает с направлением относительного движения Африки и Южной Америки на период начала раскрытия Южной Атлантики, можно предположить, что зона Санта Мария входила в систему крупных сопряженных зон сдвигового течения, локализовавших деформации растяжения на раннем этапе заложения Южной Атлантики. В этом качестве зона Санта Мария была особенно активна в меловое время, имела большую глубину заложения и могла в пределах кратона Конго контролировать магматические проявления кимберлитового типа, ныне перекрытые маломощным осадочным чехлом Калахари, что расширяет перспективы алмазоносности юго-восточной Анголы, полосы Капиви и северо-восточной части Ботсваны.

Литература

1. *Koike K., Nagano S., Ohmi M.* Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm (STA) // *Computers & Geosciences*, 1995, v. 21, № 9. P. 1091-1104.
2. *Федоров Е.Е., Златопольский А.А., Малкин Б.В.* Применение автоматизированного линейментного анализа при прогнозе проявлений аметиста (Кольский полуостров) // *Разведка и охрана недр*, 1985, № 8. с. 29-31.
3. Цифровая обработка видеоинформации при структурно-геологических и сейсмоструктурных исследованиях // Ленинград: ВСЕГЕИ (Всесоюзный геологический институт), 1991. 137с.
4. *Zlatopolsky A.* Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). Automated linear image features analysis - experimental results // *Computers & Geosciences*, 1992. v. 18, № 9. p. 1121-1126.
5. *Corner B.* Geophysical mapping of major structures of southern Africa and an assessment of kimberlite correlation // 8th international kimberlite conference, Victoria, BC, Canada. 2003.
6. *Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Разломы Ангольской котловины // *Российский журнал наук о Земле*. 1999. Т. 1. № 3. с 17-48.