

УДК 528.873

ПРОГРАММА LEFA: АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ В СРЕДЕ MATLAB^{1,2}Шевырёв С.Л.¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru;²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Структурный анализ космических изображений применяется для постановки региональных геологических работ на доступной пользователям фактологической основе. Однако отмечается недостаток программного обеспечения автоматизированного анализа с открытым исходным кодом для реализации исследовательских и образовательных проектов. С целью восполнения указанного пробела предлагается программа LEFA (Lineament Extraction and Fracture Analysis), выполняемая в среде Matlab и располагающая возможностями линейментного анализа и дешифрирования тектонических разломов, нахождения фрактальной размерности изображения, расчета плотности фрактур и вывода векторных и растровых данных в форматах с геопривязкой. В настоящей обзорной статье рассматриваются интерфейс программы, особенности ее работы, лежащий в основе методический аппарат и порядок обработки данных применительно к разрывной тектонике юга Сихотэ-Алинского складчатого пояса (Дальний Восток России). Территория исследований включает полигенетический коллаж террейнов, интродуцированных магматическими комплексами мезокайнозой и несогласно перекрытый вулканогенно-осадочным чехлом. Среди разрывных нарушений выделяются глубинные разломы, отмеченные зонами меланжа, левосторонние сдвиги северо-восточного простирания, пологие надвиги в северо-западном направлении, структуры содвигового сжатия и растяжения, а также кольцевые фрактур, соответствующие вулканотектоническим поднятиям и кальдерам. Тектоно-магматические комплексы пояса ассоциированы с многочисленными рудными и благороднометалльными месторождениями и проявлениями. Ввиду того, что территория Сихотэ-Алиния представляет собой труднопроходимую горную страну, с таежной растительностью и мощным элювиально-почвенным слоем, планирование региональных поисково-оценочных работ производится при использовании результатов дешифрирования космических изображений, позволяющих сосредоточить полевые работы на наиболее перспективных участках. Рассматривается соотнесение выделенных в результате работы программы элементов изображения, а также карты их плотности с известными геологическими структурами Сихотэ-Алинского складчатого пояса.

Ключевые слова: Matlab, линейменты, фрактальная размерность, дистанционное зондирование

LEFA SOFTWARE: AN AUTOMATIZED STRUCTURAL ANALYSIS OF REMOTE SENSING IMAGERY IN MATLAB ENVIRONMENT^{1,2}Shevirev S.L.¹Far East Geological institute, FEB RAS, Vladivostok, e-mail: shevirev@mail.ru;²Far Eastern Federal University, FEFU, Vladivostok

Structural analysis of space images is used as the base foundation for organizing regional geological search and prospecting works on affordable factual base. However, there is a lacking of open source software for research and educational applications. In order to fill this gap LEFA (Lineament Extraction and Fracture Analysis) software has been offered. This software runs in Matlab environment and has the algorithms for lineament analysis and fault detecting, calculation of fractal dimension, fracture density and output of both vector and raster data in georeferenced formats. Given paper describes software interface, its features, methodologies to be used and approach to data analysis of fracture tectonics of Sikhote-Alin folded belt south (Russian Far East). Research area includes polygenic terrane collage intruded by Meso-Cenozoic complexes, unconformable overlapped by volcanic-sedimentary cover. There are deep-seated faults traced by mélange zones, sinistral strike-slip faults of north-eastern strike, gentle-sloped thrust in north-western direction, near-slip structures of contraction and tension as well as ring fractures of magmatic uplifts and calderas. Tectonomagmatic complexes are associated with the numerous ore and precious metals deposits and manifestations. In view of low passability of Sikhote-Alin due to its taiga forestation and thick soil layer, planning of regional search and prospecting works is supported by results of space image analysis. It makes possible to concentrate filed surveying on the most prospective areas. Correlation between automatically detected image elements and their density map with known Sikhote-Alin folded belt structures is also considered.

Keywords: Matlab, lineaments, fractal dimension, remote sensing

Современные успехи в технологиях компьютерного распознавания образов сделали возможным независимое от человеческого восприятия определение объектов изображений, полученных с пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов и спутников. Однако реализация таких алгоритмов с учетом специфики научных и учебных

(студенческих и аспирантских) проектов представляет собой нетривиальную задачу. Имеющееся программное обеспечение зачастую проприетарно, как, например, WinLessa [1]. Закрытость исходного кода существенно осложняет интерпретацию результатов. Приложения, написанные и исполняемые в среде Matlab, используют бога-

тый набор ее библиотек и их документации, а исходный код доступен для ознакомления и изменения.

Программа LEFA содержит набор функций, позволяющих выявлять линейные элементы растровых изображений, как непривязанных, так и имеющих картографическую привязку (поддерживаются ЦМР SRTM, а также изображения Landsat 5-8); рассчитывать характеристики пространственного распределения линейных элементов, плотность и фрактальную размерность Минковского с экспортом результатов; объединять выделенные линейные элементы в линеаменты («разломы») на основе коллинеарности и пространственной близости; создавать розы-диаграммы направлений для линейных элементов; экспортировать распознанные линейные элементы в векторный формат ESRI Shape (shp).

Перечисленные выше возможности позволяют рассматривать программу LEFA как средство структурного анализа дистанционных изображений в среде Matlab полного цикла. Системные требования для работы программы включают компьютер с минимальной оперативной памятью 1 Гб, поддерживающий программное обеспечение Matlab с модулями Statistics toolbox, Mapping toolbox и Image Processing Toolbox.

Цель исследования: рассмотрение методики дешифрирования разрывных структур космического изображения Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) в программном обеспечении LEFA, работающем в среде Matlab с сопоставлением результатов экспресс-дешифрирования и графического вывода программы с положением действительных геологических объектов – разрывных структур Сихотэ-Алинского горно-складчатого пояса.

Материалы и методы исследования

Характер выявленных программой структурных элементов и их соответствие тектоническим структурам определяется видом использованных космических изображений, их пространственным разрешением и применяемыми методиками распознавания. В программе LEFA нами используется методика исследования, апробированная ранее [2] и включающая предварительную обработку изображения, алгоритмы детектирования контуров, выделения линейных элементов, учета количества линейных элементов, объединения коллинеарных линейных элементов в линеаменты; нахождения фрактальной размерности контуров изобра-

жения, экспорта картографических растров (geotiff) и линейных элементов (shp).

Организация пользовательского интерфейса. Использование возможностей графического интерфейса Matlab, реализованная в LEFA, избавляет от необходимости, хотя и не исключает работу пользователя непосредственно с исходным кодом программы. Для выполнения анализа в программе предусмотрены специализированные функциональные области (рис. 1).

В начале работы с программой изображение необходимо открыть в режиме «только для чтения», для чего воспользоваться областью файловых операций (1). Программа может работать как с растровыми изображениями в общеупотребительных форматах (png, bmp, tiff, jpg), так и с изображениями с геопривязкой (geotiff).

Затем изображение нужно предварительно обработать (область (3)). Предварительная обработка необходима не только для детектирования границ для дальнейшего распознавания объектов, но и для подстройки и визуальной оценки изображения, так как изображение может быть изначально излишне светлым или темным. Для этой цели в области предварительной обработки необходимо выбрать Adjust («Подстроить») и нажать кнопку Apply («Применить»). Действие этого и других фильтров предварительной обработки, выбираемых здесь из разворачивающегося списка, может быть отменено нажатием на кнопку Revert («К исходному состоянию»). Детектирование линейных элементов чувствительно к разрешению изображения в зависимости от длины выделяемых линий. Для выделения более крупных объектов и ускорения работы программы имеет смысл уменьшить размер изображения кратно коэффициенту ресемплирования (поле «Resample»). Например, для уменьшения разрешения изображения в 10 раз надо выбрать коэффициент 0,1.

Последовательность применяемых фильтров предварительной обработки определяется аналитиком самостоятельно, исходя из целей исследования и природы детектируемых линейных элементов. Как правило, элементарные линейные элементы как тектонической, так и нетектонической природы (небольшие разломы, региональная трещиноватость и т.д.) дешифрируются в изображении как области контрастного фототона, тальвеги овражно-балочной сети, русла рек на стадии врезания, спрямленные участки долин и т.д.

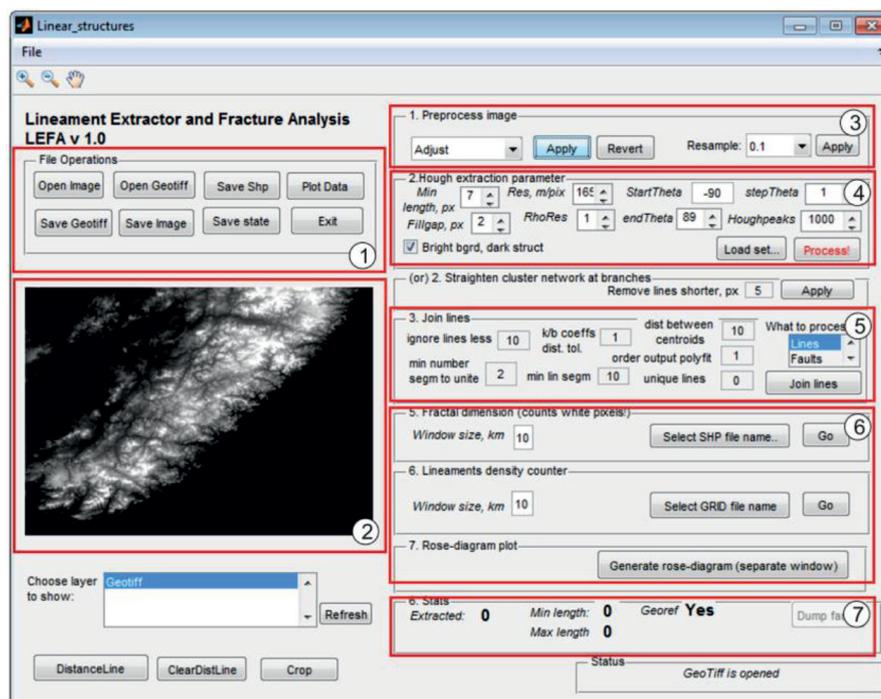


Рис. 1. Оконный интерфейс программы LEFA. Функциональные области: 1 – файловых операций; 2 – окно просмотра изображения; 3 – предварительной обработки (фильтрации изображения); 4 – анализа линейных элементов по методу Хафа; 5 – объединения выделенных элементарных линейных элементов в «линеаменты»; 6 – области создания аналитических изображений: полигонального покрытия с значениями фрактальной размерности Минковского, растровой карты плотности линейных элементов и розы-диаграммы направлений линейных элементов; 7 – статистика распознанных элементов

Программа LEFA располагает несколькими алгоритмами детектирования границ, однако для исследования эрозионной сети наиболее применим метод Саппу [3]. Трещины различного происхождения выражаются как линейные объекты границы. Для их поиска к предварительно обработанному бинарному изображению с детектированными границами применяется преобразование Хафа [4], параметры которого задаются в функциональной области (4) (рис. 1). К числу таких параметров относятся: минимальная длина детектируемых линий (в пикселях), максимальный допуск разрыва в пикселях для конкретной линии, дискретизация значений координат Хафа (ρ и θ), количество пиков Хафа («houghpeaks»). Альтернативным способом детектирования линейных элементов в программе является разбивка и спрямление элементов (кластеров) границ изображения.

Основанием для объединения линейных элементов в линеаменты (предположительно, крупные тектонические единицы), является их коллинеарность, т.е. совместное на-

хождение на некоторой прямой. Алгоритм «коллинеарность» применяется к линейным элементам длиной более нескольких пикселей и контролируется следующими параметрами: максимальная разница k/b (отношение углового коэффициента уравнения сравниваемых линий к свободному члену), максимальное расстояние между центральными точками сравниваемых линий, минимальное количество линий, необходимое для объединения в линеаменты, порядок полинома линии, получаемой в результате. Эти параметры задаются в функциональной области объединения линий (5) программы (рис. 1).

Изображение, прошедшее предварительную обработку, а также выделенные линии могут быть сохранены с помощью кнопок «Save Geotiff» (сохранить изображение с геопривязкой) и «Save SHP» (сохранить векторные данные в формате ESRI Shape).

Помимо распознавания элементарных линейных элементов и линеаментов в программе возможно построение аналитических изображений с геопривязкой. Програм-

ма рассчитывает фрактальную размерность Минковского для изображения границ и выводит массив векторных квадратов в SHP-формат. Для применения этого метода при оценке минерально-сырьевого потенциала территории ранее получено свидетельство интеллектуальной собственности [5]. Оценка площадного распределения линейных элементов определяется картой плотности (км/км²), для построения которой необходимо дешифровать линейные элементы и указать длину стороны окна осреднения в километрах с учетом пространственного разрешения изображения, заданного или определенного автоматически в функциональной области анализа линейных элементов по методу Хафа (4).

Сравнение программы с имеющимися аналогами. В настоящее время для широкого круга пользователей доступно специализированное программное обеспечение российских или зарубежных разработчиков, среди которого выделяются наиболее длительно развиваемые авторами и доступные проекты LESSA [1] и FracPaq [6]. Сравнительные характеристики этих программ и LEFA приведены в таблице.

Результаты исследования и их обсуждение

Для юго-востока России изучение разрывной тектоники имеет сейсмологическое, минерагеническое и инженерно-геологическое значения. Под первым подразумевается ответственность структур глубокого заложения за новейшую и современную сейсмичность; второе включает связь разрывных структур и флюидопроводящих зон коры и мантии; третье означает связь разрывных структур с коровыми напряжениями, не обязательно выражающимися в сейсмичности, но наводящимися на сооружения повышенной ответственности: фундаменты, подземные горные выработки и магистральные трубопроводы. Количественный учёт линейных элементов изображения и трещиноватости может служить основой для экспресс-анализа территории и выявления скрытой и мало выраженной зональностей.

В качестве территории исследований используется часть Сихотэ-Алинского супертеррейна (САТ) в пределах юга Приморского края (рис. 2). В составе этой структуры, значительную часть которой занимают террейны Сихотэ-Алинского горно-складчато-

Сопоставление характеристик LEFA и ближайших аналогов

Название	LEFA	FracPaq	LESSA
Бесплатная	Да	Да	Нет
Платформа	Matlab	Matlab	Windows
Открытый код	Да	Да	Нет
Выделение полилиний	Да	Нет	Нет
Расчёт плотности линий	Да	Да	Да
Экспорт в формате ESRI Shape	Да	Нет	Да
Дополнительные функции	Расчет фрактальной размерности	Вейвлет анализ	Нет

Привлекательностью программ, работающих в среде Matlab, обуславливается возможностью анализа исходного кода, их кроссплатформенность и бесплатность (однако необходимо приобретение Matlab). Это преимущество также обеспечивает применение программ, написанных на Matlab в учебном процессе, а также их портирование в другие языки программирования и операционные системы.

Для изучения дистанционной основы важнейшим свойством является экспорт данных в форматах, поддерживающих геопривязку – Shape и Geotiff. Не обладающая такой функцией, программа FracPaq ограничивает своё применение изучением фотографий обнажений горных пород.

го пояса, выделяются разрывные нарушения различного масштаба и глубины заложения. Установлены: главные разрывы (первого порядка) северо-восточного простирания, соответствующие левосторонним сдвиго-надвигам; системы субпараллельных левых сдвигов второго порядка; ортогональные сдвиго-раздвиговые структуры; нормальные раздвиговые зоны северо-западного простирания. Системы разрывов первого порядка и северо-восточного простирания соответствуют главным разломам, известным в регионе: Алчанскому, Уссурийскому, Шкотовскому, Центральному Сихотэ-Алинскому, Фурмановскому, Арсеньевскому, Колумбинскому, Прибрежному и другим [7]. Основными магмо- и флюидопроводящими для Сихотэ-Алинского пояса являются

структуры второго порядка: нормальные зоны раздвига и ортогональные сдвигораздвиговые зоны. Пластины террейнов надвинуты в северо-западном направлении, прорваны интрузиями и перекрыты вулканогенно-осадочными образованиями. Территория располагает потенциалом коренных золотосеребряных месторождений,

постмагматического, скарнового и вулканогенно-гидротермального генезиса. Рудные объекты Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса отличаются небольшими размерами, и необходимость их обнаружения требует значительных усилий для поисковых работ, а значит, и учёта всех прогнозных предпосылок.

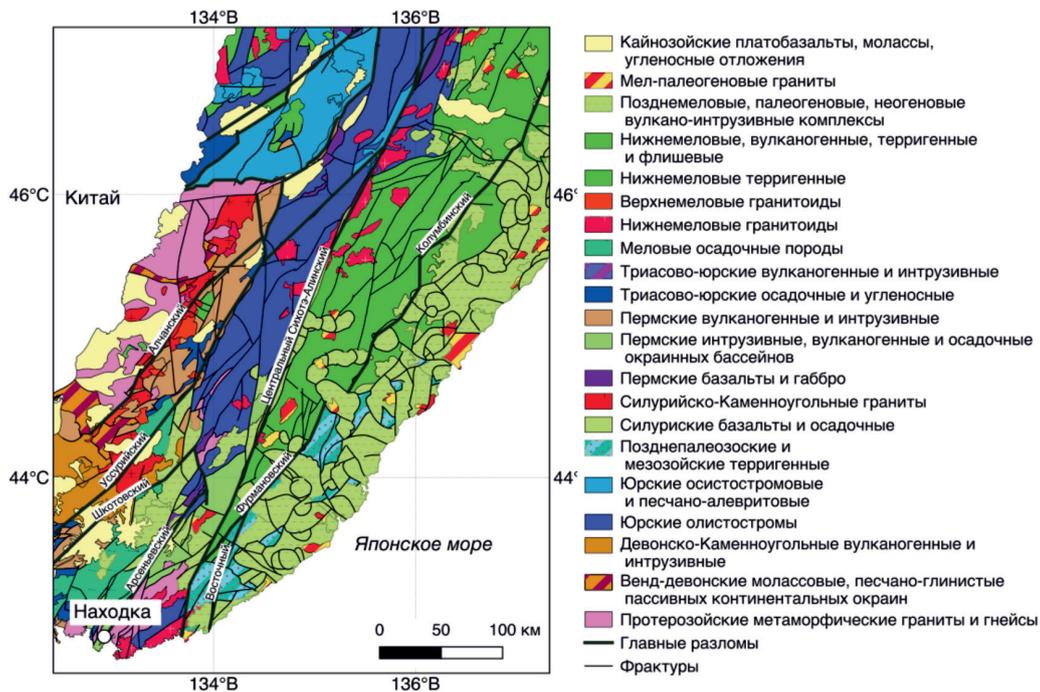


Рис. 2. Схема геологического строения участка Сихотэ-Алинского супертеррейна

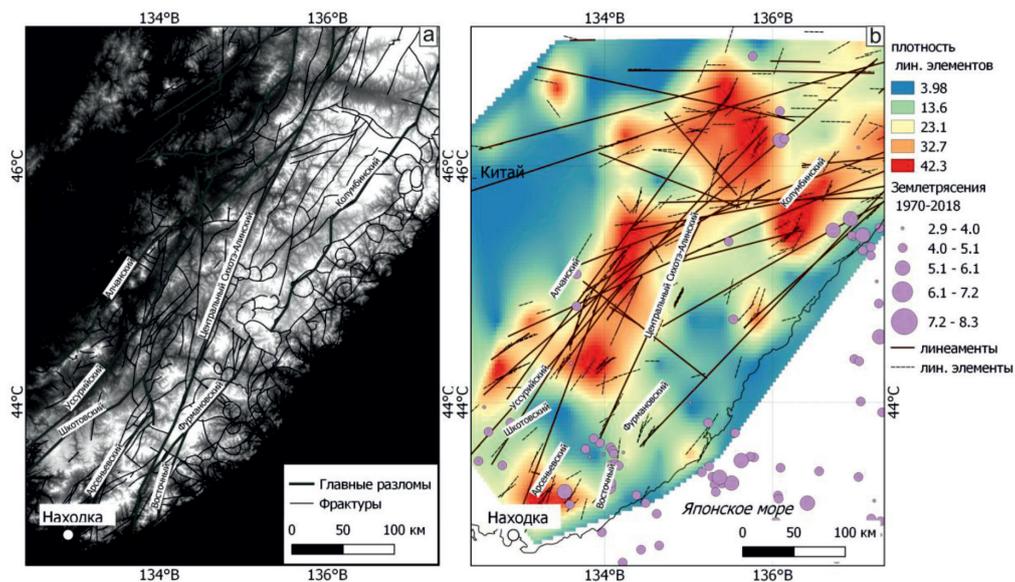


Рис. 3. а) Исходные данные SRTM для экспресс-дешифрирования территории САТ в пределах Приморского края (ресемплирование 0.1); б) Результат автоматизированной обработки данных SRTM в программе LEFA

Тестовый набор данных содержит цифровую модель рельефа SRTM для юга Приморского края (рис. 3, а), который был автоматически дешифрован с помощью LEFA с дальнейшей компоновкой вывода программы в QGIS (рис. 3, б).

Сопоставление левой и правой частей изображения показывает, что главные разломы САТ, включая границы разновозрастных комплексов, в основном распознаны. Рисунок дешифрованных линейных элементов носит несколько спрямленный характер, однако может быть использован для экспресс-анализа территории. Интенсивность развития коровой трещиноватости может быть оценена с помощью анализа плотности линейных элементов (км/км²).

Заключение

В рамках настоящего исследования проведен анализ методики автоматизированной обработки дистанционных изображений в программном обеспечении LEFA. Рассмотрены основы методического аппарата, включающего предварительную обработку, поиск границ на изображении, дешифрирование элементарных линейных элементов поиском спрямленных границ и их объединение в линейные элементы предположительно тектонической природы – «линементы». Для дистанционных данных юга Приморского края показана эффективность предлагаемого програм-

многo обеспечения для тектонического экспресс-анализа территории.

Список литературы / References

1. Gil'manova G.Z., Goroshko M.V., Rybas O.V., Didenko A.N. Lineament analysis of morphostructures of the Uchur-Maya basin (Southeastern Siberian Platform) from SRTM Data: relationship with metallogeny. *International Journal of Geosciences*. 2012. № 3. P. 1176–1186.
2. Шевырёв С.Л. Алгоритмизация дистанционного анализа структурно-вещественных парагенезисов золоторудных районов (Многовершинное рудное поле, Хабаровский край) // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Геология. 2017. № 2. С. 115–121.
3. Shevyrev S.L. Algorithmization of Remote Sensing of Structural-Substantial Analysis Paragenesises Gold-Bearing Districts (Mnogovershinnoe Ore Field, Khabarovsk Krai) // *Proceedings of Voronezh State University*. Series: Geology. 2017. № 2. P. 115–121 (in Russian).
4. Canny J.A. Computational Approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. 8(6). P. 679–698.
5. Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Comm. ACM*. 1972. Vol. 15. P. 11–15.
6. Шевырев С.Л. Способ проведения прогнозно-поисковых работ месторождений полезных ископаемых полезных ископаемых на исследуемой площади. Патент 2603856 РФ: МПК G01V 9/00; заявитель и патентообладатель С.Л. Шевырев. № 2015125585128; заявл. 26.06.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. 2016. № 34.
7. Healy D., Rizzo R.E., Cornwell D.G., Farrell N.J.C., Watkins H., Timms N.E., Gomez-Rivas E., Smith M. FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *Journal of Structural Geology*. 2017. Vol. 95. February. P. 1–16.
8. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Т. 1, 2 / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 982 с.
9. Geodynamics, magmatism and metalgenius of the East of Russia. T. 1, 2 / Under the editorship of A.I. Hanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 982 p (in Russian).