

# АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ

Молчанов А.Б.<sup>1</sup>, Гордеев Н.А.<sup>2</sup>

Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва,

<sup>1</sup> alexeybm2009@gmail.com, <sup>2</sup> gord@ifz.ru

## Введение

В последние годы было разработано программное обеспечение (ПО) «SimSGM» для автоматизации структурно-геоморфологического (СТ) метода реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л.А. Сим [Сим, 1991; Гордеев, 2019]. К настоящему моменту данное ПО успешно применяется в исследованиях лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН. Основными особенностями программного пакета являются: работа со спутниковыми снимками и картами высот, предварительная обработка анализируемого изображения, ручное и автоматическое дешифрирование линеаментов, использование алгоритмов компьютерного зрения при дешифрировании, фильтрация ложных линеаментов, возникающих при применении автоматических алгоритмов дешифрирования к спутниковым снимкам территорий, содержащих большое количество техногенных объектов, реконструкция осей напряжений и визуализация роз-диаграмм в реальном времени.

Приоритетной задачей дальнейшего усовершенствования ПО в настоящий момент является оптимизация работы алгоритмов автоматического дешифрирования линеаментов и их тестирование на новых территориях и больших объёмах данных.

## Описание программного пакета

Программный пакет реализован на языке программирования Python для целевой платформы Windows с разрядностью 32 и 64 бита. Порядок работы программы представляется тремя основными этапами: 1) загрузка и предварительная обработка данных, 2) дешифрирование линеаментов и 3) линеаментный анализ с классификацией по М.В. Гзовскому [1975]. При этом реализованы два режима работы программы: полуавтоматический, когда дешифрирование выполняется оператором вручную, и автоматический, когда все этапы работы выполняются программными алгоритмами.

В полуавтоматическом режиме на вход программе подаётся спутниковый снимок, либо карта высот, либо уже готовая векторная схема линеаментов в формате SVG. После ручного нанесения на спутниковый снимок или карту высот дешифрированных линеаментов (мегатрещин, отрывов, а также линий, соответствующих разломным структурам) производится их анализ и классификация в реальном времени с интерактивным подбором окна, скользящего по линиям разломов. При интерактивном анализе в каждый момент времени отображаются результирующие оси напряжений, вероятность принадлежности к тому или иному типу и роза-диаграмма распределения линеаментов в окне анализа.

Для работы в автоматическом режиме в программу может быть загружена карта высот или спутниковый снимок. Линия разлома восстанавливается при помощи построения так называемого «активного контура» [Kass, 1988], реализованного в библиотеке Sci-kit Image, когда между указанными концами разлома прокладывается сплайн, «тяготеющий» к тёмным участкам карты высот или карты когерентности (см. далее).

Ключевой идеей автоматического дешифрирования линеаментов является применение алгоритмов компьютерного зрения к бинаризованному изображению загруженных данных. При анализе спутникового снимка его изображение сначала переводится в одноканальное представление оттенками серого, после чего оно сразу может быть бинаризовано. Однако, такой подход малоэффективен, если искомые линеаменты выделены на спутниковом снимке недостаточно контрастно. Поэтому в предыдущих работах было предложено вычислять карту когерентности для одноканального изображения, и уже на её основе выполнять бинаризацию [Молчанов, 2019].

В ходе проведённых исследований оказалось, что применение описанной процедуры хотя и позволяет выделить низко контрастные линеаменты, но нарушает их непрерывность в местах, где характерная толщина линеамента становится меньше размера окна анализа. Кроме того, мелкие детали полностью пропадают с изображения по той же причине. Поэтому было предложено

рассмотреть другой метод предварительной обработки одноканального изображения спутникового снимка, основанный на вычислении градиентов по двум ортогональным направлениям и их евклидовой нормировке. Данное преобразование выражается следующей формулой:

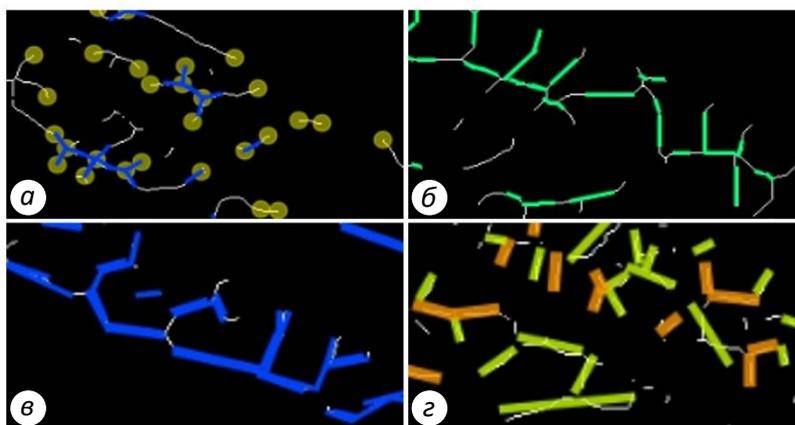
$$R = \sqrt{(\nabla_x M)^2 + (\nabla_y M)^2},$$

где  $M$  – исходное монохромное (одноканальное) изображение,  $R$  – результат преобразования. Такое преобразование позволяет гораздо лучше выделить линеаменты и прочие неоднородности, нежели расчёт карты когерентности (рис. 1), кроме того, оно вычисляется значительно быстрее, чем карта когерентности. После данного преобразования изображение подвергается адаптивному пороговому фильтру и скелетизации.



**Рис. 1.** Сравнение карты когерентности (слева) с результатом градиентного преобразования (справа)

Последующее автоматическое дешифрирование линеаментов может быть произведено четырьмя разными алгоритмами на выбор пользователя (рис. 2). Первый алгоритм заключается в поиске так называемых особых точек, которые соответствуют пересечениям и концам линий на скелетизованном изображении, вокруг каждой точки строится окружность малого радиуса (не превышающего минимальный характерный размер линеаментов) и ищется пересечение этой окружности с линией, выходящей из её центра; по двум полученным точкам проводится линеамент. Основой второго алгоритма является преобразование Хафа, которое переводит скелетизованное изображение в пространство параметров (наклон, длина вектора нормали к прямой), затем при помощи вероятностных оценок осуществляется выделение линейных элементов.



**Рис. 2.** Результаты работы алгоритмов автоматического дешифрирования линеаментов: *a* – поиск особых точек (точки отмечены жёлтыми кругами), *б* – преобразование Хафа, *в* – LineSegmentDetector, *г* – поиск контуров (оранжевым выделены контуры с малой кривизной, жёлтым – с большой; выделена средняя линия описанного прямоугольника)

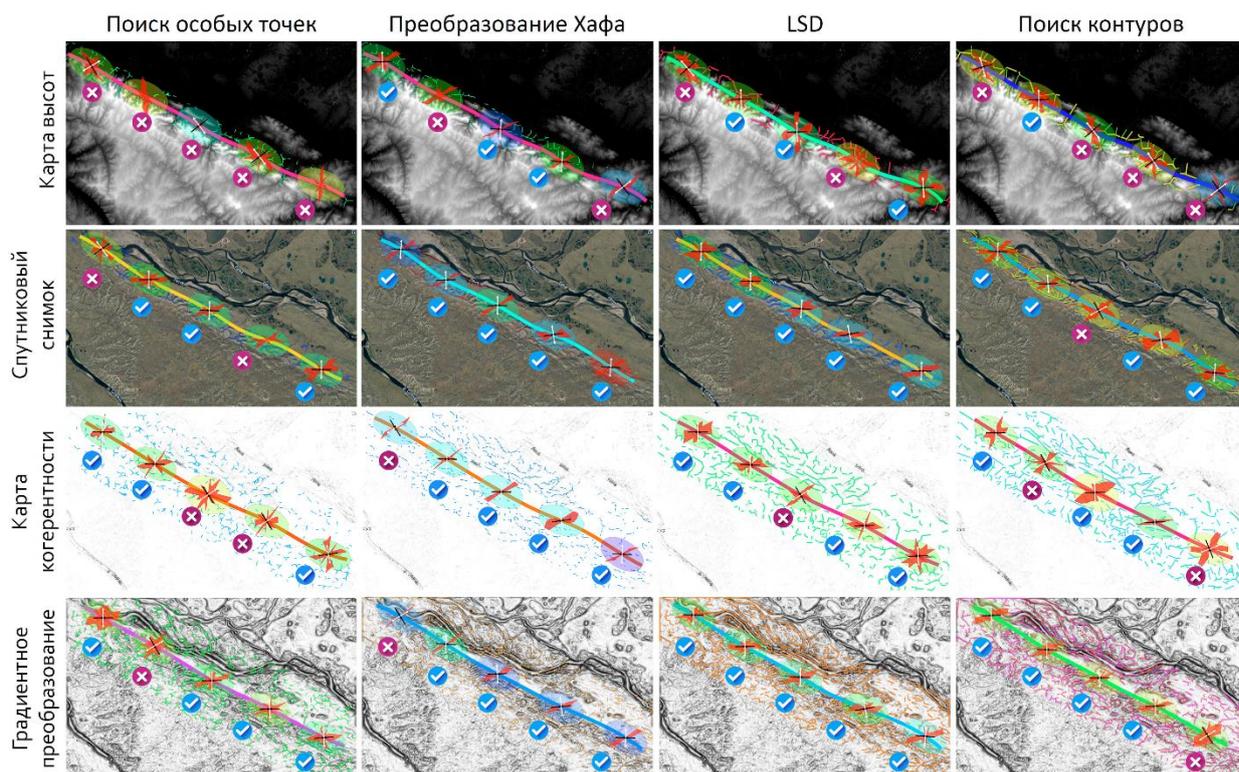
Третий алгоритм называется “Line segment detector” [von Gioi, 2012], он осуществляет поиск прямых отрезков путём построения карты изолиний градиента в скользящем окне; это позволяет выделить пиксели с одинаковым направлением изолиний и объединить их в линеамент. Четвёртый

алгоритм основан на поиске отдельных (незамкнутых) контуров на скелетизованном изображении по методу, предложенному в работе [Suzuki, 1985]; вокруг каждого найденного контура строится описанный прямоугольник наименьшей площади и вычисляются координаты середин наиболее удалённых сторон. При этом, данный алгоритм позволяет оценить не только длину и ориентацию линеамента, но также и его кривизну (по соотношению сторон прямоугольника), это свойство используется для разделения линеаментов на мегатрещины и отрывы.

Алгоритм поиска контуров позволяет выполнять фильтрацию ложных линеаментов, поскольку полученные контуры аппроксимируются ломаными линиями, и становится возможным детально описывать их форму. Ложные линеаменты, вызванные такими особенностями, как дороги, склейки спутниковых снимков или границы сельскохозяйственных угодий, характеризуются тем, что все они представляют собой линии с близкой к нулю кривизной, либо с постоянной кривизной в местах поворотов дорог. Линеаменты естественного происхождения, напротив, имеют быстро меняющуюся кривизну по всей своей длине. Это обстоятельство определило критерий фильтрации ложных линеаментов: дисперсия их локальных кривизн не должна превышать заданный порог. По результатам проведённых исследований величина этого порога оказывается порядка 0.6.

### Сопоставление алгоритмов дешифрирования

Сравнение работы описанных алгоритмов дешифрирования линеаментов проводилось по региону устья р. Лена с опорой на известную классификацию по Гзовскому, выполненную вручную. Автоматическое дешифрирование выполнялось и по карте высот, и по спутниковому изображению, и по карте когерентности, и по градиентному преобразованию. Результаты сравнения представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Результаты сравнения работы алгоритмов автоматического дешифрирования линеаментов на разных исходных данных по одной и той же территории устья р. Лена

Как можно видеть, с картой высот все алгоритмы работают весьма нестабильно. Поиск особых точек не работает вовсе. Этот алгоритм проявил себя наихудшим образом почти при любых исходных данных. Также неприемлимый результат на карте высот даёт алгоритм поиска контуров, что не позволяет проводить фильтрацию ложных линеаментов. При использовании спутникового изображения результаты становятся существенно лучше: преобразование Хафа и LineSegmentDetector дают безошибочный результат и предсказывают высокую долю классифицированного типа. При использовании карты когерентности в работе этих двух

алгоритмов появляются ошибки, однако относительная стабильность работы сохраняется. Наконец, самый стабильный результат для всех алгоритмов, включая даже поиск особых точек, появляется при использовании градиентного преобразования.

Отдельно стоит обсудить надёжность алгоритма поиска контуров, поскольку он позволяет проводить фильтрацию ложных линеаментов. Настоящее сравнение показывает, что алгоритм работает хорошо при его использовании на спутниковых снимках и на результатах градиентного преобразования. При этом, для исключения ошибок, лучше применять его сразу для обоих случаев исходных данных.

### **Обсуждение и выводы**

В результате исследования определены оптимальные методы использования автоматических алгоритмов дешифрирования линеаментов при реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений. Также определён оптимальный метод предварительной обработки изображения для дешифрирования линеаментов. Градиентное преобразование позволяет добиться высокой стабильности и надёжности всех используемых алгоритмов дешифрирования. В свою очередь, Алгоритм поиска контуров с последующей фильтрации ложных линеаментов даёт надёжные результаты, будучи применённым к результату градиентного преобразования. Если же фильтрация не требуется, наилучшим вариантом будет использование LineSegmentDetector или преобразования Хафа, как после градиентного преобразования, так и на спутниковом снимке напрямую.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

### **Литература**

- Гордеев Н.А., Молчанов А.Б.* Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25-33
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 375 с.
- Молчанов А.Б., Гордеев Н.А.* Сопоставление алгоритмов автоматизации структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим. // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара, 7-12 октября 2019 г., Институт физики Земли РАН, г. Москва. 2019. С. 159-162.
- Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. геол. и разв. 1991. № 10. С. 3-22.
- von Gioi R.G., et.al.* LSD: a Line Segment Detector. Image Processing On Line. 2012. № 2. P. 35-55.
- Kass M., et.al.* Snakes: Activecontourmodels. International // Journal of Computer Vision. 1988. V. 1, (4). P. 321.
- Suzuki S., Abe K.* Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following // CVGIP. 1985. V. 30, (1). P. 32-46.