

## Автоматическое определение типов и трендов трещиноватости в зоне новейших разрывов в программе SimSGM

Молчанов А.Б., Гордеев Н.А.

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, alexeybm2009@gmail.com; gord@ifz.ru*

**Аннотация.** Исследование напряжений в областях действия активных разрывов на настоящий момент – одна из основных задач современной неотектоники. Авторами предлагается уникальный способ по изучению напряжений, основанный на использовании космических снимков, моделей рельефа и топографических карт. Программа SimSGM значительно упрощает работу с методом реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Сим Л.А. (Ребецкий, Сим, Маринин, 2017) или структурно-геоморфологическим методом. Разработка программного обеспечения продолжается с 2018 года по настоящее время. В 2019 году была выпущена первая рабочая версия программы, в которой реализовано автоматическое и полуавтоматическое исполнение основных алгоритмов. В процессе работы с программой выполняется загрузка снимков или ЦМР и их предварительная обработка. Далее производится дешифрирование линеаментов в области действительных или предполагаемых разрывных нарушений. Затем происходит реконструкция локальных стресс-состояний (Гордеев, 2019).

В настоящей работе обсуждается нововведение начала 2022 года – работа с плотностями трещиноватости и их статистическая обработка, построение роз диаграмм, выделение приоритетных направлений, нанесение и удаление линеаментов непосредственно во время режима реконструкции локальных стресс-состояний.

**Ключевые слова:** SimSGM, Python, фильтрация линеаментов, kernel density estimation.

## Automatic determination of fracture types and trends in the zone of recent fractures in the SimSGM program

Molchanov A.B., Gordeev N.A.

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, alexeybm2009@gmail.com; gord@ifz.ru*

**Abstract.** The study of stresses in areas of active discontinuities is currently one of the main tasks of the modern neotectonics. The authors propose a unique method for studying stresses, which is based on the usage of satellite images, terrain models and topographic maps. The SimSGM program greatly simplifies the work with the Sim L.A. method of shear neotectonic stresses reconstruction (Rebetsky, Sim, Marinin, 2017) or structural-geomorphological method. The software has been developed since 2018 up to now. In 2019, the first working version of the program was released, which implements automatic and semi-automatic execution of the main algorithms. The workflow of the program consists of the following procedures: uploading of the satellite image or DEM and its further processing. Then the deciphering lineaments in the area of actual or supposed discontinuities is made. Finally, the reconstruction of local stress states (Gordeev, 2019) takes place. This paper discusses the innovation of the early 2022, i.e. working with fracture densities and their statistical processing, building rose diagrams, highlighting priority areas, drawing and removing lineaments directly during the reconstruction of local stress states.

**Keywords:** SimSGM, Python, lineament filtering, kernel density estimation.

### Введение

Данная работа вдохновлена тем, что для полноценной работы в программе SimSGM (ПО в настоящий момент распространяется в пробном режиме по предварительной договорённости с авторами) и правильного быстрого анализа не хватает возможности здесь и сейчас оценивать распределение выделяемой трещиноватости. Так, в уже знакомый интерфейс были внесены коррективы графического дизайна (Молчанов, 2021), добавлены розы-диаграммы и добавлена возможность построения карт плотностей трещиноватости.

### Описание методики

Метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений (Сим, 1991) (структурно-геоморфологический метод) в своей основе имеет анализ закономерности распределения оперяющих разрывов в зоне динамического влияния сдвиговых разрывов и ослабленных зон. Впервые такие закономерности обобщил М.В. Гзовский (1975). Основным рабочим материалом в методе являются данные дешифрирования линеаментов, которые в исследовании имеют свое собственное название – мегатрещины, так как являются косвенным признаком тектонической активности разрывов и ослабленных зон. Если взаиморасположение мегатрещин соответствует одному из вариантов парагенезиса оперяющих трещин в зоне сдвига (рис. 1), то исследователю удастся определить направление сдвига и ориентировки горизонтальных осей сжатия и растяжения с осложняющими обстановками транспрессии или транстенсии в локальной точке, т.е. определить кинематику и локальное стресс-состояние. Возраст реконструируемых напряжений считается новейшим или современным по причине выраженности мегатрещин в новейших и четвертичных образованиях.

В приложении SimSGM все алгоритмы написаны на языке программирования Python. Программа работает на ОС Windows с разрядностью 64 бит. В работе программы выделяется три основных этапа:

- Загрузка цифровой модели рельефа, космоснимка;
- Дешифрирование линеаментов;
- Анализ напряженного состояния с классификацией по М.В. Гзовскому (1975) (рис. 1).

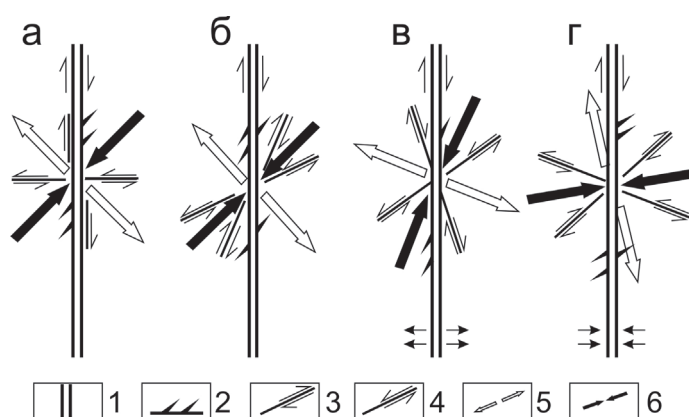


Рис. 1. Парагенезис оперяющих трещин в зоне сдвига (Гзовский, 1975), или «палетка Гзовского». Варианты напряженного состояния при углах скальвания: близких к  $45^\circ$  (а),  $< 45^\circ$  (б); обстановки дополнительного растяжения (в) и сжатия (г) – показаны в нижней части разломов стрелками, нормальными к плоскости разлома. 1 – разлом; 2 – трещина отрыва; 3, 4 – сколы с правой (3) и левой (4) сдвиговой кинематикой; 5, 6 – ориентация осей растяжения (5) и сжатия (6) в горизонтальной плоскости.

Fig. 1. Paragenesis of feathering cracks in the shear zone (Gzovsky, 1975), or «Gzovsky's palette». Variants of the stress state at shear angles: close to  $45^\circ$  (a),  $< 45^\circ$  (b); settings of additional extension (c) and compression (d) are shown in the lower part of the faults by arrows normal to the fault plane. 1 – fault; 2 – tear-off crack; 3, 4 – chips from the right (3) and left (4) shear kinematics; 5, 6 – orientation of the axes of extension (5) and compression (6) in the horizontal plane.

### Описание программного обеспечения

К настоящему моменту ПО «SimSGM» претерпело ряд существенных улучшений. Обновлённый пользовательский интерфейс теперь оптимизирован для работы на мониторах с любым разрешением и содержит ряд дополнительных настроек отображения данных и привязки географических координат. Новая система визуализации данных работает в реальном времени, позволяя повысить интерактивность на каждом этапе. При этом пользователь имеет возможность включать и отключать все элементы области анализа, будь то трещины, розы-диаграммы, оси напряжений и т. д., а также повторно просматривать исходное изображение на всех этапах предварительной обработки.

Кроме того, добавлены два новых алгоритма фильтрации ложных линеаментов. Первый основан на вычислении относительной ошибки фитирования узловых точек линеамента прямой линией. Например, для наклонов  $\alpha$  относительная ошибка может быть вычислена по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a)^2}{n}},$$

где  $n$  – число узловых точек. Если  $\varepsilon$  ниже заданного порога, линеамент считается ложным, поскольку очень близок к прямой линии. Второй алгоритм основан на измерении яркости изображения в области линеамента. Фильтрация осуществляется по заданному порогу, поскольку техногенные элементы типа грунтовых и асфальтированных дорог зачастую отражают больше света, чем окружающий ландшафт. Это позволяет отфильтровать линеаменты, которые по форме сопоставимы с естественными, но имеют техногенную природу.

Если всё же не удаётся отфильтровать все ложные линеаменты или какие-то из естественных линеаментов попадают под порог фильтрации, в ПО создана возможность удалять и добавлять линеаменты вручную. Таким образом, к настоящему времени ручной и автоматический режимы дешифрирования полностью совмещены.

В программе расширен аналитический функционал. При линеаментном анализе важной задачей является определение трендов трещиноватости. Если ранее эта задача решалась построением локальных роз-диаграмм для трещин внутри окна анализа, то теперь розы-диаграммы также строят-



Рис. 2. Построение роз-диаграмм по дешифрированным мегатрещинам.

Fig. 2. Constructed rose diagrams for deciphered megafractures.

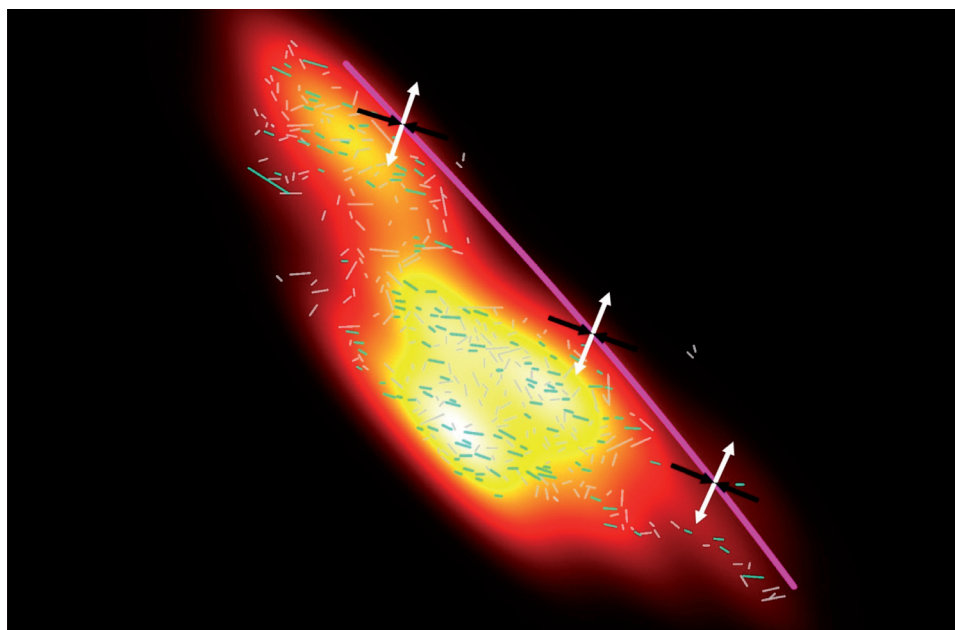


Рис. 3. Пример построения карты плотностей (KDE) по выделенной трещиноватости.

Fig. 3. An example of building a density map (KDE) for a selected fracture.

ся для всего региона исследования для каждого типа трещин, в том числе для заданных пользователем интервалов ориентаций (рис. 2). Более того, для каждого случая в ПО появилась возможность построения карты плотности трещин по методу KDE (kernel density estimation) (рис. 3). В качестве ядра используется функция Гаусса с расчётом сглаживающего фактора по правилу Скотта. Построение карт плотностей для выбранных пользователем интервалов простираний позволяет в полной мере решить задачу определения трендов трещиноватости.

В качестве дополнительной возможности в ПО также был встроен модуль экспорта дешифрованных трещин в шейп-файлы для последующей загрузки в системы ГИС (ArcGis, Global mapper, QGis и др.).

Работа выполнена в рамках государственного финансирования ИФЗ РАН.

## Литература

1. Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. Изд-во: Наука. 1975. 375 с.
3. Молчанов А. Б., Гордеев Н. А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 301–304. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.056.
4. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М. Изд-во: ГЕОС. 2017. 234 с.
5. Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. геол. и разв. 1991. № 10. С. 3–22.