

**Зеленин Е.А.<sup>1,2</sup>, Стром А.Л.<sup>2</sup>, Гарипова С.Т.<sup>1</sup>, Соколов С.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, г. Москва, egor.zelenin@ginras.ru

<sup>2</sup>ООО «ИГИИС», г. Москва, strom.alexandr@yandex.ru

## **ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ХАРАКТЕРИСТИКЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ (НА ПРИМЕРЕ РАЗЛОМОВ ЮЖНОЙ ТУВЫ)**

**Аннотация.** Понятие активного разлома широко используется как при оценке сейсмической опасности, так и в фундаментальной геодинамике. Однако, возможность будущей подвижки – то, что делает разлом активным – никогда неизвестна достоверно. На примере разломов Южной Тувы показано, что количественное выражение меры уверенности исследователя в активности разлома позволяет описать структурный рисунок и геодинамический потенциал активных разломов гораздо полнее традиционных подходов. Вероятностный подход к характеристике активных разломов дополняет и развивает вероятностный анализ сейсмической опасности.

**Ключевые слова:** активный разлом; палеосейсмология; сейсмотектоника; геоинформационная система (ГИС); вероятностное моделирование.

### *Введение*

В середине XX в. было предложено понятие активный разлом – разлом, подвижки по которому возможны в ближайшем будущем. Основанием для определения активности является геологическая история разлома, а именно признаки подвижек по нему в недавнем прошлом. Оценка периода времени, достаточного для вывода об активности разлома, варьирует от 10 тыс. лет [4] до 400 тыс. лет [2]. Исследование активной разломной тектоники имеет два аспекта. Во-первых, активные разломы – сейсмогенерирующие структуры, их положение определяет положение возможных очагов землетрясений, а длина разлома и величина разовой подвижки позволяют оценить магнитуду возможного землетрясения. Во-вторых, все активные разломы развиваются синхронно в геологическом масштабе времени, то есть структурный рисунок и движения по разломам прямо отражают характер деформирования земной коры. Таким образом, активные разломы представляют собой особую и исключительно важную группу разломов.

Возможность подвижки в будущем никогда не известна достоверно; соответственно, активность разлома – понятие вероятностное. Однако, по аналогии с традиционным геологическим картированием, сложился подход к публикации данных по активным разломам в виде однозначно нанесенных на карту линий, максимум – с разделением достоверных и предполагаемых разломов. Лишь в базе данных (БД) активных разломов Евразии [1] вероятностная характеристика активных разломов была проработана существенно детальнее: каждому объекту – сегменту разлома был присвоен один из четырех рангов достоверности.

Современные технологии хранения и обмена данными позволяют описывать гораздо более сложные взаимоотношения характеристик разломов. Вероятностная характеристика уже стала де-факто стандартом при представлении и обработке результатов геологического датирования. Начиная с комплекта карт ОСР-97, вероятностное моделирование методом Монте-Карло используется при создании синтезированного каталога землетрясений на основании зон возможных очагов землетрясений, включая активные разломы [3]. Однако и в рамках этого подхода активные разломы рассматриваются как объекты с детерминированным пространственным положением и параметрами очага. Вероятностная характеристика параметров разломов является крайне перспективным направлением развития как для оценки сейсмической опасности, так и для построения фундаментальных геодинамических моделей.

### *Район и методы исследования*

В качестве модельного участка для исследования были выбраны разрывы на северном борту Убсунурской впадины, Южная Тува (рис. 1). Крупнейшими из них являются Южно-Таннуолинский разлом, приблизительно трассирующий южное подножье Восточного Танну-Ола и Эрзин-Агордагский разлом, косо пересекающий впадину с ЮЗ на СВ от Хангайского разлома до хр. Сенгилен. Тестовый участок выбран таким образом, чтобы включать как опубликованные данные разной детальности, так и собственные наблюдения авторов. Сложность неотектонического строения и неоднородный характер изученности региона ярко иллюстрирует преимущества вероятностных характеристик при построении единой целостной картины активной разломной тектоники.

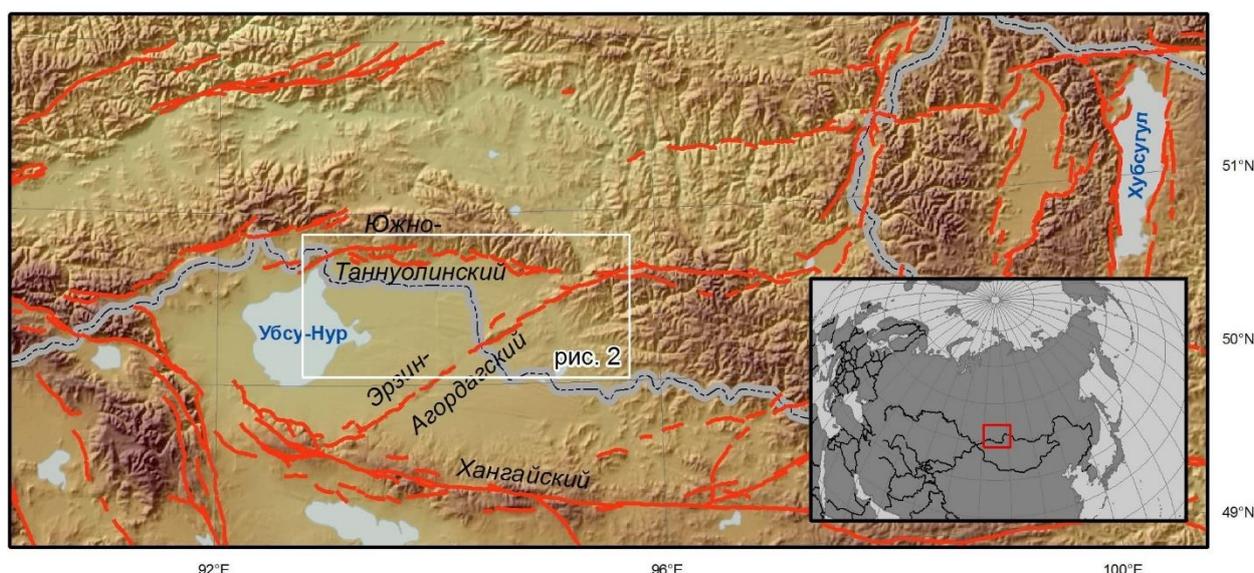


Рис. 1. Географическое положение и общий структурный рисунок активных разломов исследуемого района

Опубликованные материалы были оцифрованы и векторизованы, авторские данные получены в результате стереофотограмметрической обработки космической съемки KH-9 Hexagon, а также по полевым наблюдениям, включая аэрофотосъемку с квадрокоптера. Все данные накапливались в геопространственной базе данных SQLite и обрабатывались в ГИС QGIS 3.16.1. Структура рабочей базы данных была принята аналогичной структуре БД активных разломов Евразии.

### *Плановый рисунок разломов*

В отличие от многих других природных объектов, деформации рельефа как правило позволяют картировать линию разлома с точностью дистанционных данных и выразить результат в виде математической линии. Однако, для каждой такой линии, степень уверенности в активности может быть выражена величиной вероятности  $0 < P \leq 1$ . Вероятность активности может быть легко визуализирована на картах и схемах цветом, толщиной либо прерывистостью линии разлома (рис. 2).

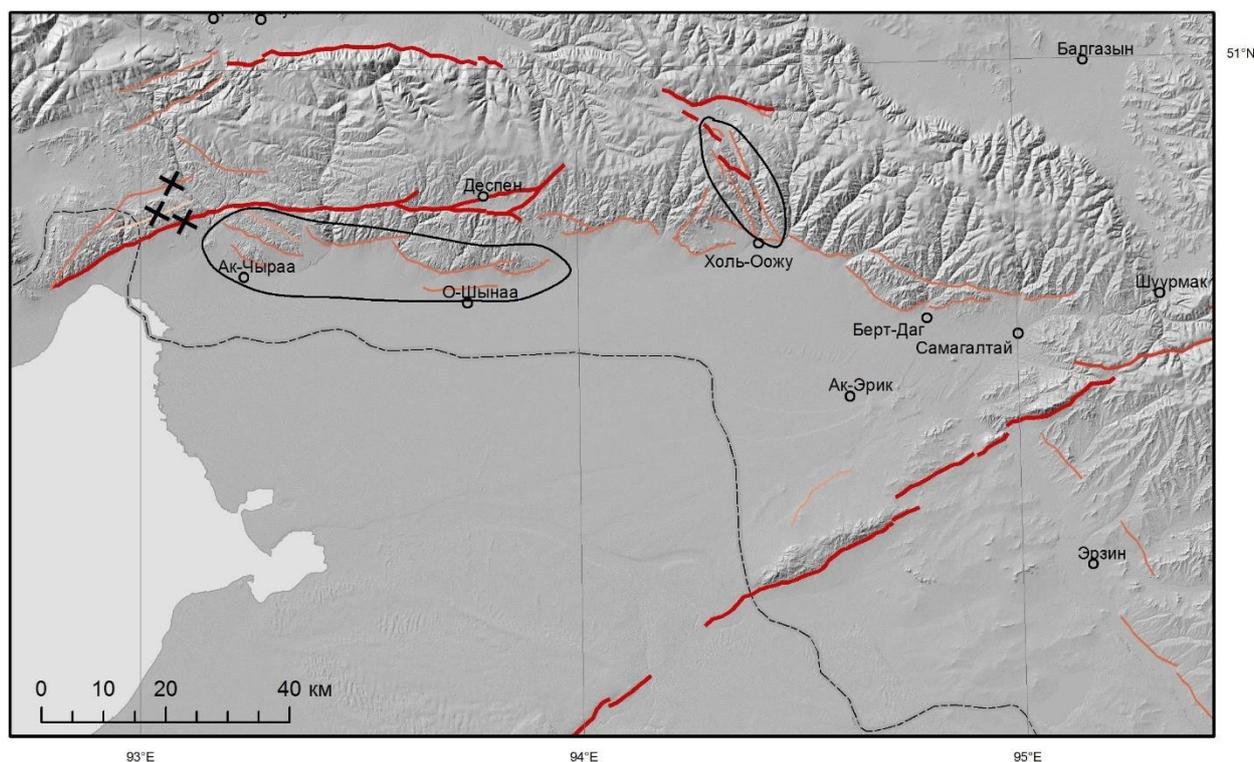


Рис. 2. Визуализация вероятностных характеристик активных разломов. Толщиной и цветом показана вероятность активности разломов. Разломы, входящие в единую систему, с общей вероятностью активности обведены, три взаимоисключающих рисовки западного окончания Южно-Таннуолинского разлома обозначены знаком «✕»

Как правило, вероятности активности разломов независимы, однако возможны ситуации, когда сегмент может рассматриваться как активный только в составе некоторой зоны, либо единая линия разлома разделена исключительно по техническим причинам, например, необходимость изменения иных атрибутов. В таком случае необходимо указание ссылок на все сегменты активного разлома в дополнительном поле атрибутивной таблицы.

Зачастую, в различных источниках приводятся различающиеся взгляды на положение линии разлома на местности. В таком случае, ссылка на объект, исключаящий активность другого объекта, также может храниться в дополнительном поле атрибутивной таблицы, по крайней мере до получения дополнительных аргументов в пользу той или иной версии.

### *Атрибутивные характеристики*

Важнейшей из характеристик активного разлома является его кинематика. Как и в случае с плановым рисунком, противоречивые характеристики кинематики вполне возможны. Если различия в кинематике относятся к пространственно различным объектам, дополнительная характеристика не требуется. Если же разделить такие объекты в пространстве не представляется возможным, необходимо добавление дополнительных полей альтернативного описания кинематики и его вероятности.

### *Заключение*

Описанный выше вероятностный подход не исключает постоянного совершенствования знаний специалистов о конкретных активных структурах. Однако, выводы многих геодинамических исследований могут быть усилены количественным выражением меры уверенности исследователя. Наиболее эффективным этот подход представляется при подготовке сеймотектонической основы для вероятностной оценки сейсмической опасности. Вероятностные характеристики возможных очагов землетрясений могут быть представлены в виде последовательных уровней логического дерева, которое обеспечит возможность использования различных возможных параметров очага в каждой симуляции каталога методом Монте-Карло.

Среди фундаментальных исследований, вероятностный подход наиболее эффективен при обобщающих работах от регионального до континентального уровня, включающих автоматизированную обработку поля деформаций. При публикации карт и схем единственным доступным для визуального анализа параметром является достоверность активности  $P$ . Все прочие описанные характеристики эффективны лишь при компьютерной обработке.

### Список литературы

1. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
2. Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры: геолого-геоморфологические и сейсмотектонические вопросы. М.: Наука, 1977. 240 с.
3. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Проблемы сейсмического районирования территории России. М.: Изд-во НИИНТПИ Госстроя России, 1999. 56 с.
4. Allen C.R. Geological criteria for evaluating seismicity // Geological Society of America Bulletin. 1975. Vol. 86. № 8. P. 1041–1057.

**E.A. Zelenin<sup>1,2</sup>, A.L. Strom<sup>2</sup>, S.T. Garipova<sup>1</sup>, S.A. Sokolov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, egor.zelenin@ginras.ru

<sup>2</sup>Russian Geotechnical Institute LLC, Moscow, strom.alexandr@yandex.ru

### **PROBABILISTIC CHARACTERIZATION OF ACTIVE FAULTS (THE CASE OF SOUTHERN TUVA FAULTS)**

**Abstract.** The concept of an active fault is actively used both in seismic hazard assessment and in geodynamic studies. However, the possibility of future movement that makes a fault active is never known for sure. An example of Southern Tuva faults reveals that quantifying a researcher's measure of confidence in fault activity allows us to describe the structural pattern and geodynamic potential of active faults much more versatile than traditional approaches. The probabilistic approach to characterization of active faults complements and develops the probabilistic analysis of seismic hazard.

**Key words:** active fault; paleoseismology; seismotectonics; GIS; probabilistic modeling.