

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТониКИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА И ЕЁ РОЛИ В РУДООБРАЗОВАНИИ

В. А. Минаев^{1,*} , С. А. Устинов¹ , В. А. Петров¹ , А. Д. Свечеревский¹ , и И. О. Нафигин¹ 

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Москва, Россия

* **Контакт:** Василий Александрович Минаев, minaev2403@mail.ru

Рассмотрены результаты комплексного анализа разломной тектоники Кольского полуострова, выполненного в региональном масштабе. На основе цифровой модели рельефа, генерализированной для различных масштабных уровней, выделены линеаменты ручным и автоматическим способами. Полученные результаты в комплексе с литературными данными позволили провести тектонофизические реконструкции с использованием модели П. Л. Хэнкока. На основе результатов данных реконструкций определены предполагаемые участки тектонических структур, обладавшие наибольшей гидравлической активностью на момент внедрения базит-ультрабазитовых массивов и дайковых комплексов пегматитовых поясов, с которыми связаны рудные месторождения дефицитных видов стратегического минерального сырья Кольского полуострова (медь, никель, хром, редкие металлы и др.). Выделены участки, перспективные на обнаружение новых рудных объектов.

Ключевые слова: Кольский полуостров, Балтийский щит, разломы, цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, линеаменты, тектонофизика, рудные месторождения, геоинформационная система, стратегические металлы.

Цитирование: Минаев, В. А., С. А. Устинов, В. А. Петров, А. Д. Свечеревский, и И. О. Нафигин Региональный дистанционный анализ разломной тектоники Кольского полуострова и её роли в рудообразовании // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES3010. — DOI: 10.2205/2024es000918 — EDN: NOVWIX

Введение

Докембрийские щиты являются важнейшим источником многих видов минерального сырья в Арктической зоне [Волков и др., 2019]. Несмотря на хорошую изученность, территория Кольского полуострова имеет высокие перспективы на открытие новых месторождений дефицитных видов стратегического минерального сырья, как традиционных для данного региона, таких как медь, никель, хром, титан, редкие металлы, так и, например, золотосеребряных объектов, проблема поиска которых уже не одно десятилетие занимает отечественных геологов [Лобанов и Сафонов, 2012]. С учётом имеющейся хорошо развитой транспортной инфраструктуры рассматриваемого региона открытие новых рудных объектов позволило бы внести значительный вклад в расширение минерально-сырьевой базы Арктической зоны Российской Федерации.

Известна связь руд Кольского полуострова с локальными магматическими архей-протерозойскими интрузиями [Пожиленько и др., 2002; Самсонов и др., 2019]. Наряду с этим авторы настоящей статьи разделяют мнение М. Т. Козлова [Козлов, 1979] о контроле интрузивных процессов разрывной тектоникой за исключением широких площадных фронтов гранитизации и мигматизации. Таким образом, мы можем говорить о разрывной тектонике как об одном из важнейших рудоконтролирующих факторов применительно к изучаемой территории.

<https://elibrary.ru/novwix>

Получено: 15 апреля 2024 г.

Принято: 7 июля 2024 г.

Опубликовано: 21 августа 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

Несмотря на то, что Кольский полуостров с маломощным чехлом четвертичных отложений, залегающих непосредственно на породах фундамента имеет благоприятные условия для исследования разрывных структур, авторами статьи найдены лишь единичные литературные источники, детально описывающие архей-протерозойский каркас разрывных нарушений для всего региона. По большей части проведенные работы сосредоточены на изучении его локальных участков [Sim et al., 2011] или же посвящены четвертичной геодинамике [Николаева и Евзеров, 2018]. Это можно объяснить отдалённостью во времени интересующего нас отрезка геологической истории и мощными геодинамическими процессами в голоцене и плейстоцене. Однако результаты исследований М. Т. Козлова [Козлов, 1979] указывают на возможность выявления древнего каркаса разрывных нарушений Кольского полуострова с использованием комплекса геолого-морфоструктурных методов. Кроме того, С. В. Шварев указывает на высокую степень наследования морфолинеаментами архейско-протерозойских структур [Shvarev, 2022]. Эти обстоятельства побудили авторов настоящей статьи попытаться проанализировать каркас древних разрывных нарушений Кольского полуострова с применением комплекса современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли и тектонофизических реконструкций. Полученные результаты позволили составить схему потенциально перспективных участков на обнаружение рудных объектов.

Объект исследований и краткая история его геологического развития

Район исследований – Кольский полуостров (рис. 1) – расположен в пределах северо-восточной части Балтийского докембрийского щита. На сегодняшний день не существует общепринятой модели архейской эволюции Кольского кратона [Mints and Dokukina, 2020]. Авторы статьи придерживаются представлений, изложенных в работах М. В. Минца и соавторов [Минц и др., 1996; Mints and Dokukina, 2020]. Предполагается, что формирование литосферы изучаемого региона произошло в интервале приблизительно 3,5–2,8 млрд лет в результате объединения нескольких изначально разобщённых микроконтинентов. Об этом свидетельствуют и индивидуальные черты строения архейских блоков Кольского полуострова [Sim et al., 2011].

Границы древнейших микроконтинентов фиксируются протяжёнными зеленокаменными поясами северо-западного простирания. Примером такой структуры может служить пояс Колмозеро-Воронья, известный редкометалльными пегматитовыми полями палеопротерозойского возраста (2,45–2,3 млрд лет) [Морозова и др., 2020]. Временной отрезок, соответствующий образованию пегматитовых жил, маркирует следующий важнейший этап истории Кольского полуострова – время функционирования каналов циркуляции рудоносных флюидов, сформировавшихся в результате активации сдвиговых движений по зонам архейского заложения.

Раннепротерозойский период (2,5–1,7 млрд лет) ознаменовался поднятием мантийного плюма, воздыманием аркогенного поднятия, и, как следствие, раскрытием интракратонных рифтовых зон северо-западного простирания таких как Печенга-Имандра-Варзугская [Пожиленько и др., 2002]. К палеорифтовым зонам приурочены рудоносные (Cr, Cu, Ni, ЭПГ, Pd) расслоенные мафит-ультрамафитовые интрузивы раннего рифтового этапа (2,49–2,4 млрд лет) – Мончегорский плутон, Федорово-Панский комплекс, никеленосные габбро-верлитовые комплексы позднего этапа (2,2–1,9 млрд лет) [Орсов, 2011].

Отрезок 1,9–1,7 млрд лет относят к коллизионному этапу с преобладанием тангенциальных напряжений. С этим этапом связывается формирование складчато-надвиговых структур.

Позднепротерозойский период (1,65–0,65 млрд лет) развития региона являлся платформенным. В течение него формировались континентальные отложения, шельф и континентальный склон.

Палеозойский период ознаменовался тектоно-магматической активизацией, связанной с герцинским тектоногенезом на северо-западе Балтийского щита. Результатом этой активизации стало проявление щелочно-ультраосновного магматизма и внедре-

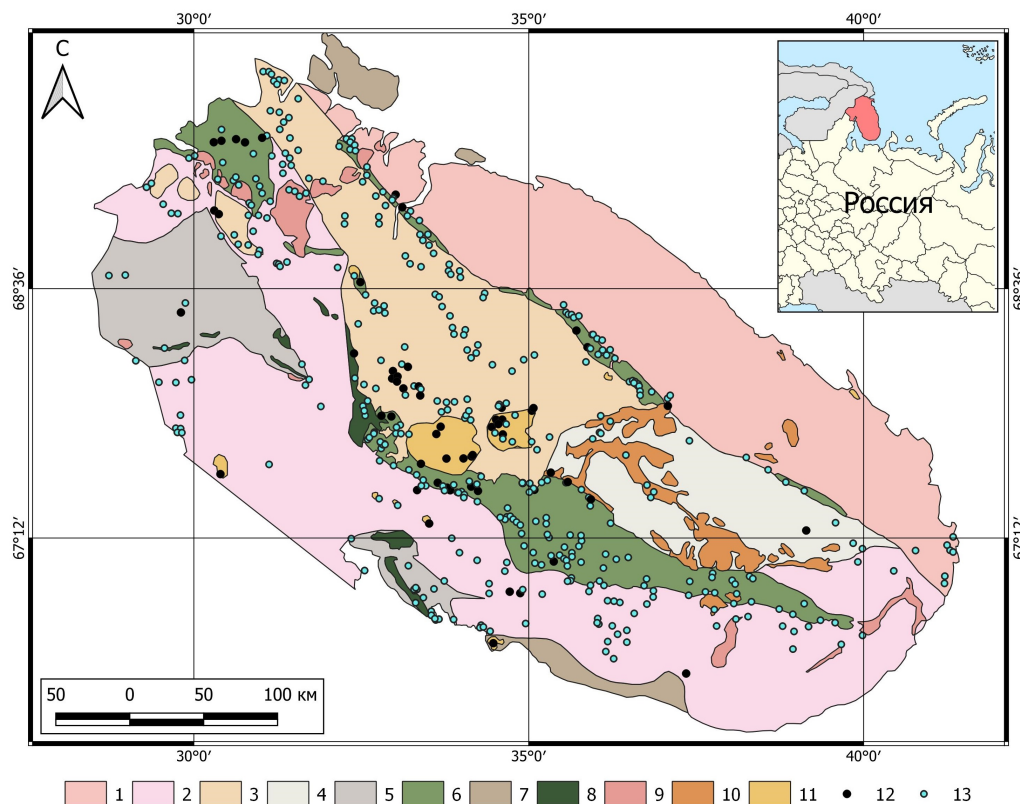


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кольского полуострова масштаба 1:500 000 (составлена по материалам [Геологическая карта Кольского региона, 2001; Государственная геологическая карта, 2007; Государственная геологическая карта, 2008; Государственная геологическая карта, 2012a; Государственная геологическая карта, 2012b]). 1 – архейские гранито-гнейсы Мурманского блока; 2 – амфиболовые гнейсы Беломорского блока; 3 – архейские тоналиты и алюмо-гнейсы Кольско-Норвежского блока; 4 – архейские алюмо-сланцы, гнейсы и кварциты Кейвского блока; 5 – архейские гранулиты; 6 – протерозойские осадочно-вулканогенные комплексы; 7 – протерозойские осадочные породы; 8 – массивы анортозитов и габбро-анортозитов; 9 – массивы гранитов и гранодиоритов; 10 – массивы щелочных гранитов; 11 – щелочные и щелочно-ультраосновные массивы; 12 – месторождения металлических полезных ископаемых; 13 – рудопроявления и пункты минерализации металлических полезных ископаемых.

ние Ковдорского массива (378,5–372,2 млн лет), Хибинского, Ловозерского плутонов (371–362 млн лет) и других массивов. Кроме того, предположительно, в девоне происходила интенсивная эрозия. Об этом говорят высотные отметки кровли Хибинского и Ловозерского массивов составляющие 600–700 м, в то время как формирование их происходило на глубине не менее 5 км [Пожиленко и др., 2002].

Палеоген-неогеновые отложения на рассматриваемой территории отсутствуют. В позднем плейстоцене и голоцене имели место разномасштабные вертикальные тектонические движения в разных участках Кольского полуострова. В последнее время фиксируется тенденция к воздыманию региона при совокупности медленных тектонических восходящих и быстрых разнонаправленных по вертикали гляциоизостатических движений [Пожиленко и др., 2002].

Методика исследований

Линеаментный анализ территории проводился с помощью специальной методики на основе построения и обработки цифровой модели рельефа (ЦМР), предложенной и верифицированной на реальных геологических объектах сотрудниками лаборато-

рии геоинформатики ИГЕМ РАН [Устинов и Петров, 2016]. Методика эффективна даже в областях со слабо расчленённым рельефом. ЦМР территории создана с использованием открытых данных радарной интерферометрической съемки поверхности земного шара ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) третьей версии. При этом в работе использовались модели различных уровней генерализации – 1 км/пиксел и 250 м/пиксел для решения соответствующих по масштабу задач.

Результаты съемки представляют собой растровые изображения со значениями высотных отметок рельефа для каждого пиксела в формате GeoTIFF, содержащем метаданные о географической привязке. Линеаменты на ЦМР выявлялись с помощью разработанного с участием отдельных авторов данной статьи программного обеспечения на основе нейросетевых технологий [Гришков и др., 2023].

Общие принципы работы данного программного обеспечения основаны на фундаментальных концепциях работы нейронных сетей и направлены на извлечение наборов уникальных признаков изображения или конкретного объекта. Это достигается за счет параллельной обработки изображения в различных слоях сети с помощью чередования слоев свертки (обработка изображения локальными операциями с помощью фильтров) и сжатия (сжатие изображения, объединяя значения фильтров), а также полносвязного слоя, формирующего итог из полученных значений. В результате выделяются линеаменты в виде коротких прямых сегментов, которые могут быть проинтерпретированы в качестве так называемых «мегатрещин», оперяющих протяженную разрывную структуру [Петров и др., 2010; Ребецкий и др., 2017].

До процедуры идентификации линеаментов с помощью созданной нейронной сети для наиболее точного выделения линеаментов на этапе предварительной подготовки ЦМР применялся метод нелинейной направленной фильтрации изображения. В данном исследовании направленная фильтрация использовалась для улучшения границ градиентного перехода между значениями пикселей с целью выделения определенных характеристик изображения на основе их частоты, связанной со структурными особенностями территории. Направленная фильтрация изображения, в соответствии с общеизвестными методиками [Enoh et al., 2021; Paplinski, 1998; Suzen and Toprak, 1998], производилась по четырем основным направлениям: С–Ю (0°), СВ–ЮЗ (45°), В–З (90°), ЮВ–СЗ (135°) с построением соответствующих схем теневого рельефа с целью подчеркнуть все возможные ориентировки выделяемых на изображении структур.

В исследовании также применялась методика выделения и заверки крупных разрывных зон, которая была предложена Д. В. Сивковым и соавторами [Сивков и др., 2020]. В её основе лежит анализ пространственного положения и создания схем плотности непротяженных линеаментов, выделяемых автоматически различными программными средствами. Для каждого линейного сегмента выделенных с помощью нейронной сети линеаментов (на основе ЦМР с разрешением 1 км/пиксел) нами рассчитан и присвоен в виде атрибута истинный азимут его простирания. На основе этого атрибута проведено ранжирование линеаментов по классам и построены восемь схем относительных удельных плотностей линейных объектов с шагом в $22,5 \pm 11,25^\circ$.

В англоязычной литературе, в соответствии с теорией разломообразования Е. М. Андерсона, выделяются три основных типа разломов: сбросы, сдвиги и надвиги [Anderson, 1905].

К настоящему времени сложилась ситуация, когда большинство специалистов в области изучения разломной тектоники допускают отрывной характер разрушения горных пород, но для описания кинематики смещения по образованному разрыву используют в основном сдвиговое перемещение (с позиций механики). Сдвиговая составляющая установлена в настоящее время и практически во всех рифтах мира (как древних, так и современных) [Уткин и др., 2016].

Для реконструкции параметров регионального поля напряжений-деформаций (ПНД), кинематики основных разломов и стадий формирования каркаса разрывных структур на основе интерпретации выделенных линеаментов необходимо принять одну из распространенных тектонофизических моделей формирования парагенезиса опе-

ряющих трещин магистрального разлома (основного разрывного нарушения первого порядка в масштабе площади исследования) в зоне сдвига. Для зон сдвига (до образования в них магистрального разрыва) природные картины нарушений второго порядка установлены и объяснены с позиций механики [Ребецкий и др., 2017; Семинский, 2003]. На начальном этапе в относительно однородном для определенной территории ПНД возникают кулисообразные системы трещин отрыва (одна система) и скола (две сопряженные системы). В зонах сдвига ориентировка трещин данных систем отвечает напряженному состоянию чистого сдвига [Семинский, 2003]. В случае, если на чистый сдвиг накладывается небольшое сжатие или растяжение вкрест оси зоны, напряженно-деформированное состояние может остаться близким к чистому сдвигу, но ориентировка осей сжатия и растяжения, а также связанная с ними ориентировка трещин, закономерно изменяются [Гзовский, 1975; Семинский, 2003]. Это исходное ПНД зон сдвига и трещины, возникшие в результате его действия, можно считать отвечающими 1-му этапу развития магистрального разрыва – этапу его подготовки.

Существуют различные объяснения формирования нарушений второго порядка вокруг уже активных разломов с позиций механики [Семинский, 2003; Hancock, 1985].

П. Л. Хэнкок приводит наиболее полную сводную схему рядов вторичных структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования в них магистрального разрыва и после его формирования [Hancock, 1985] (рис. 2). Эту модель мы использовали в качестве основной в нашем исследовании.

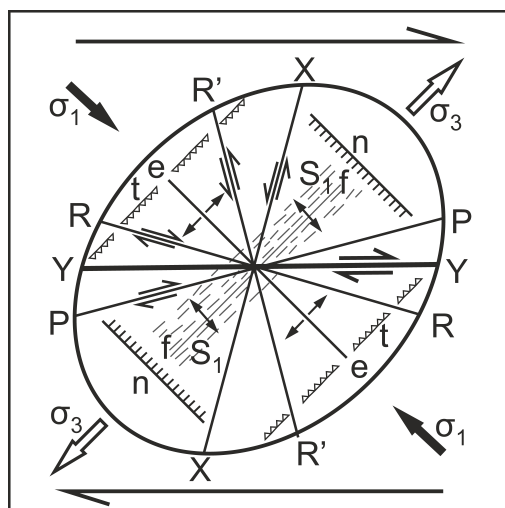


Рис. 2. Системы эшелонированных структурных элементов, образующихся в сдвиговой разломной зоне при простом скалывании [Hancock, 1985]: Y – магистральные сдвиги, R и R' – сопряженные сколы Риделя, X, P – вторичные сдвиги, e – отрывы, n – сбросы, t – взбросы, f – складки, S₁ – кливаж, σ₁ – ось максимального сжатия, σ₃ – ось максимального растяжения.

Специально для решения задач нашего исследования написано программное обеспечение (ПО) «Lineament Stress Calculator» (автор А. Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН) для интерпретации ориентировок выделенных линеаментов по модели П. Л. Хэнкока. Разработанный скрипт позволяет автоматически анализировать линейные векторные данные, определяя и классифицируя различные типы трещин на основе их геометрических и пространственных характеристик.

На основе реконструкции ориентировки оси главных сжимающих или растягивающих усилий в регионе для каждой из зон динамического влияния разрывных нарушений возможно визуализировать сегменты структур, в различной степени предрасположенные к сдвигу, участки концентрации и рассредоточения деформаций.

Сдвиговые (τ) и эффективные (σ_n) нормальные напряжения можно рассчитать по формуле [Fuchs and Müller, 2001]:

$$\tau = \frac{S_1 - S_3}{2} \sin 2\varphi,$$

$$\sigma_n = \frac{S_1 + S_3 - P_f}{2} + \frac{S_1 - S_3}{2} \cos 2\varphi,$$

где S₁ – значение напряжений по оси максимального сжатия, S₃ – значение напряжений по оси наименьшего сжатия, P_f – флюидное давление, φ – угол между нормалью к плоскости разрывного нарушения и осью действия напряжения S₁ (рис. 3).

Тенденция к сдвигу (μ) определённого структурного элемента (сегмента) разлома может быть вычислена как отношение сдвиговых напряжений к эффективным:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n}.$$

При этом наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур обла- дают $\mu \approx 0,6$ [Fuchs and Müller, 2001; Jaeger and Cook, 1979].

Данные подходы использованы в работе для реконструкции каркаса разрывных нарушений по структурно-геоморфологическим признакам, параметров ПНД, установления кинематики основных выявленных разломных зон, определения наиболее гидравлически активных сегментов разломов, восстановления стадийности формирования структур.

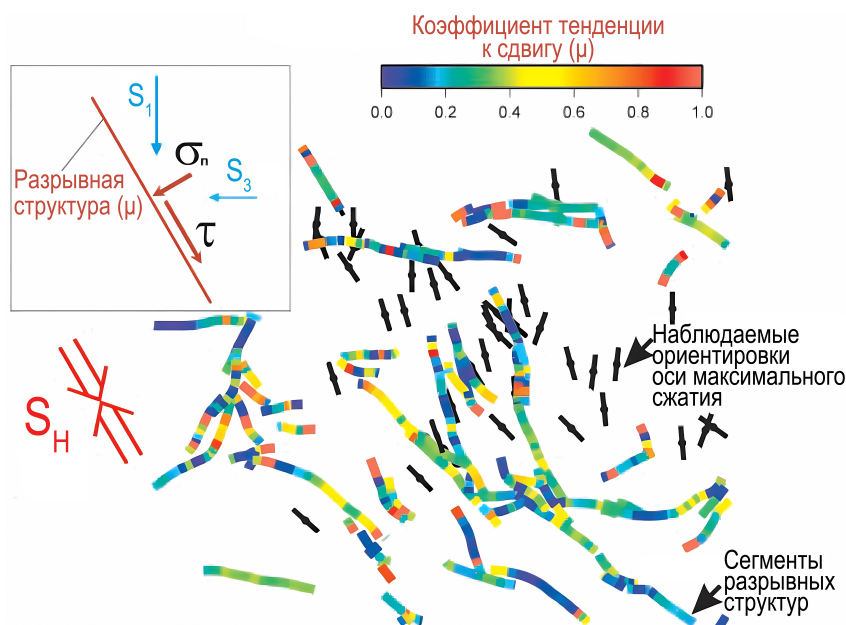


Рис. 3. Общая схема определения тенденции к сдвигу (μ) на основе комбинации ориентировок региональных анизотропных напряжений (черные символы – ориентировка оси максимального сжатия) с ориентировками сегментов разрывных структур с расчетом отношения сдвигового (τ) к нормальному напряжению (σ_n) для сегментов разломов: S_1 – ориентировка оси максимального сжатия, S_2 – ось минимального сжатия, S_H – региональная ориентировка оси максимального сжатия. Желтым и оранжевым цветами указаны сегменты, демонстрирующие наибольшую степень гидравлической активности [по Fuchs and Müller, 2001].

При этом не имея достоверной информации о величинах напряжений и флюидного давления и беря во внимание тот факт, что для формирования разлома сдвигового типа необходима значительная разница между значениями S_1 и S_3 при $S_1 > S_3$ [Зобак, 2018] мы приняли условные значения $S_1 = 70$ МПа и $S_2 = 20$ МПа. В таком случае значения сдвиговых напряжений при наших значениях угла φ достигают значения 25 МПа, что соответствует усреднённым значениям касательных напряжений для современных обстановок внутриплитового орогенеза и субдукционных областей и границ литосферных плит [Ребецкий и др., 2009]. Кроме того, при таких значениях S_1 и S_3 для нашей выборки объектов значения $\mu \leq 0,67$, что упрощает дальнейшую классификацию. Учитывая, что изменение разницы между значениями S_1 и S_3 влияет на значение μ , мы допускали гидравлически активными сегменты со значениями μ от 0,45 до 0,67. Флюидное давление в нашей модели игнорировалось как переменная, не оказывающая существенного влияния на итоговый результат. По мнению Ю. Л. Ребецкого флюидное давление составляет 0,6–0,8 от литостатического для современных областей внутриплитового орогенеза [Ребецкий, 2008].

Результаты

Как уже было упомянуто, для изучаемой территории на основе ЦМР выделены линеаменты автоматическим способом (рис. 4)

Используемый подход, учитывая высокое пространственное разрешение используемой ЦМР, позволил выделить на территории множество непротяженных линеаментов (7405 шт. для ЦМР с разрешением 1 км/пиксел и 99698 шт. для ЦМР с разрешением 250 м/пиксел).

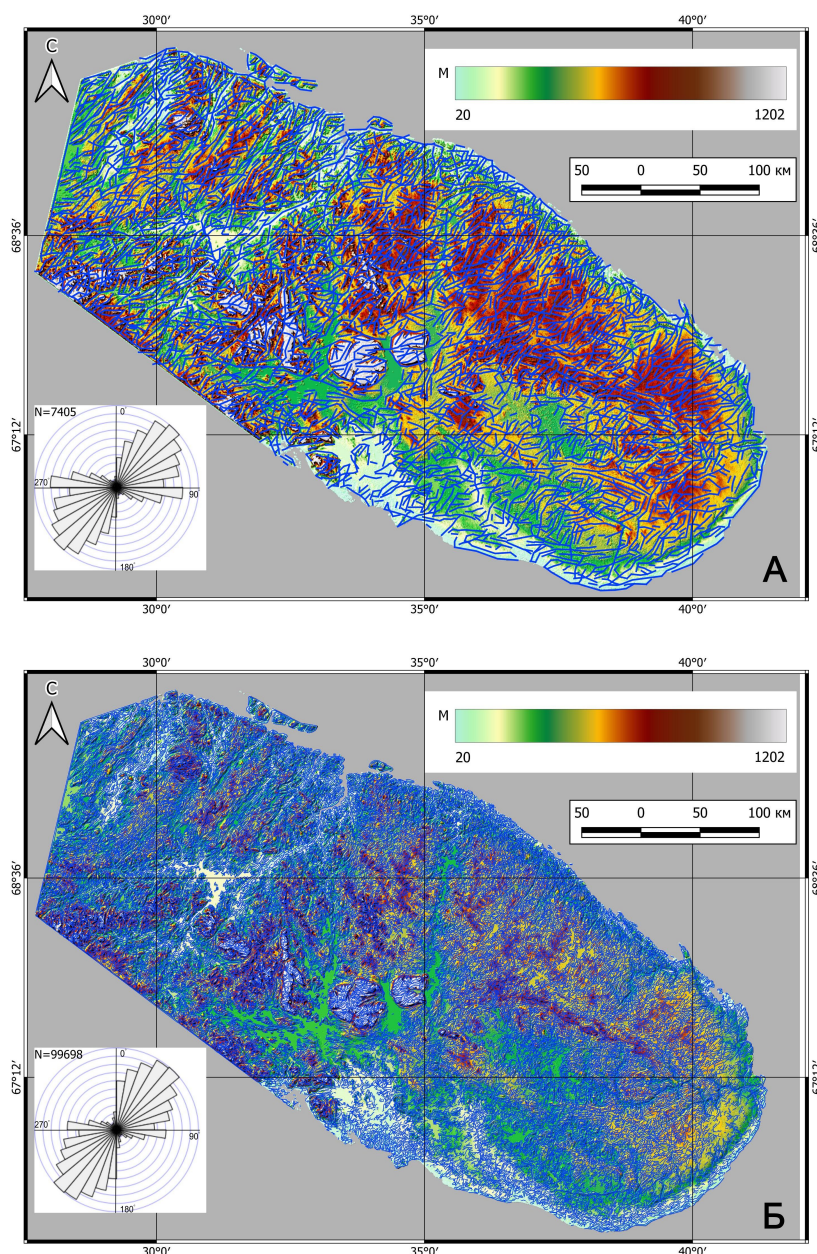


Рис. 4. Визуализированные в ГИС-среде цифровые модели рельефа с пространственным разрешением 1 км/пиксел (А) и 250 м/пиксел (Б) с выделенными созданной нейросетью линеаментами (синие линии) и розами-диаграммами их ориентировок. Цветовая шкала отражает высотные отметки рельефа. N – количество линеаментов.

Далее изучены существующие карты регионального масштаба, на которых вынесена информация о местоположении разрывных нарушений. Государственные геологические карты миллионного масштаба (листы R-(35)36; R-(37)38; Q-(35)36; Q-37) [Геологическая карта Кольского региона, 2001; Государственная геологическая карта,

2007; Минц и др., 1996; Mints and Dokukina, 2020] содержат весьма ограниченную информацию о каркасе разрывных нарушений (рис. 5А). На карте явно видны главные магистральные разломы северо-западного простирания, рассекающие весь Кольский полуостров. Роза-диаграмма также указывает на существование гораздо менее развитой системы разломов северо-восточного простирания.

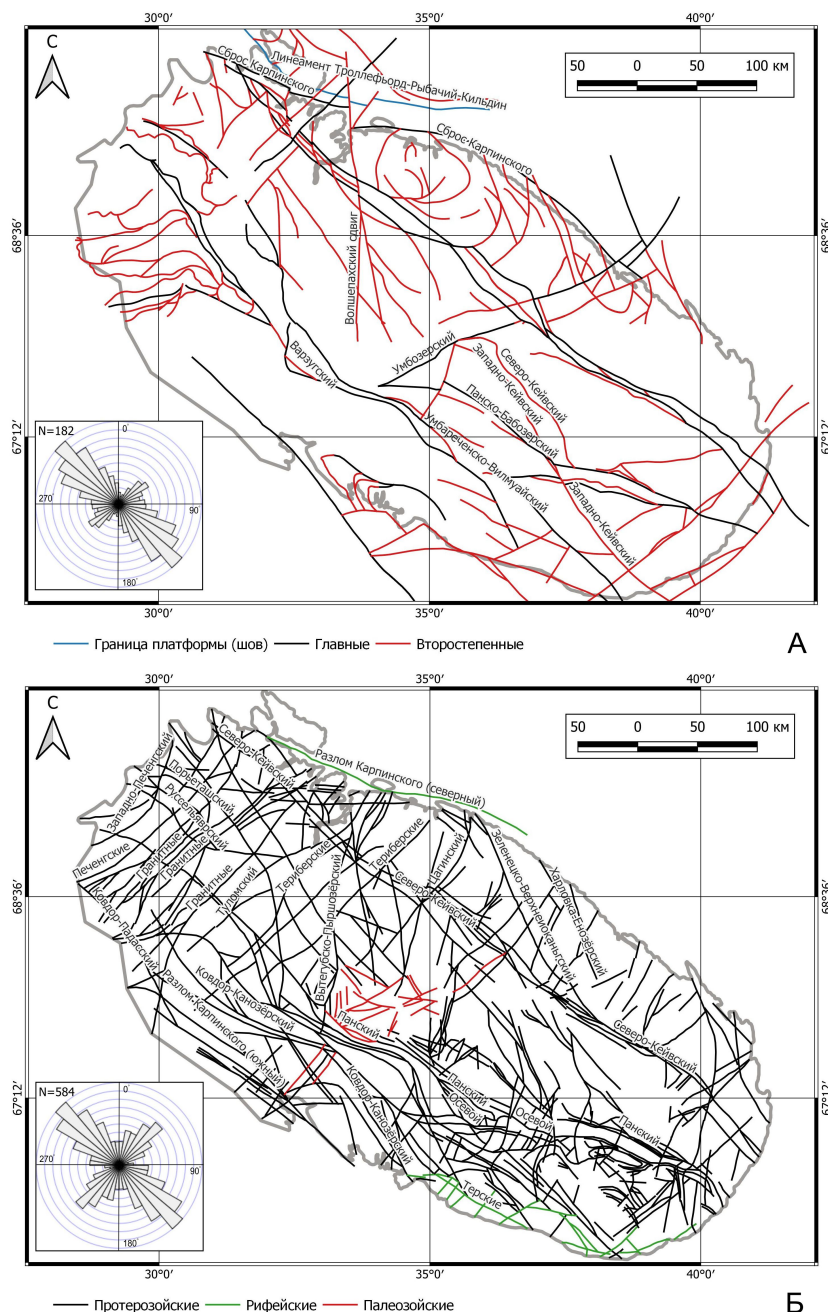


Рис. 5. А – Схема пространственного распределения разрывных нарушений на территории Кольского полуострова по материалам государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000, и роза-диаграмма их ориентировок; Б – Схематическая карта главных разломов Кольского полуострова по материалам [Козлов, 1979]. N – количество разломов.

Гораздо более информативной является карта, составленная на основе личных исследований М. Т. Козлова (рис. 5Б) [Козлов, 1979]. Помимо пространственного положения главных разрывных нарушений на ней проведена их классификация по возрасту заложения. Эту карту разломов нельзя считать полной, так как на ней не учитываются разломы, образованные в процессе геодинамической эволюции региона в позднем плей-

стоцене и голоцене [Николаева и Евзеров, 2018]. Однако на карте широко представлены разломы, заложенные в протерозое, когда на территории региона образовались пегматитовые редкометалльные (Васин-Мыльк (Cs), Олений хребет (Ta), Охмыльк (Cs-Ta), Полмостундровское (Li), Колмозерское (Li), Шонгуйское (Be)) и магматические медно-никелевые (Мончегорский плутон, Федорово-Панских тундр, Ловноозерский район, Печенгское и Аллареченское рудные поля) объекты. Таким образом было решено взять карту, составленную М. Т. Козловым, в качестве основы каркаса разрывных нарушений. Роза-диаграмма, построенная для этих разломов аналогична розе-диаграмме для разломов, вынесенных с государственной геологической карты за исключением того, что здесь система разломов северо-восточного простирания проявлена более ярко.

Учитывая высокую степень наследования морфолинеаментами архейско-протерозойских структур [Shvarev, 2022], в целях дополнения каркаса разрывных нарушений было принято решение выделить ручным способом протяжённые линеаменты (при игнорировании относительно мелких) на основе ЦМР с разрешением 1 км/пиксел (рис. 6).

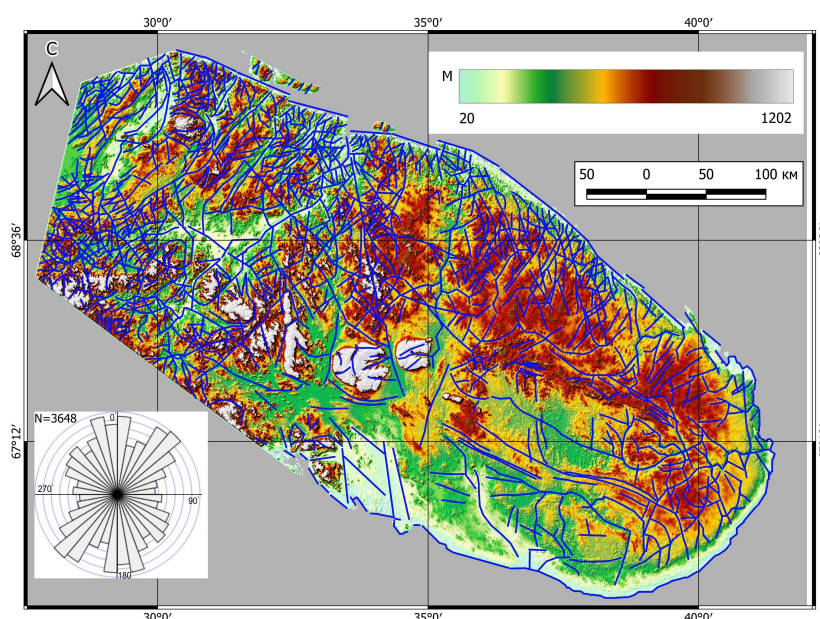


Рис. 6. Визуализированная в ГИС-среде цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 1 км/пиксел с выделенными ручным способом протяжёнными линеаментами (синие линии) и розой-диаграммой их ориентировок. Цветовая шкала отражает высотные отметки рельефа. N – количество линеаментов.

Такие линеаменты могут маркировать долгоживущие разломные зоны. Выбор уровня генерализации ЦМР обусловлен целью и, в соответствии с ней, масштабным уровнем имеющихся геологических материалов (рис. 5). В процессе работы отмечена южная часть Кольского полуострова с относительно пологим рельефом, для которой получилось выделить весьма малое количество линеаментов. На розе-диаграмме выделяется система структур с северо-западным простиранием, соответствующая магистральным разломам, более развитая северо-восточного простирания и наиболее явная система субмеридионального простирания. Последняя, по-видимому, соответствует проявлениям новейшей тектоники. Ярким примером таких разломов является Волшепахский сдвиг (рис. 5А) [Николаева и Евзеров, 2018]. Для дальнейших операций линеаменты, выделенные ручным способом, были разделены на прямолинейные сегменты. В соответствии с методикой, предложенной Д. В. Сивковым и соавторами [Сивков и др., 2020], построены схемы относительных удельных плотностей линеаментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами (рис. 7).

На всех схемах наблюдаются локальные максимумы относительной удельной плотности линеаментов, которые выстраиваются в линейные «цепочки» и формируют

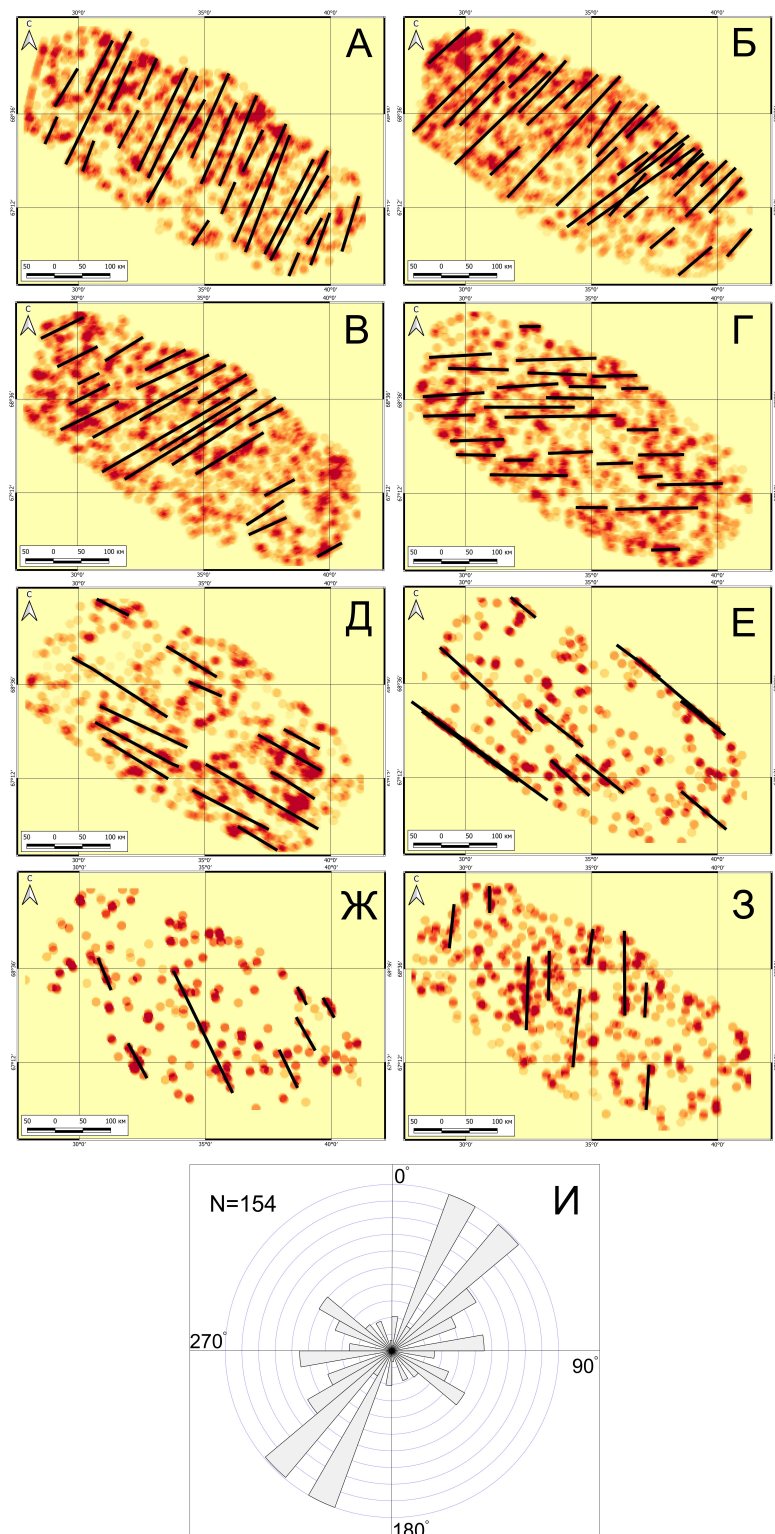


Рис. 7. А–З – схемы относительных удельных плотностей линеаментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами (показаны жирными линиями чёрного цвета) по методике [Сивков и др., 2020]: А – 11° – 34° ; Б – $33,5^{\circ}$ – $56,5^{\circ}$; В – 56° – 79° ; Г – $78,5^{\circ}$ – $101,5^{\circ}$; Д – 101° – 124° ; Е – $123,5^{\circ}$ – $146,5^{\circ}$; Ж – 146° – 169° ; З – $168,5^{\circ}$ – $11,5^{\circ}$. Цветом показана относительная удельная плотность линеаментов от 0% (жёлтый цвет) до 100% (тёмно-красный цвет); И – роза-диаграмма ориентировки трендов линеаментов. N – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

некоторые тренды. Подобные тренды образуют множество сближенных копланарных линейментов. Соответственно, выстраивающиеся в линию максимумы относительной удельной плотности, совпадающие по азимуту с линейментами определенных ориентировок, будут маркировать крупные линейные геологические объекты, наиболее вероятно, зоны протяженных разломов.

На обобщённой розе-диаграмме трендов линейментов (рис. 7И) явно выделяются две системы северо-восточного простирания. Наряду с этим, совокупный анализ приведённых результатов позволяет сделать следующие выводы – на территории Кольского полуострова существует две магистральные разломные зоны северо-западного простирания – по [Козлов, 1979] это Северо-Кейвская и, состоящая из нескольких крупных разломов (Панский, Осевой и др.), Печенга-Имандра-Варзугская (рис. 5Б). Предположительно в парагенезисной связи с ними сформированы разломы северо-восточного простирания (Цагинский, Хибино-Харловский и др.). Все эти разломы сформированы в протерозое и в большинстве своём глубинные. По геофизическим данным глубина магистральных разломов достигает 35–40 км [Козлов, 1979].

Перед тем как перейти к реконструкции параметров ПНД необходимо определить исторические причины формирования магистральных зон разломов.

Суммируя характеристики главных структурных элементов северо-восточной части Кольского полуострова (Северо-Кейвская магистральная зона), можно отметить наличие признаков тектонического развития, которое в рамках концепции тектоники плит отвечает второй половине цикла Уилсона, а сама шовная зона сформирована в результате сближения и последующей коллизии Центрально-Кольского, Кейвского и Мурманского микроконтинентов (2,7–2,6 млрд лет назад) [Минц и др., 1996].

При этом согласно реконструкциям М. В. Минца и соавторов, ось сжатия меняла ориентировку с северо-восточной (2,8–2,6 млрд лет) на субмеридиональную (2,5 (2,45) млрд лет). Из этого следует, что именно в условиях субмеридионального сжатия произошла активация зоны сочленения Кольской и Мурманской архейских провинций, то есть сформировалась линейная транскоровая сдвиговая проницаемая зона, послужившая подводным каналом в процессе формирования Кольского редко-металльного пегматитового пояса (2,45–2,3 млрд лет) [Морозова и др., 2020].

Геодинамическая эволюция Печенга-Имандра-Варзугской зоны реконструирована М. В. Минцем и соавторами [Минц и др., 1996] для раннего протерозоя. Её заложение произошло в результате активации процесса континентального рифтогенеза в результате поднятия мантийного плюма.

При этом, согласно реконструкциям М. В. Минца и соавторов ось сжатия меняла ориентировку от субширотной (2,49–2,4 млрд лет) до север-северо-восточной (2,02–1,87 млрд лет).

Важно отметить, что, если внедрение рудоносных (Cr, Cu, Ni, ЭПГ, Pd) расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузивов (Мончегорский плутон, Федорово-Панский комплекс) связано с самым началом процесса образования рифта (2,49–2,4 млрд лет), то формирование богатых эпигенетических медно-никелевых руд Печенгского и Алареченского рудных районов (2,2–1,9 млрд лет) уже происходило в условиях формирования тыловодужного надвигового пояса.

Таким образом, при попытке реконструкции параметров ПНД на основе модели П. Л. Хэнкока [Hancock, 1985] необходимо выделить две условные сдвиговые блок-зоны – Северо-Кейвская и Имандра-Варзугская, как сформированные в разное время и в результате различных процессов. Имандра-Варзугскую зону можно рассматривать в качестве сдвиговой именно в начальной стадии развития рифта, основываясь на наличии сдвиговых составляющих при формировании таких структур [Уткин и др., 2016]. Печенгская же зона сформирована в других тектонодинамических условиях и значительно осложнена в процессе внедрения гранит-мigmatитовых и гранито-гнейсовых куполов (рис. 1). Следовательно, параметры ПНД для неё не могут быть реконструированы на основе моделей зон сдвига.

Блок-зоны состоят из условной линии («тренда») исследуемого сдвига и самих элементов разрывной тектоники, которые могут быть представлены разломами или линеаментами. В целях корректной реконструкции последние разделены на прямолинейные сегменты. Таким образом Северо-Кейвская блок-зона по своей протяжённости рассекает целиком изучаемый регион, как и одноимённый разлом. Протяжённость Имандра-Варзугской зоны устанавливалась по протяжённости разломов, входящих в её состав, а также по распространению раннепротерозойских вулканогенно-осадочных толщ и магматических тел, контролируемых этими разломами. Ширина (условная «зона влияния») блок-зон определялась экспериментальным способом, так как традиционное понятие «зоны тектонического влияния разлома» не вполне подходит изучаемым структурам надрегionalного масштаба. Для каждой блок-зоны восстанавливалось ПНД для различных по размеру «зон влияния» – от 10 км до 100 км с шагом в 10 км. Установлено, что как для Северо-Кейвской, так и для Имандра-Варзугской зоны ориентировки главных напряжений ПНД сохранялись при ширине «зоны влияния» от 10 км до нескольких десятков километров. Перемена ориентировок напряжений происходила явно в случае взаимного наложения «зон влияния» разных структур. Границы такого перехода фиксировались и служили в наших моделях ограничителями блок-зон по ширине.

Рассмотрим полученные результаты реконструкции ПНД согласно модели П. Л. Хэнкока. Для Северо-Кейвской блок-зоны в качестве входных данных использованы протерозойские разломы по [Козлов, 1979] (рис. 8А) и выделенные вручную протяжённые линеаменты (рис. 8Б).

В обоих случаях ось регионального максимального сжатия имела субмеридиональную ориентировку ($\approx 0^\circ$), а ось регионального максимального растяжения характеризовалась субширотным направлением ($\approx 90^\circ$). Такая ситуация согласуется со структурно-вещественными реконструкциями М. В. Минца и соавторов [Минц и др., 1996] на начало сдвиговой активации шовной зоны (2,5 (2,45) млрд лет). При этом сама шовная зона в нашей модели (Y-трещины) однозначно интерпретируется как правый сдвиг, что отвечает реконструкциям, приведённым в работе [Mints and Dokukina, 2020].

Разломы северо-восточной ориентировки, которые имеют значимое распространение на территории, являются антириделевскими (R') и, соответственно, характеризуются противоположной (левые сдвиги) кинематикой относительно магистральных структур. Последнее подтверждено при реконструкции ПНД для некоторых наиболее крупных разломных зон северо-восточного простирания, входящих в состав Северо-Кейвской блок-зоны (рис. 8В). Согласно масштабу исследования, в качестве исходного материала для этих локальных моделей послужили линеаменты, выделенные с помощью нейронной сети на основе ЦМР с пространственным разрешением 250 м/пиксел. Для них на рисунке 8В приведена обобщённая роза-диаграмма.

Для Имандра-Варзугской блок-зоны (рис. 9) в качестве входных данных использованы протерозойские разломы по [Козлов, 1979] (рис. 9А) и выделенные нейросетью на основе ЦМР с пространственным разрешением 1 км/пиксел линеаменты (рис. 9Б).

Использование линеаментов, выделенных нейросетью, явилось вынужденной мерой, так как для данной территории не представлялось возможным выделить представительную выборку протяжённых линеаментов вручную. В обоих случаях ось регионального максимального сжатия имеет близосубширотную ориентировку ($\approx 75^\circ$), а ось регионального максимального растяжения характеризовалась близосубмеридиональным направлением ($\approx 165\text{--}170^\circ$). Такая ситуация в целом согласуется с реконструкциями М. В. Минца и соавторов [Минц и др., 1996] на начало рифтообразования (2,49–2,4 млрд лет). При этом сама шовная зона в нашей модели (Y-трещины) однозначно интерпретируется как левый сдвиг.

Разломы северо-восточной ориентировки, имеющие значимое распространение на территории, являются антириделевскими (R') и, соответственно, характеризуются противоположной (правые сдвиги) кинематикой относительно магистральных структур. Последнее было подтверждено при реконструкции ПНД для некоторых наиболее

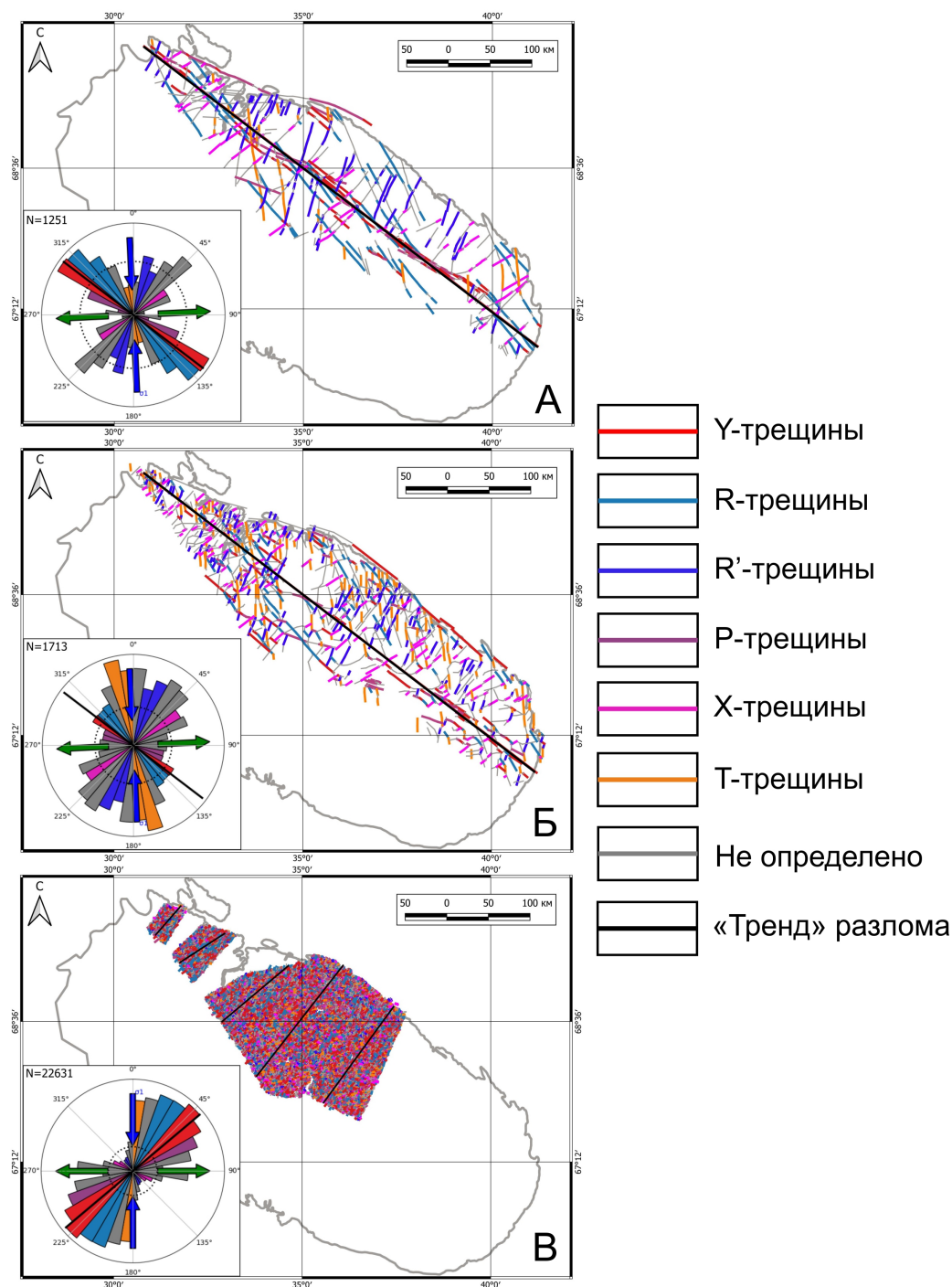


Рис. 8. А–Б – Реконструкция ПНД для Северо-Кейвской блок-зоны на основе модели П. Л. Хэнкока для: А – разломов протерозойского возраста (по [Козлов, 1979]); Б – протяжённых линеаментов, выделенных вручную; В – реконструкция ПНД для разломов северо-восточного простирания. Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зелёные стрелки – ориентировка оси максимального растяжения. N – количество объектов, использованных для построения роза-диаграммы.

крупных разломных зон северо-восточного простирания, входящих в состав Имандра-Варзугской блок-зоны (рис. 9В). Согласно масштабу исследования, в качестве исходного материала для этих локальных моделей послужили линеаменты, выделенные с помощью нейронной сети на основе ЦМР с пространственным разрешением 250 м/пиксел. Для них на рисунке 9В приведена обобщённая роза-диаграмма.

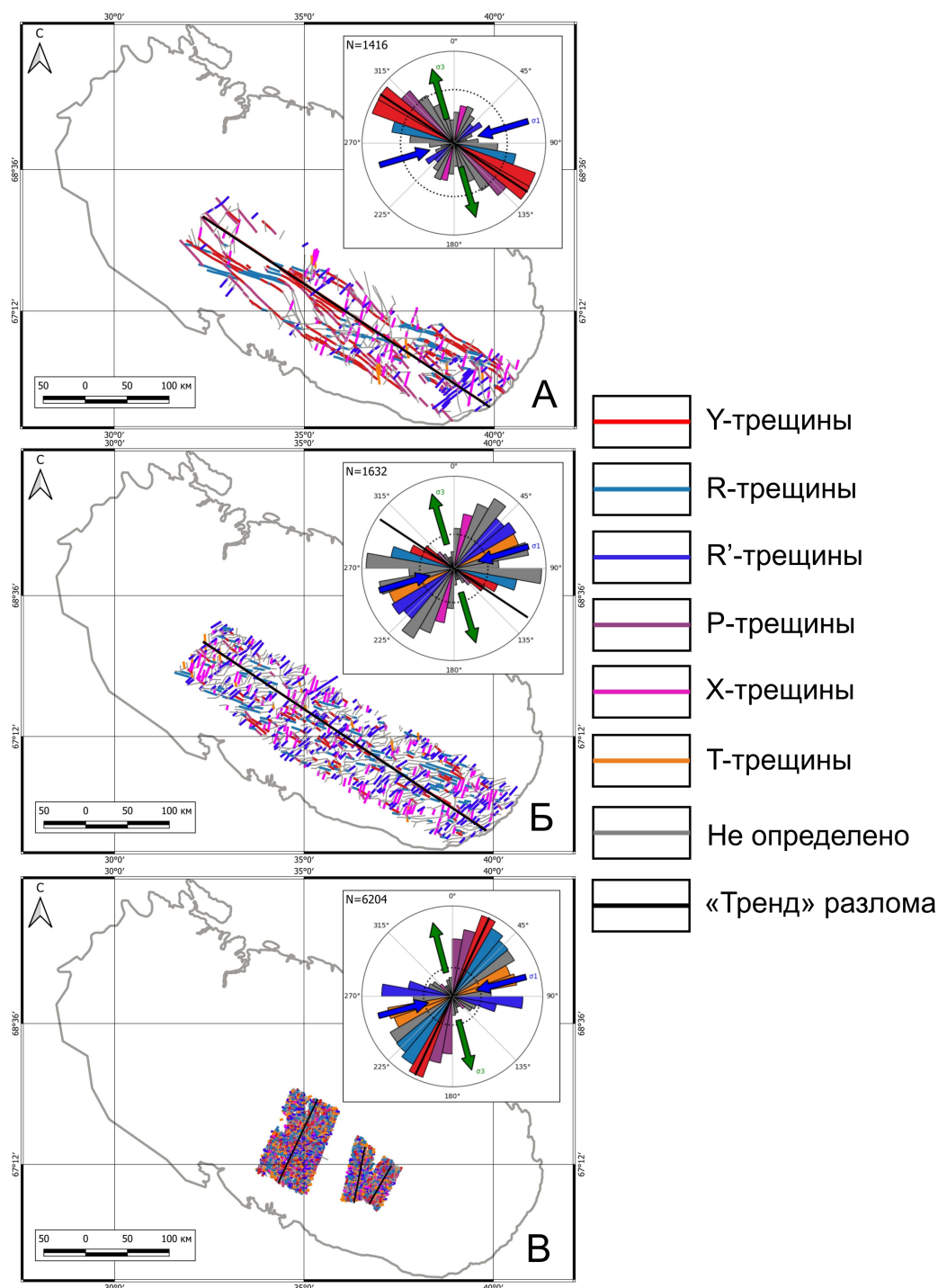


Рис. 9. А–Б – Реконструкция ПНД для Имандра-Варзугской блок-зоны на основе модели П. Л. Хэнкока для: А – разломов протерозойского возраста (по [Козлов, 1979]); Б – линейментов, выделенных нейронной сетью на основе ЦМР (1 км/пиксел); В – реконструкция ПНД для разломов северо-восточного простирания. Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зелёные стрелки – ориентировка оси максимального растяжения. N – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

Мы предполагаем, что восстановили ориентировки главных осей ПНД для двух блок-зон в связи с конкретными этапами их геологического развития. Для Северо-Кейвской блок-зоны – это начало сдвиговой активации шовной зоны и формирование редкометалльных пегматитовых полей, а для Имандра-Варзугской – начало процесса

рифтообразования и внедрение рудоносных расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузивов.

На основе результатов реконструкции ориентировки главных региональных осей сжатия и растяжения, расчета коэффициента тенденции к сдвигу (μ), возможно визуализировать сегменты установленных и предполагаемых (линеаменты) разрывных структур, в различной степени предрасположенных к сдвигу (транстенсии). Расчеты проводились для разломов протерозойского возраста (по [Козлов, 1979]) и трендов плотностей линеаментов, выделенных по методике [Сивков и др., 2020], как сомасштабным объектам (рис. 10).

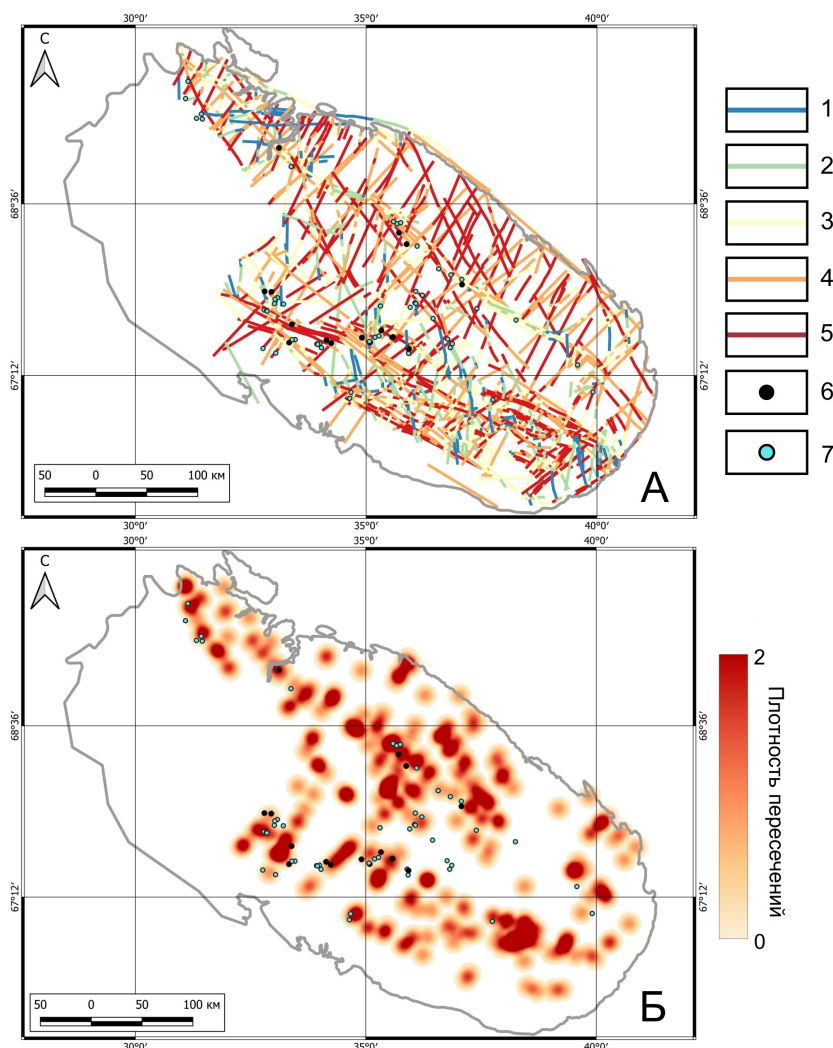


Рис. 10. Результаты реконструкции гидравлической активности сегментов тектонических элементов: А – классифицированные сегменты всей разломной сети протерозойского возраста заложения (по [Козлов, 1979]) и тренды плотностей линеаментов северо-восточного простирания. 1 – непроницаемые сегменты; 2 – слабопроницаемые сегменты; 3 – сегменты средней проницаемости; 4 – проницаемые сегменты; 5 – сегменты повышенной проницаемости; Б – схема плотности пересечений сегментов разломов между собой и с сегментами трендов плотностей линеаментов северо-восточного простирания проницаемых и повышенной проницаемости; 6 – месторождения металлических полезных ископаемых магматического генезиса; 7 – рудопроявления металлических полезных ископаемых магматического генезиса.

При этом, в целях дополнения каркаса разрывных нарушений парагенезиса магистральных разломов северо-западного простирания и глубинных разломов северо-восточного простирания, тренды плотностей линеаментов рассматривались именно

северо-восточной ориентировки (азимуты простираения от 20° до 50°). По нашим представлениям эти две ортогональные системы (северо-западного и северо-восточного простираений) глубинных разрывных нарушений служили каналами для внедрения рудоносных магм, а значит в целях определения наиболее перспективных площадей следует выявить среди них наиболее гидравлически активные сегменты. В связи с различными параметрами реконструированного ПНД вычисления коэффициента тенденции к сдвигу (μ) проводились отдельно для Северо-Кейвской и Имандра-Варзугской блок-зон.

В результате сегменты рассматриваемых структур классифицированы от непроницаемых до высокопроницаемых и представлены на объединённой схеме (рис. 10А). Для наглядности построена схема плотностей пересечений сегментов разломов между собой и с сегментами трендов плотностей линеаментов северо-восточного простираения проницаемых и повышенной проницаемости (рис. 10Б). Предположительно именно пересечения магистральных разломных зон северо-западного простираения и глубинных разломов северо-восточного простираения играли наибольшую роль при циркуляции рудоносных флюидов. Это предположение подтверждается тем, что абсолютное большинство (77%) известных рудных объектов, как связанных с пегматитами, так и с расслоенными интрузиями, локализованы в радиусе влияния таких пересечений. Этот радиус влияния принят нами условно и составляет 10 км.

Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для территории Кольского полуострова проведён комплексный структурно-линеamentный анализ на основе различных данных и научно-методических подходов, в том числе авторских, к выделению линеаментов с использованием цифровой модели рельефа, включая её разнонаправленную фильтрацию и с применением геоинформационных технологий.
2. На основе модели развития вторичных структур в зоне скола П. Л. Хэнкока и установленных разрывных нарушений реконструированы параметры (ориентировки главных осей) регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов разрывов для двух региональных блок-зон Кольского региона. Результаты палеорекострукций отвечают конкретным обстановкам, выявленным ранее другими исследователями [Минц и др., 1996; Mints and Dokukina, 2020] на основе применения иного научно-методического подхода.
3. Расчет показателя тенденции к сдвигу (транстенсии) с учетом, установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур.
4. С точки зрения прогноза размещения полезных ископаемых, дальнейшие детализирующие работы необходимо сосредоточить на изучении зон пересечений наиболее гидравлически активных (проницаемых) разломов северо-восточного и северо-западного простираения. Данные надрегиональные и региональные структуры могли выступать в качестве магмо- и флюидоподводящих.

Благодарности. Исследование выполнено в молодёжной лаборатории ИГЕМ РАН «Лаборатория прогнозно-металлогенических исследований» в рамках темы государственного задания «Применение современных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей».

Список литературы

Волков А. В., Бортников Н. С., Лобанов К. В. и др. Месторождения стратегических металлов арктического региона // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2019. — Т. 16. — С. 80–84. — DOI: [10.31241/FNS.2019.16.016](https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.016).

- Геологическая карта Кольского региона / под ред. Ф. П. Митрофанова. — Апатиты : Геологический институт КНЦ РАН, 2001.
- Гзовский М. В. Основы тектонофизики. — Москва : Наука, 1975. — 536 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Северо-Карско-Баренцевоморская серия. R-(35),36 (Мурманск) / под ред. Б. Г. Лопатина. — Картографическая фабрика «ВСЕГЕИ», 2007.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Северо-Карско-Баренцевоморская серия. R-(37),38 (м. Святой Нос - м. Канин Нос) / под ред. Б. Г. Лопатина. — Картографическая фабрика «ВСЕГЕИ», 2008.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Балтийская серия. Q-(35),36 (Апатиты) / под ред. К. Э. Якобсона. — Картографическая фабрика «ВСЕГЕИ», 2012а.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Балтийская серия. Q-37 (Архангельск) / под ред. Ю. Б. Богданова. — Картографическая фабрика «ВСЕГЕИ», 2012b.
- Гришков Г. А., Нафигин И. О., Устинов С. А. и др. Разработка методики автоматического выделения линеаментов на основе нейросетевого подхода // Исследования Земли из космоса. — 2023. — Т. 2023, № 6. — С. 86—97. — DOI: [10.31857/S0205961423060040](https://doi.org/10.31857/S0205961423060040).
- Зобак М. Д. Геомеханика нефтяных залежей. — Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2018. — 479 с.
- Козлов М. Т. Разрывная тектоника северо-восточной части Балтийского щита. — Ленинград : Наука, 1979. — 140 с.
- Лобанов К. В., Сафонов Ю. Г. Проблема вкрапленной золоторудной минерализации в Кольском кратоне // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2012. — № 9. — С. 178—180. — EDN: WXPYTB.
- Минц М. В., Глазнев В. Н., Конилов А. Н. и др. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: Палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. — Москва : Научный мир, 1996. — 287 с. — EDN: SHMREV.
- Морозова Л. Н., Серов П. А., Кунаккузин Е. Л. и др. Кольский редкометалльный пегматитовый пояс: основные черты геологического строения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2020. — Т. 17. — С. 374—378. — DOI: [10.31241/FNS.2020.17.071](https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.071).
- Николаева С. Б., Евзеров В. Я. К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // Вестник ВГУ. Серия: Геология. — 2018. — № 1. — С. 5—14. — EDN: YVHQNY.
- Орсоев Д. А. Медно-никелевые месторождения Кольской никеленосной провинции (Мурманская область, Россия) // Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. — 2011. — № 1. — С. 47—56. — EDN: NXPOYF.
- Петров В. А., Сим Л. А., Насимов Р. М. и др. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельцовской кальдеры // Геология рудных месторождений. — 2010. — Т. 52, № 4. — С. 310—320. — EDN: MUJYXL.
- Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В. и др. Геология рудных районов Мурманской области. — Апатиты : Кольский научный центр РАН, 2002. — 359 с. — EDN: RBLTLP.
- Ребецкий Ю. Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 1, № 11. — С. 66—73. — EDN: IJRQTF.
- Ребецкий Ю. Л., Кучай О. А., Сычева Н. А. Метод катакластического анализа разрывных нарушений и результаты расчетов современного напряженного состояния в коре вблизи границ плит и для внутриплитных горно-складчатых орогенов // ТЕКТОНОФИЗИКА И АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАУК О ЗЕМЛЕ к 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: материалы докладов Всероссийской конференции: в 2 томах. Том 1. — Москва : ИФЗ РАН, 2009. — С. 340—366. — EDN: XXCINF.
- Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. — Москва : ГЕОС, 2017. — 235 с. — EDN: YPNZQR.
- Самсонов А. В., Степанова А. В., Арзамасцев А. А. и др. Петрологические и геодинамические причины разнообразия месторождений крупной магматической провинции 1,98 млрд лет в восточной Фенноскандии // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика Д.С. Коржинского. — Москва : ИГЕМ РАН, 2019. — С. 185—188. — EDN: TOTABZ.
- Семинский К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон: тектонофизический аспект. — Институт земной коры Сибирского отделения РАН, 2003. — 243 с. — EDN: WPMWBH.
- Сивков Д. В., Читалин А. Ф., Дергачев А. Л. Применение линеamentного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследования Земли из космоса. — 2020. — № 1. — С. 3—19. — DOI: [10.31857/S020596142001011X](https://doi.org/10.31857/S020596142001011X).

- Устинов С. А., Петров В. А. Использование детальных цифровых моделей рельефа для структурно-линеamentного анализа (на примере Уртуйского гранитного массива, ЮВ Забайкалье) // Геоинформатика. — 2016. — № 2. — С. 51–60. — EDN: WBKJRP.
- Уткин В. П., Митрохин А. Н., Неволин П. Л. Сдвиговой континентальный рифтогенез восточной окраины Азии // Литосфера. — 2016. — № 4. — С. 2–59. — EDN: WWQSLF.
- Anderson E. M. The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society. — 1905. — Vol. 8, no. 3. — P. 387–402. — DOI: [10.1144/transed.8.3.387](https://doi.org/10.1144/transed.8.3.387).
- Enoh M. A., Okeke F. I., Okeke U. C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria // Geodesy and cartography. — 2021. — Vol. 47, no. 1. — P. 34–44. — DOI: [10.3846/GAC.2021.12099](https://doi.org/10.3846/GAC.2021.12099).
- Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. — 2001. — Vol. 88, no. 9. — P. 357–371. — DOI: [10.1007/s001140100253](https://doi.org/10.1007/s001140100253).
- Hancock P. L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. — 1985. — Vol. 7, no. 3/4. — P. 437–457. — DOI: [10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3).
- Jaeger J. C., Cook N. G. W. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edition. — London : Chapman, Hall, 1979. — 593 p.
- Mints M. V., Dokukina K. A. The Belomorian eclogite province (eastern Fennoscandian Shield, Russia): Meso-Neoproterozoic or Late Paleoproterozoic? // Geodynamics & Tectonophysics. — 2020. — Vol. 11, no. 1. — P. 151–200. — DOI: [10.5800/GT-2020-11-1-0469](https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-1-0469).
- Papilinski A. P. Directional filtering in edge detection // IEEE Transactions on Image Processing. — 1998. — Vol. 7, no. 4. — P. 611–615. — DOI: [10.1109/83.663510](https://doi.org/10.1109/83.663510).
- Shvarev S. V. Morphotectonics, Seismicity, and Exogenous Processes of the Kola Peninsula // Russian Geology and Geophysics. — 2022. — Vol. 63, no. 8. — P. 940–954. — DOI: [10.2113/RGG20204310](https://doi.org/10.2113/RGG20204310).
- Sim L. A., Zhirov D. V., Marinin A. V. Stress and strain reconstruction for the eastern segment of the Baltic shield // Geodynamics & Tectonophysics. — 2011. — Vol. 2, no. 3. — P. 219–243. — DOI: [10.5800/GT-2011-2-3-0044](https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-3-0044).
- Suzen M. L., Toprak V. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: An application to a fault zone in Central Turkey // International Journal of Remote Sensing. — 1998. — Vol. 19, no. 6. — P. 1101–1114. — DOI: [10.1080/014311698215621](https://doi.org/10.1080/014311698215621).

REGIONAL REMOTE SENSING ANALYSIS OF FAULT TECTONICS OF THE KOLA PENINSULA AND ITS ROLE IN ORE FORMATION

V. A. Minaev^{1,*} , S. A. Ustinov³ , V. A. Petrov³ , A. D. Svecherevsky³ , and I. O. Nafigin³ 

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, Russia

****Correspondence to:** Vasilii Minaev, minaev2403@mail.ru.

The results of a comprehensive analysis of fault tectonics of the Kola Peninsula, carried out on a regional scale, are considered. Based on a digital relief model, generalized for various scale levels, lineaments were identified manually and automatically. The results obtained in combination with literature data made it possible to carry out tectonophysical reconstructions using the Hancock model. Based on the results of these reconstructions, the proposed areas of tectonic structures were identified that had the greatest hydraulic activity at the time of the introduction of mafic-ultrabasic massifs and dike complexes of pegmatite belts, which are associated with ore deposits of scarce types of strategic minerals of the Kola Peninsula (copper, nickel, chromium, rare metals, etc.) The areas were identified, promising for the discovery of new ore objects.

Keywords: Kola Peninsula, Baltic shield, faults, digital elevation model, remote sensing of the Earth, lineaments, tectonophysics, ore deposits, geographic information system, strategic metals.

Received: 15 April 2024

Accepted: 7 July 2024

Published: 21 August 2024



© 2024. The Authors.

Citation: Minaev, V. A., S. A. Ustinov, V. A. Petrov, A. D. Svecherevsky, and I. O. Nafigin (2024), Regional Remote Sensing Analysis of Fault Tectonics of the Kola Peninsula and Its Role in Ore Formation, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES3010, <https://doi.org/10.2205/2024ES000918>, EDN: NOVWIX

References

- Anderson E. M. The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society. — 1905. — Vol. 8, no. 3. — P. 387–402. — DOI: [10.1144/transed.8.3.387](https://doi.org/10.1144/transed.8.3.387).
- Enoh M. A., Okeke F. I., Okeke U. C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria // Geodesy and cartography. — 2021. — Vol. 47, no. 1. — P. 34–44. — DOI: [10.3846/GAC.2021.12099](https://doi.org/10.3846/GAC.2021.12099).
- Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. — 2001. — Vol. 88, no. 9. — P. 357–371. — DOI: [10.1007/s001140100253](https://doi.org/10.1007/s001140100253).
- Geological map of the Kola region / ed. by F. P. Mitrofanov. — Geological Institute Kola Science Center RAS, 2001.
- Grishkov G. A., Nafigin I. O., Ustinov S. A., *et al.* Development of a Technique for Automatic Lineament Allocation Based on a Neural Network Approach // Issledovanie Zemli iz Kosmosa. — 2023. — Vol. 2023, no. 6. — P. 86–97. — DOI: [10.31857/S0205961423060040](https://doi.org/10.31857/S0205961423060040).
- Gzovsky M. V. Fundamentals of Tectonophysics. — Moscow : Nauka, 1975. — P. 536.
- Hancock P. L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. — 1985. — Vol. 7, no. 3/4. — P. 437–457. — DOI: [10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3).
- Jaeger J. C., Cook N. G. W. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edition. — London : Chapman, Hall, 1979. — P. 593.
- Kozlov M. T. Rupture tectonics of the north-eastern part of the Baltic Shield. — Leningrad : Nauka, 1979. — P. 140.
- Lobanov K. V., Safonov Y. G. The Problem of Disseminated Gold Mineralization in the Kola Craton // Proceeding of Fersman scientific session of GI KSC RAS. — 2012. — No. 9. — P. 178–180. — EDN: WXPYTB.

- Mints M. V., Dokukina K. A. The Belomorian eclogite province (eastern Fennoscandian Shield, Russia): Meso-Neoproterozoic or Late Paleoproterozoic? // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2020. — Vol. 11, no. 1. — P. 151–200. — DOI: [10.5800/GT-2020-11-1-0469](https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-1-0469).
- Mintz M. V., Glaznev V. N., Konilov A. N., *et al.* Early Precambrian of the north-eastern Baltic Shield: Paleogeodynamics, structure and evolution of the continental crust. — Moscow : Scientific World, 1996. — P. 287. — EDN: SHMREV.
- Morozova L. N., Serov P. A., Kunakkuzin E. L., *et al.* The Kola Rare-Metal Pegmatite Belt: main features of the geological structure // *Proceeding of Fersman scientific session of GI KSC RAS*. — 2020. — Vol. 17. — P. 374–378. — DOI: [10.31241/FNS.2020.17.071](https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.071).
- Nikolaeva S. B., Evzerov V. Y. On Geodynamics of the Kola Region in the Later Pleistocene and Holocene: The Review and Results of the Studies // *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. — 2018. — No. 1. — P. 5–14. — EDN: YVHQNY.
- Orsoev D. A. Copper-Nickel Deposits of the Kola Nickeliferous Province (Murmansk Region, Russia) // *Izvestiya SB RAEN. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*. — 2011. — No. 1. — P. 47–56. — EDN: NXPOYF.
- Papilinski A. P. Directional filtering in edge detection // *IEEE Transactions on Image Processing*. — 1998. — Vol. 7, no. 4. — P. 611–615. — DOI: [10.1109/83.663510](https://doi.org/10.1109/83.663510).
- Petrov V. A., Sim L. A., Nasimov R. M., *et al.* Fault tectonics, neotectonic stresses, and hidden uranium mineralization in the area adjacent to the Strel'tsovka Caldera // *Geology of Ore Deposits*. — 2010. — Vol. 52, no. 4. — P. 279–288. — DOI: [10.1134/s1075701510040033](https://doi.org/10.1134/s1075701510040033).
- Pozhilenko V. I., Gavrilenko B. V., Zhirov D. V., *et al.* *Geology of Mineral Areas of the Murmansk Region*. — Apatity : Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2002. — P. 359. — EDN: RBLTLP.
- Rebetsky Y. L. Mechanism of Tectonic Stress Generation in the Zones of High Vertical Movements // *Fizicheskaya Mezomekhanika*. — 2008. — Vol. 1, no. 11. — P. 66–73. — EDN: IJRQTF.
- Rebetsky Y. L., Kuchai O. A., Sycheva N. A. Method of cataclastic analysis of faults and results of calculations of the modern stress state in the crust near plate boundaries and for intraplate mountain-folded orogens // *TECTONOPHYSICS AND TOPICAL ISSUES OF EARTH SCIENCES on the 40th anniversary of the establishment by M.V. Gzovsky of the laboratory of tectonophysics at the IPE RAS: materials of reports of the All-Russian conference: in 2 volumes. Volume 1*. — Moscow : IPE RAS, 2009. — P. 340–366. — EDN: XXCINF.
- Rebetsky Y. L., Sim L. A., Marinin A. V. From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms. — Moscow : GEOS, 2017. — P. 235. — EDN: YPNZQR.
- Samsonov A. V., Stepanova A. V., Arzamastsev A. A., *et al.* Petrological and geodynamic causes of the diversity of deposits of the large igneous province of 1.98 billion years in eastern Fennoscandia // *Physicochemical factors of petrogenesis and ore genesis: new frontiers. All-Russian conference dedicated to the 120th anniversary of the birth of the outstanding Russian scientist academician D. S. Korzhinsky*. — Moscow : IGEM RAS, 2019. — P. 185–188. — EDN: TOTABZ.
- Seminsky K. Z. Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect. — Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. — P. 243. — EDN: WPMWBH.
- Shvarev S. V. Morphotectonics, Seismicity, and Exogenous Processes of the Kola Peninsula // *Russian Geology and Geophysics*. — 2022. — Vol. 63, no. 8. — P. 940–954. — DOI: [10.2113/RGG20204310](https://doi.org/10.2113/RGG20204310).
- Sim L. A., Zhirov D. V., Marinin A. V. Stress and strain reconstruction for the eastern segment of the Baltic shield // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2011. — Vol. 2, no. 3. — P. 219–243. — DOI: [10.5800/GT-2011-2-3-0044](https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-3-0044).
- Sivkov D. V., Chitalin A. F., Dergachev A. L. The Application of Lineament Analysis to Identify Patterns of Localization of Gold Mineralization Within Taryn Gold Field in the Republic of Sakha // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. — 2020. — No. 1. — P. 3–19. — DOI: [10.31857/S020596142001011X](https://doi.org/10.31857/S020596142001011X).
- State geological map of the Russian Federation at a scale of 1:1,000,000. North Kara-Barents Sea series. R-(35),36 (Murmansk) / ed. by B. G. Lopatin. — Cartographic factory «VSEGEI», 2007.
- State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Baltic Series. Q-(35),36 (Apatity) / ed. by K. E. Jacobson. — Cartographic Factory «VSEGEI», 2012.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Baltic series. Q-37 (Arkhangelsk) / ed. by Y. B. Bogdanov. — Cartographic factory «VSEGEI», 2012.
- State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. North Kara-Barents Sea Series. R-(37),38 (Svyatoy Nos Cape - Kanin Nos Cape) / ed. by B. G. Lopatin. — Cartographic Factory «VSEGEI», 2008.
- Suzen M. L., Toprak V. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: An application to a fault zone in Central Turkey // *International Journal of Remote Sensing*. — 1998. — Vol. 19, no. 6. — P. 1101–1114. — DOI: [10.1080/014311698215621](https://doi.org/10.1080/014311698215621).

- Ustinov S. A., Petrov V. A. Use of Detailed Digi-Tal Relief Models for the Structural and Lineament Analysis (on Example of the Urtuysky Granite Massif, SE Transbaikalia) // *Geoinformatika*. — 2016. — No. 2. — P. 51–60. — EDN: WBKJRP.
- Utkin V. P., Mitrokhin A. N., Nevolin P. L. Strike-Slip Related Continental Rifting of the Eastern Margin of Asia // *Lithosphere (Russia)*. — 2016. — No. 4. — P. 2–59. — EDN: WWQSLF.
- Volkov A. V., Bortnikov N. S., Lobanov K. V., *et al.* Deposits of strategic metals in the Arctic region // *Proceeding of Fersman scientific session of GI KSC RAS*. — 2019. — Vol. 16. — P. 80–84. — DOI: [10.31241/FNS.2019.16.016](https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.016).
- Zobak M. D. *Geomechanics of Oil Deposits*. — Izhevsk : Institute of Computer Research, 2018. — P. 479.