

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТониКИ ТАЙМЫРО-СЕВЕРОЗЕМЕЛЬСКОГО ОРОГЕНА И ЕЕ РОЛИ В РУДООБРАЗОВАНИИ

© 2024 г. В. А. Минаев¹ *, С. А. Устинов¹, В. А. Петров¹,
А. Д. Свечеревский¹, И. О. Нафигин¹

¹ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: minaev2403@mail.ru

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

Представлены результаты комплексного анализа разломной тектоники Таймыро-Североземельского орогена. Исследования выполнены в региональном масштабе. На основе цифровой модели рельефа выделены линеаменты ручным и автоматическим способами. Полученные результаты в комплексе с литературными данными позволили провести тектонофизические реконструкции с использованием модели П.Л. Хэнкока (1985). На основе реконструкций определены предполагаемые участки тектонических структур, обладавшие наибольшей гидравлической активностью в ходе позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла, с которым связаны рудопроявления дефицитных видов стратегического минерального сырья Таймыра (золото, редкие металлы, медь, свинец, цинк и др.). Выделены участки, перспективные на обнаружение новых рудных объектов.

Ключевые слова: Таймыр, разломы, разрывная тектоника, цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, линеаменты, тектонофизика, рудные месторождения, геоинформационная система, стратегические металлы

DOI: 10.31857/S0205961424050048, EDN: RRSIFU

ВВЕДЕНИЕ

Таймыро-Североземельский регион является одним из самых слабоизученных в Арктической зоне Российской Федерации, что, очевидно, связано с его труднодоступностью. Тем не менее регион привлекает внимание исследователей уже несколько десятков лет, что во многом обуславливается высокими перспективами открытия новых месторождений дефицитных видов стратегического минерального сырья (Проскурнин, 2013; Проскурнин и др., 2021; Верниковский и др., 2022). На сегодняшний день промышленная добыча рудных полезных ископаемых в пределах полуострова Таймыр осуществляется только из золотоносных россыпей, что связано с удаленностью рассматриваемой территории от промышленных центров и практически отсутствием транспортно-энергетической инфраструктуры (Проскурнин и др., 2021).

Больше половины известных рудных объектов различных рангов на Таймыре имеют гидротермальную природу. Известно, что гидротермальные процессы контролируются разрывной тектоникой

(Черезов и др., 1992). Таким образом, мы можем говорить о разрывной тектонике как об одном из важнейших рудоконтролирующих факторов применительно к изучаемой территории.

Работ, посвященных изучению каркаса разрывных нарушений для Таймыро-Североземельского региона крайне мало. Все они сосредоточены на исследовании локальных участков (Брянцева и др., 2019; Овсяченко и др., 2023).

Известно, что большинство крупных разломов в составе Таймырской орогенной области заложены в ходе позднепалеозойско-раннемезозойской активизации, когда были сформированы складчатые сооружения. Далее эти структуры развивались унаследовано, в том числе и на современном этапе (Брянцева и др., 2019).

Перечисленные обстоятельства побудили авторов настоящей статьи провести анализ каркаса разрывных нарушений Таймырской части Таймыро-Североземельского региона с применением комплекса современных методов обработки данных дистанционного зондирования Земли и тек-

тонофизических реконструкций. Полученные результаты позволили составить схему потенциально перспективных участков на обнаружение рудных объектов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

В формировании Таймыро-Североземельской складчато-покровной области выделяются два главных этапа. В неопротерозое образован Центрально-Таймырский пояс, который аккретировал к Сибирскому континенту. На позднепалеозойском-раннетриасовом этапе развития региона

произошла коллизия Карского континента с Сибирью – образовался Таймыро-Североземельский (Карский) ороген и проявился трапповый магматизм (Верниковский и др., 2022). Непосредственно формирование Таймыро-Североземельского орогена происходило в течение приблизительно 90 млн. лет в карбоне-перми, явившись результатом косоугольной коллизии и правых сдвигов по коллизионным швам (Афанасенков и др., 2016).

В составе Таймыро-Североземельского орогена выделяются три зоны: Северо- (северный домен), Центрально- (центральный домен) и Южно-Таймырская (южный домен). Границами зон служат главные разломы – Главный Таймырский-Диабазовый и Пясино-Фаддеевский (Демина и др., 2018) (рис. 1). Из рисунка видно существенное отличие этих зон по

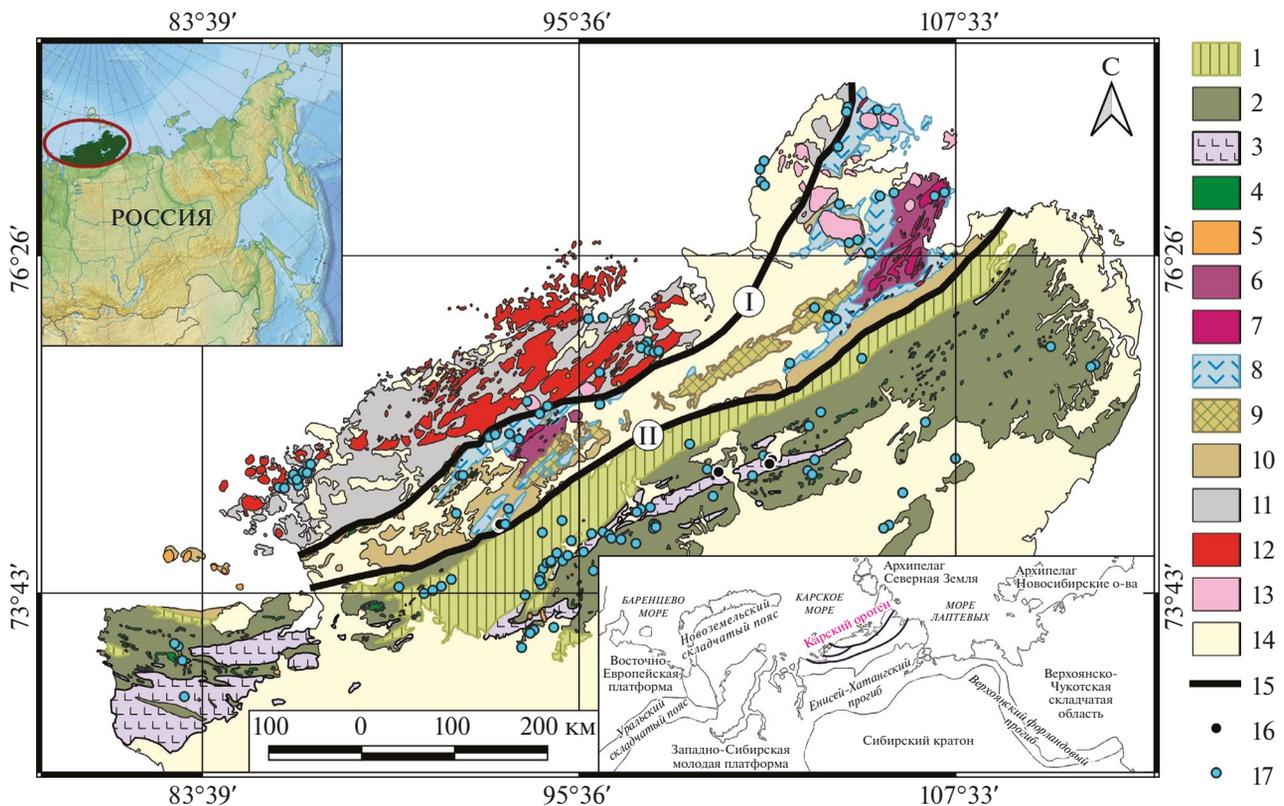


Рис 1. Схематическая тектоническая карта Таймыро-Североземельского орогена (составлена по материалам (Верниковский и др., 2022; Государственная..., 2009; 2011; 2013; 2014; 2015; 2020). 1–2 – южный домен – Южно-Таймырская складчатая зона (деформированная пассивная континентальная окраина Сибирской платформы): 1 – преимущественно доломиты и известняки (О–С₃); 2 – преимущественно песчаники, аргиллиты, угленосные отложения (С₃–Р₂); 3–5 – деформированные образования траппов (Р₃–Т₁): 3 – базальты и туфы, 4 – долеритовые силлы, 5 – щелочные сиениты, граниты, монцититы; 6–11 – центральный домен – Центрально-Таймырский аккреционный пояс: 6 – кратонные террейны, 7 – неопротерозойские гранитоиды (940–850 млн. лет), 8 – преимущественно островодужные комплексы (NP₁), 9 – террейны карбонатных комплексов, 10 – осадочный чехол (NP₃–С₁), 11 – северный домен – деформированные и метаморфизованные породы пассивной континентальной окраины Карского микроконтинента: ритмично переслаивающиеся метапесчаники, метаалевролиты, другие метапелиты, углистые сланцы (NP₃–Є); 12 – синколлизонные граниты; 13 – постколлизонные граниты; 14 – отложения юрско-четвертичного возраста, включая Енисей-Хатангский прогиб; 15 – главные разломы: I – Главный Таймырский-Диабазовый, II – Пясино-Фаддеевский; 16 – месторождения металлических полезных ископаемых (коренные); 17 – рудопроявления металлических полезных ископаемых.

геологическому строению, что отражает их различную историю формирования. При этом в Таймыро-Североземельском орогене на основе U-Th-Pb изотопных данных для цирконов выделены стадии синколлизийного – 315–282 млн лет, и постколлизийного – 264–248 млн лет назад, гранитоидного магматизма, отличающиеся по петрохимическим и геохимическим особенностям (Верниковский и др., 2022). Гранитоидный магматизм сменился интенсивным трапповым на границе перми и триаса (249–242 млн лет назад). Проявления последнего особенно широко развиты в Южно-Таймырской зоне и представлены туфобазальтовой, габбро-долеритовой, троктолит-габбро-долеритовой формациями. Предполагается, что причина возникновения траппового магматизма заключается в откате слэба Карского континента в ходе коллизии и подъеме частично расплавленной астеносферной мантии (Демина и др., 2018).

Металлогения Северо- и Южно-Таймырской зон различна. В Северо-Таймырской зоне выявлены многочисленные золоторудные проявления в ареалах развития гранитоидных интрузий Центрально-Арктического медно-порфирикового пояса (ЦАП).

В Южно-Таймырской зоне размещаются, в основном, медные, медно-никелевые, полиметаллические, ртутные и флюорит-баритовые проявления (Галымов и др., 2022). Ведущую роль в формировании золотосодержащих медно-молибден-порфириковых проявлений Центрально-Арктического пояса играют позднепалеозойско-раннемезозойские плутоногенно-гидротермальные внутриинтрузивные рудоформирующие системы (Проскурнин и др., 2021).

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 лаборатории геоинформатики ИГЕМ РАН (Устинов, Петров, 2016). Методика эффективна даже в областях со слабо расчлененным рельефом. ЦМР территории создана с использованием открытых данных радарной интерферометрической съемки поверхности земного шара ASTER GDEM (Global

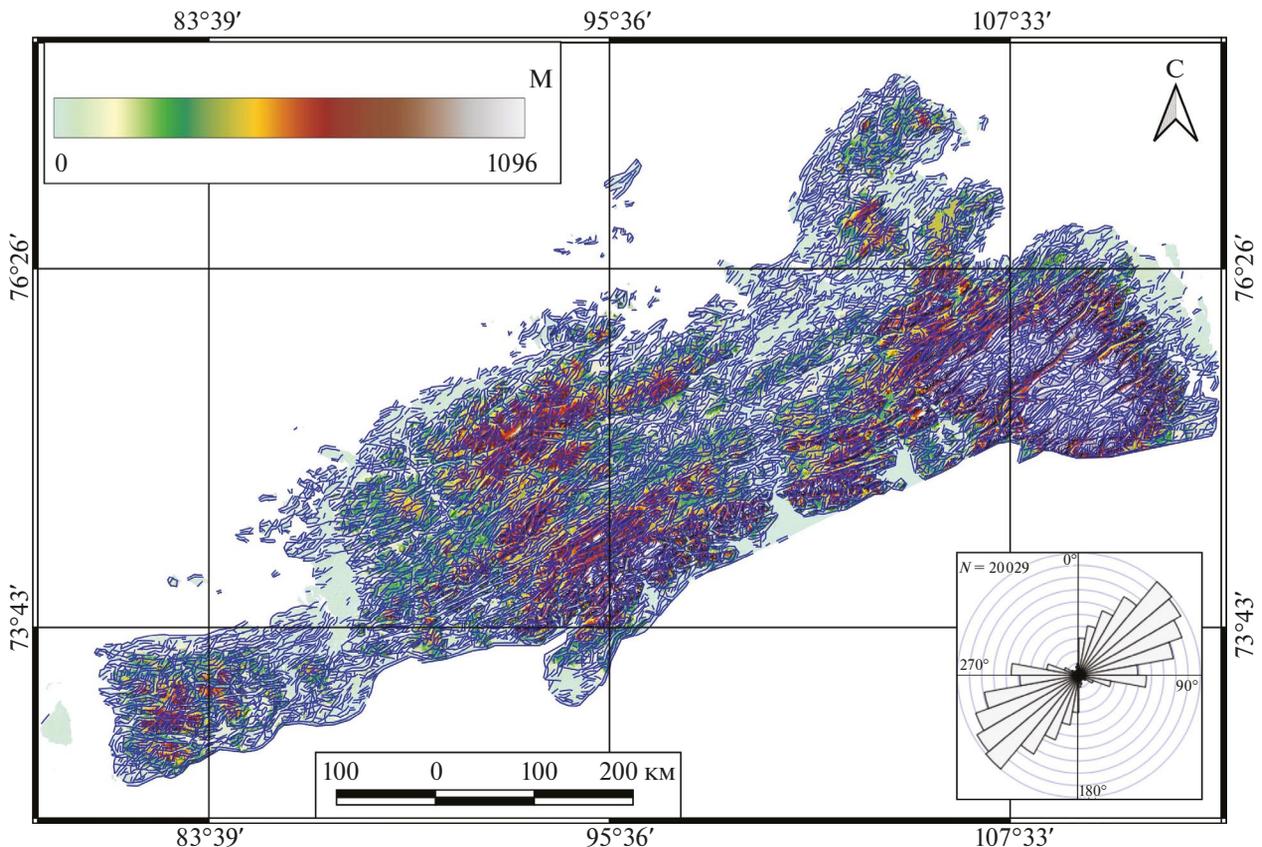


Рис. 2. Визуализированная в ГИС-среде цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 1 км/пиксель с выделенными созданной нейросетью линеаментами (синие линии) и розой-диаграммой их ориентировок. Цветовая шкала отражает высотные отметки рельефа.

Digital Elevation Model) третьей версии. В работе использовалась модель с уровнем генерализации 1 км на пиксель.

Результаты съемки представляют собой растровые изображения со значениями высотных отметок рельефа для каждого пиксела в формате GeoTIFF, содержащем метаданные о географической привязке (рис. 2). Линеаменты на ЦМР выявлялись с помощью разработанного с участием авторов данной статьи программного обеспечения на основе нейросетевых технологий (Гришков и др., 2023). Данный подход, учитывая высокое пространственное разрешение используемой ЦМР, позволил выделить на территории множество непротяженных линеаментов (20 029 шт.), которые могут быть проинтерпретированы в качестве так называемых “мегатрещин”, опережающих 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 не-

линейной 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 (Paplinski, 1998; Suzen, Toprak, 1998; Enoh et. al., 2021), 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.

При этом, учитывая небольшое количество наблюдаемых протяженных линеаментов (6 715 шт.), которые могут соответствовать крупным зонам разрывных нарушений, нами принято решение выделить их в ручном режиме (рис. 3).

В соответствии с теорией разломообразования (Anderson, 1905), выделяются три основных типа разломов: сбросы, сдвиги и надвиги.

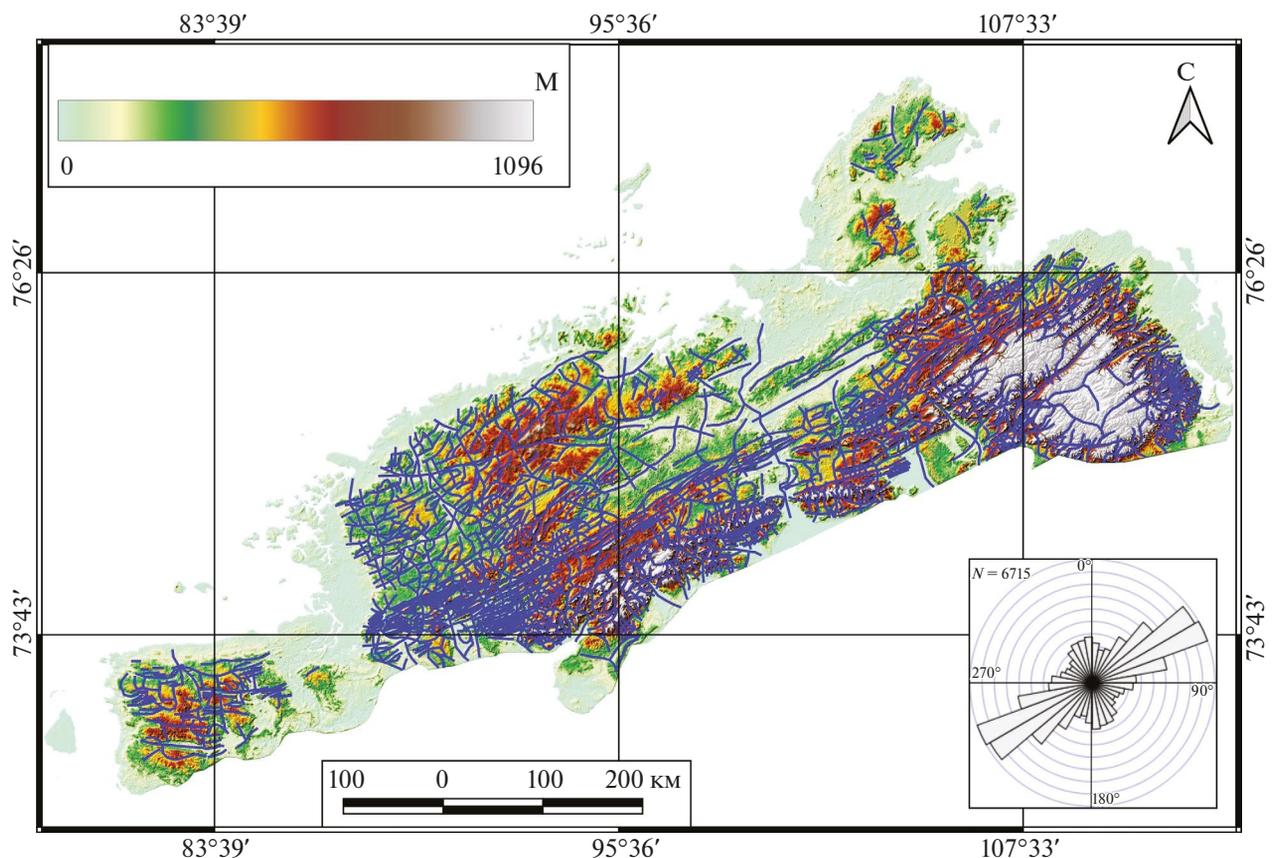


Рис. 3. Визуализированная в ГИС-среде цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 1 км/пиксель с выделенными ручным способом протяженными линеаментами (синие линии) и розой-диаграммой их ориентировок. Цветовая шкала отражает высотные отметки рельефа.

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).

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 оперяющих 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 (Семинский, 2003; Ребецкий и др., 2017). 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 (Гзовский, 1975). 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 (Hancock, 1985; Семинский, 2003).

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. 4). Эта модель использовалась в качестве основной в нашем исследовании.

Специально для решения задач исследования написано программное обеспечение (ПО) “Lineament Stress Calculator” (автор А.Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН), используемое для интерпретации ориентации выделенных линеаментов по модели П.Л. Хэнкока.

На основе реконструкции ориентировки оси главных сжимающих или растягивающих усилий

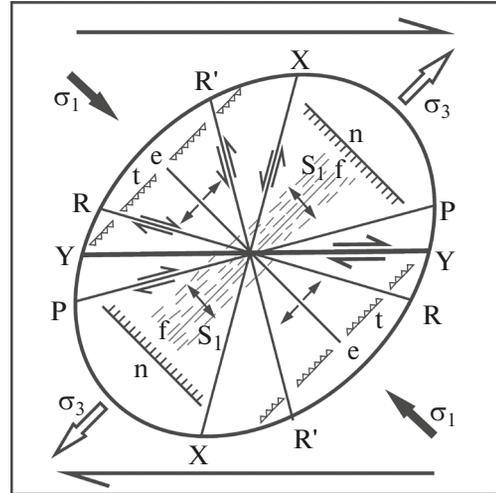


Рис. 4. Системы эшелонированных структурных элементов, образующихся в сдвиговой разломной зоне при простом скалывании (Hancock, 1985): Y – магистральный сдвиг, R и R' – сопряженные сколы Риделя, X, P – вторичные сдвиги, e – отрывы, n – сбросы, t – взбросы, f – складки, S₁ – кливаж, σ₁ – ось максимального сжатия, σ₃ – ось максимального растяжения.

в регионе для каждой из зон динамического влияния разрывных нарушений возможно визуализировать сегменты структур, в различной степени предрасположенные к сдвигу, участки концентрации и расщепления деформаций.

Сдвиговые (τ) и эффективные (σ_n) нормальные напряжения можно рассчитать по формуле (Jaeger and Cook, 1979):

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

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

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. 5).

Тенденция к сдвигу (μ) определенного 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 обладают μ ≈ 0,6 (Jaeger, Cook, 1979; Fuchs, Müller, 2001).

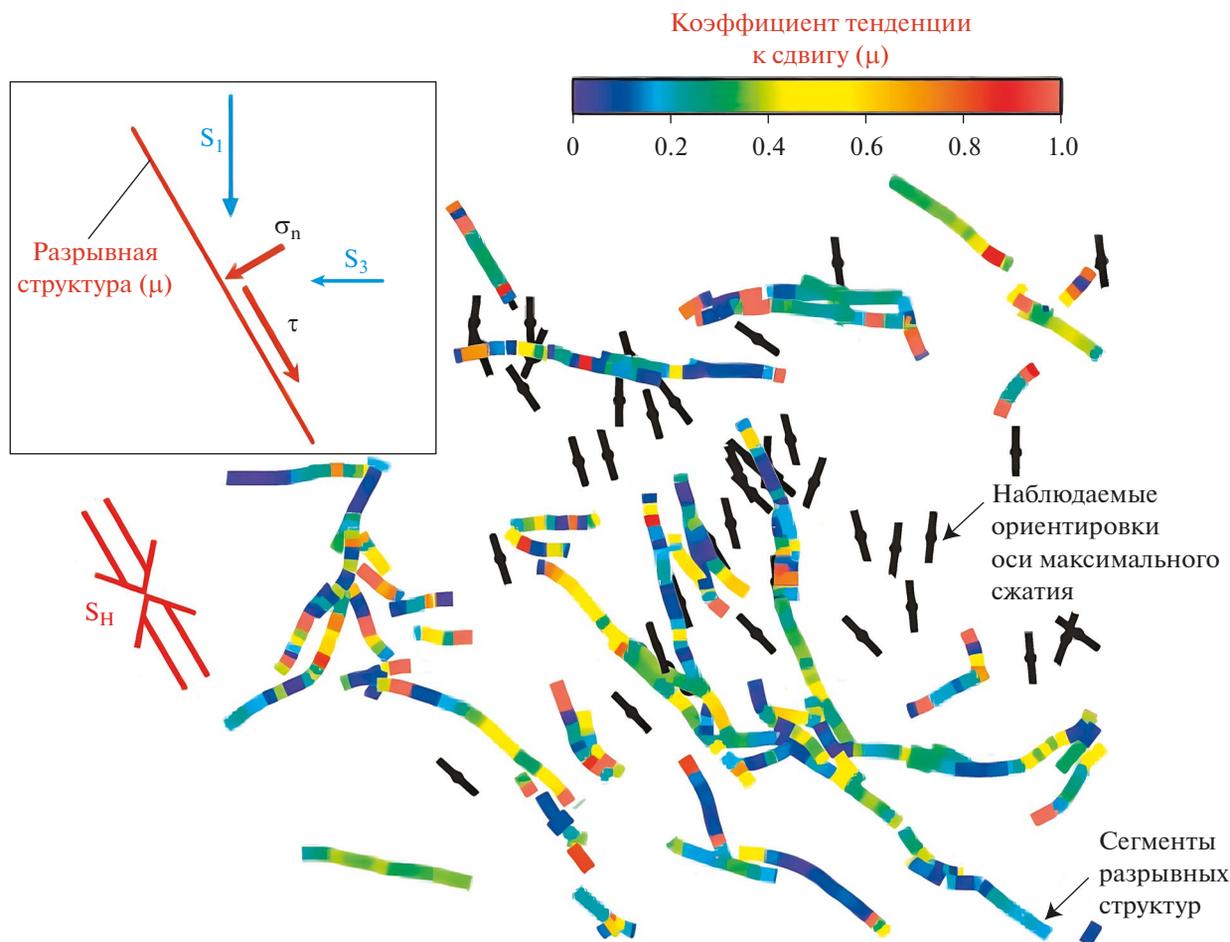


Рис. 5. Общая схема определения тенденции к сдвигу (μ) на основе комбинации ориентировок региональных анизотропных напряжений (черные символы – ориентировка оси максимального сжатия) с ориентировками сегментов разрывных структур с расчетом отношения сдвигового (τ) к нормальному напряжению (σ_n) для сегментов 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 (Fuchs, Müller, 2001).

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. 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 усредненным значениям касательных напряжений для современных обстановок внутриплитового орогенеза и субдукционных областей и границ ли-

тосферных плит (Ребецкий и др., 2008). 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

В первую очередь изучены существующие карты регионального масштаба, на которых вынесена ин-

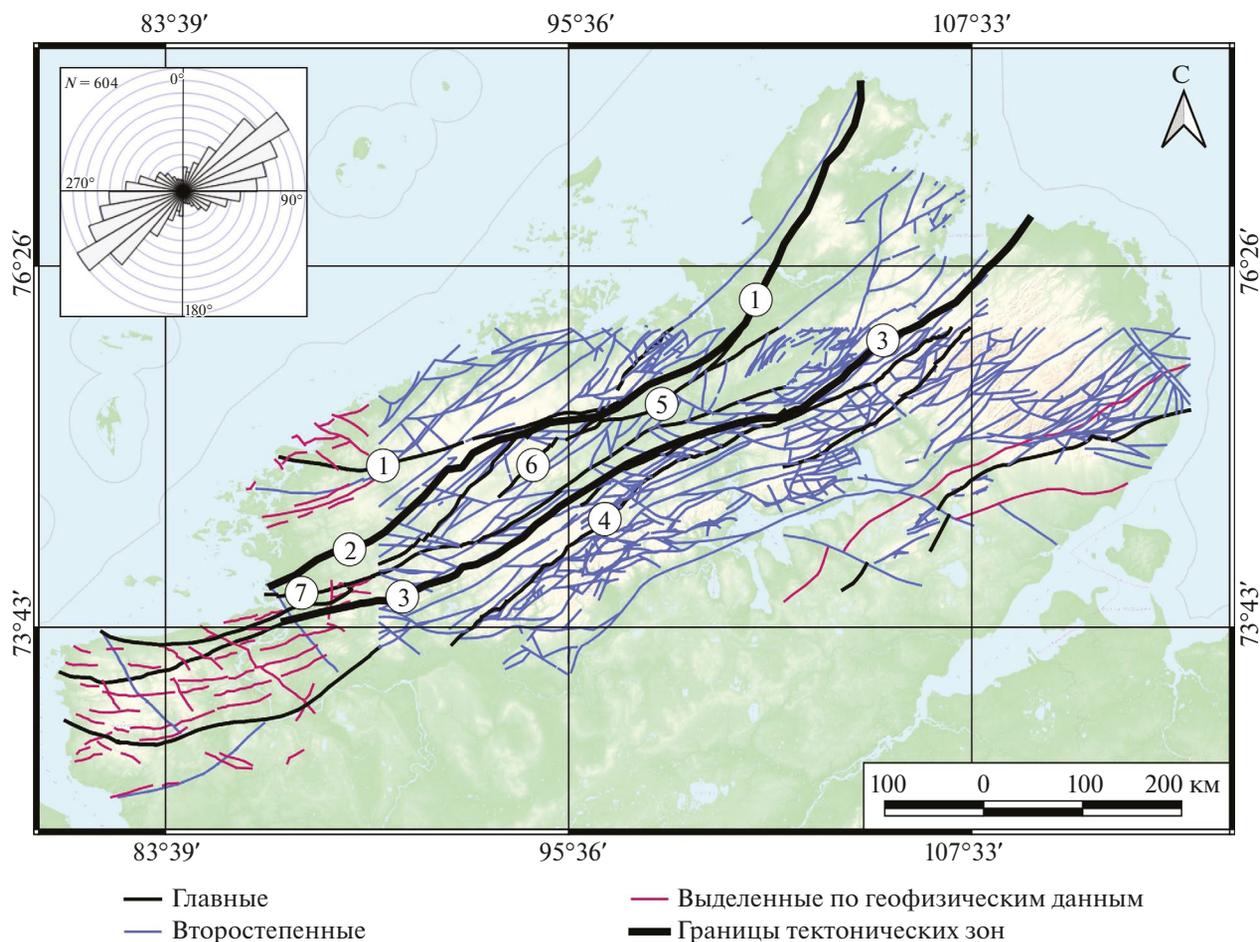


Рис. 6. Схема пространственного распределения разрывных нарушений Таймыро-Североземельского орогена по материалам государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000, и роза-диаграмма их ориентировок. Разломы: 1 – Главный Таймырский; 2 – Диабазовый; 3 – Пясино-Фаддеевский; 4 – Пограничный; 5 – Мамонтово-Ярский; 6 – Чукчинский; 7 – Северо-Пясинский. N – количество разломов.

формация о местоположении разрывных нарушений. Государственные геологические карты миллионного масштаба (листы S-44, S-45; S-46; S-47; S-48; S-49; T-45-48 (Государственная..., 2009; 2011; 2013; 2014; 2015; 2020) содержат весьма ограниченную информацию о каркасе разрывных нарушений (рис. 6).

На карте явно видны главные магистральные разломы северо-восточного простирания (Главный Таймырский, Пясино-Фаддеевский, Пограничный и др.). Кроме того, очевидна неравномерность изученности каркаса разрывных нарушений на разных листах геологических карт, что не позволяет ограничиться этой информацией в ходе наших исследований.

Совокупный анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы: на территории Таймыро-Североземельского орогена существуют две наиболее протяженные магистральные зоны северо-восточного простирания – Главного

Таймырского-Диабазового и Пясино-Фаддеевского разломов. Эти разломы являются разделителями Северо-, Центрально- и Южно-Таймырской тектонических зон. Являясь в настоящее время надвигами, сформированы они были как правосторонние сдвиги в ходе косой коллизии Карского микроконтинента и Сибири в позднем палеозое. Позднее магистральные разломы были осложнены сдвигами северо-западного простирания.

При этом для позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла предполагается тектонический режим сжатия с СЗ на ЮВ-субширотный, что отражается в простирании даек и интрузивов (Проскурнин, 2013).

В целях дополнения каркаса разрывных нарушений было принято решение выделить ручным способом протяженные линеаменты на основе ЦМР с разрешением 1 км/пикс (см. рис. 3). Такие линеаменты могут маркировать долгоживущие раз-

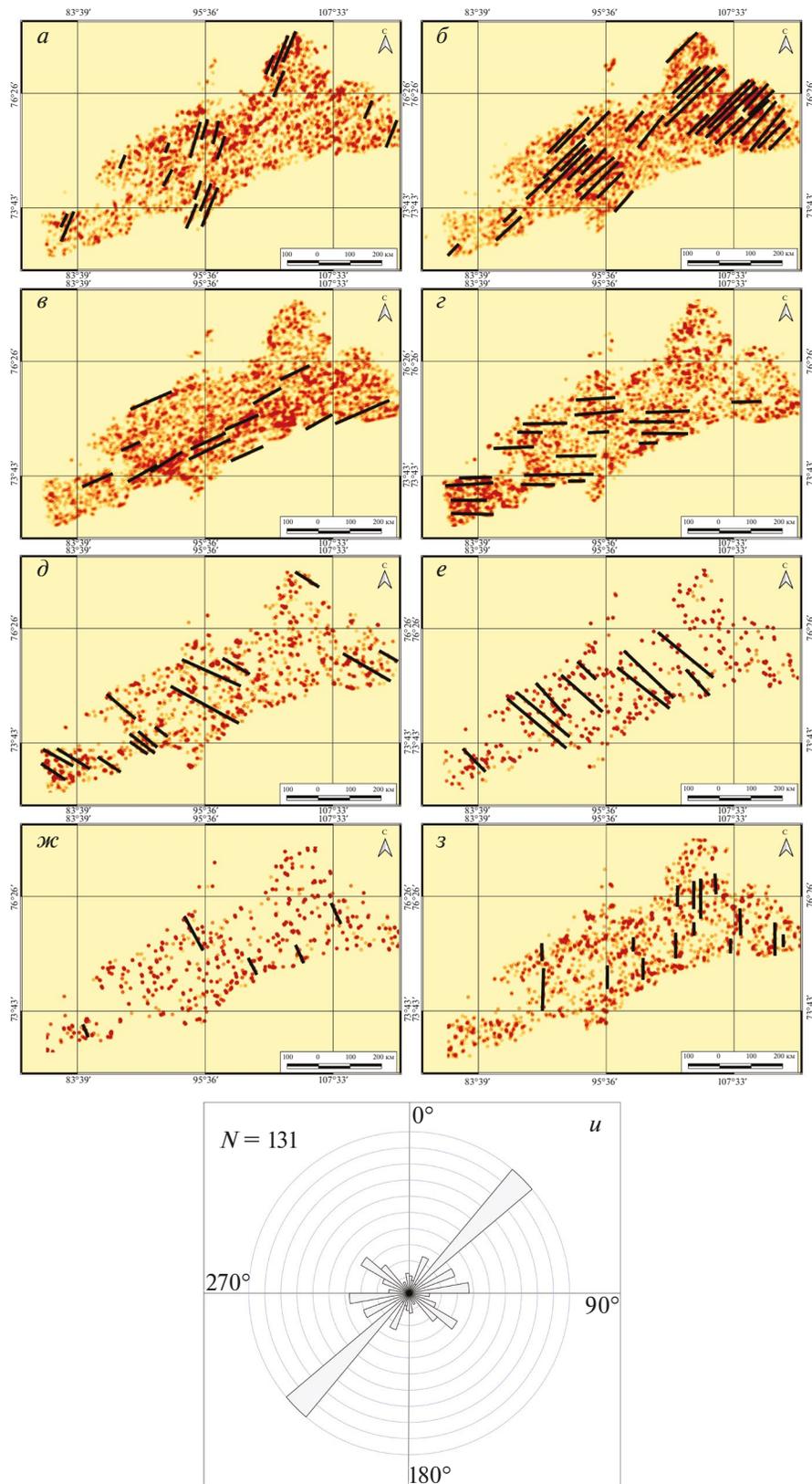


Рис. 7. *a–з* – схемы относительных удельных плотностей линейментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами (показаны жирными линиями черного цвета) по методике (Сивков и др., 2020): *a* – 11° – 34° ; *б* – $33,5^{\circ}$ – $56,5^{\circ}$; *в* – 56° – 79° ; *г* – $78,5^{\circ}$ – $101,5^{\circ}$; *д* – 101° – 124° ; *е* – $123,5^{\circ}$ – $146,5^{\circ}$; *ж* – 146° – 169° ; *з* – $168,5^{\circ}$ – $11,5^{\circ}$; *u* – роза-диаграмма ориентировки трендов линейментов. *N* – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

ломные зоны. На розе-диаграмме явно выделяется система структур с северо-восточным простиранием, соответствующая магистральным разломам и менее развитая север-северо-западного простирания. Последняя, по-видимому, соответствует более молодым (по отношению к магистральным) разломам (Брянцева и др., 2019).

Еще одна методика выделения и заверки крупных разрывных зон была предложена Д.В. Сивковым и соавторами (Сивков и др., 2020). В ее основе лежит анализ пространственного положения и создания схем плотности непротяженных линейных элементов, выделяемых автоматически различными программными средствами. Для каждого линейного сегмента выделенных с помощью нейронной сети линейных элементов (на основе ЦМР с разрешением 1 км/пиксель) нами рассчитан и присвоен в виде атрибута истинный азимут его простирания. На основе этого атрибута проведено ранжирование линейных элементов по классам и построены восемь схем относительных удельных плотностей линейных объектов с шагом в $22,5 \pm 11,25^\circ$ (рис. 7).

На всех схемах наблюдаются локальные максимумы относительной удельной плотности линейных элементов, которые выстраиваются в линейные “цепочки” и формируют некоторые тренды. Подобные тренды образуют множество копланарных линейных элементов. Соответственно, выстраивающиеся в линию максимумы относительной удельной плотности, совпадающие по азимуту с линейными элементами определенных ориентировок, будут маркировать крупные линейные геологические объекты, наиболее вероятно, зоны протяженных разломов.

На обобщенной розе-диаграмме трендов линейных элементов (см. рис. 7*и*) явно выделяются система северо-восточного простирания, а также две менее развитые системы – северо-западная и субширотная.

Несмотря на единые время и природу формирования, для реконструкции параметров ПНД на основе модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) было решено выделить две условные сдвиговые блок-зоны – Главная Таймырско-Диабазовая и Пясино-Фаддеевская. Такое решение обусловлено как значительным расстоянием между исследуемыми магистральными разломами, так и неоднородностью составов и металлогении тектонических зон Таймыро-Североземельского орогена.

Важно отметить, что в целях повышения однородности результатов линейного анализа обе блок-зоны были урезаны в северо-восточной области. Дело в том, что северо-восточная часть Главной Таймырско-Диабазовой блок-зоны в значительной степени перекрыта отложениями юрско-четвертичного возраста, а северо-восточная область Пясино-Фаддеевской блок-зоны представ-

лена северо-восточным окончанием гор Бырранга, где обширное горное плато, которому принадлежат наибольшие высотные отметки для изучаемой территории, резко погружается под четвертичные прибрежно-морские осадки приморской низменности (см. рис. 1). Эти обстоятельства в значительной степени ограничили возможность выделения линейных элементов ручным способом в северо-восточной части Таймыро-Североземельского орогена (см. рис. 3).

Блок-зоны состоят из условной линии (“тренда”) исследуемого сдвига и самих элементов разрывной тектоники, которые могут быть представлены разломами или линейными элементами. В целях корректной реконструкции последние разделены на прямолинейные сегменты. Ширина (условная “зона влияния”) блок-зон определялась экспериментальным способом, так как традиционное понятие “зоны тектонического влияния разлома” не вполне подходит изучаемым структурам надрегионального масштаба. Для каждой блок-зоны восстанавливалось ПНД для различных по размеру “зон влияния” – от 10 до 100 км с шагом в 10 км. Установлено, что для обеих блок-зон ориентировки главных напряжений ПНД сохранялись при ширине “зоны влияния” от 10 км до нескольких десятков километров. Перемена ориентировки напряжений не происходила, что подтверждает единую природу Главной Таймырско-Диабазовой и Пясино-Фаддеевской блок-зон. Для визуализации нами для обеих зон установлены равные “зоны влияния” приблизительно 70 км.

Рассмотрим полученные результаты реконструкции ПНД согласно модели П.Л. Хэнкока. В качестве входных данных использованы выделенные вручную протяженные линейные элементы (рис. 8*а*, 9*а*) и тренды линейных элементов (рис. 8*б-г*, 9*б-г*). В первом случае для обеих блок-зон ось регионального максимального сжатия имела юго-восточную (ближе к субширотной) ориентировку ($\approx 115^\circ$), а ось регионального максимального растяжения характеризовалась северо-восточным (ближе к субмеридиональному) направлением ($\approx 25^\circ$) (см. рис. 8*а*, 9*а*). Такая ситуация согласуется с представлениями В.Ф. Проскурнина о тектоническом режиме в ходе позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла (Проскурнин, 2013). При этом сама шовная зона в нашей модели (У-трещины) однозначно интерпретируется как правый сдвиг, что также согласуется с мнением исследователей (Афанасенков и др., 2016; Верниковский и др., 2022).

Рассмотрим результаты реконструкции ПНД на основе других входных данных – трендов линейных элементов. В случае, когда “тренд” разлома проведен согласно трассе магистрального разлома (см. рис. 8*б*; 9*б*), ориентировка осей главных напряжений совпадает с результатами реконструкций для протяженных линейных элементов, выделенных вруч-

ную. Однако, если обратить внимание на розы-диаграммы, то можно заметить, что система структур северо-восточного простирания, совпадающая с трассой магистрального разлома, проявлена не столь явно, как система с азимутом $\approx 45^\circ$. Согласно модели П.Л. Хэнкока последние интерпретируются как R-трещины, то есть вторичные сколы по отношению к магистральному разлому. Для них мы также реконструировали ПНД (см. рис. 8в, 9в), получив результаты соответствующие модели для протяженных линеаментов, выделенных ручным способом (с учетом изменения “тренда” разлома). Кроме того, на розе-диаграмме для обеих блок-зон значительно проявлена и ортогональная си-

стема с азимутом $\approx 305^\circ-315^\circ$. Вероятно, что таким образом выражается парагенезис более молодых сдвигов северо-западного простирания, осложняющих магистральные разломы. Они развивались уже при других параметрах ПНД, на что указывают результаты палеореконокструкций (см. рис. 8г, 9г). Очевидно, разломы северо-западного простирания требуют дальнейшего изучения, в том числе с точки зрения их относительного датирования.

Таким образом предполагаем, что восстановлены региональные ориентировки главных осей ПНД для двух блок-зон на время позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла.

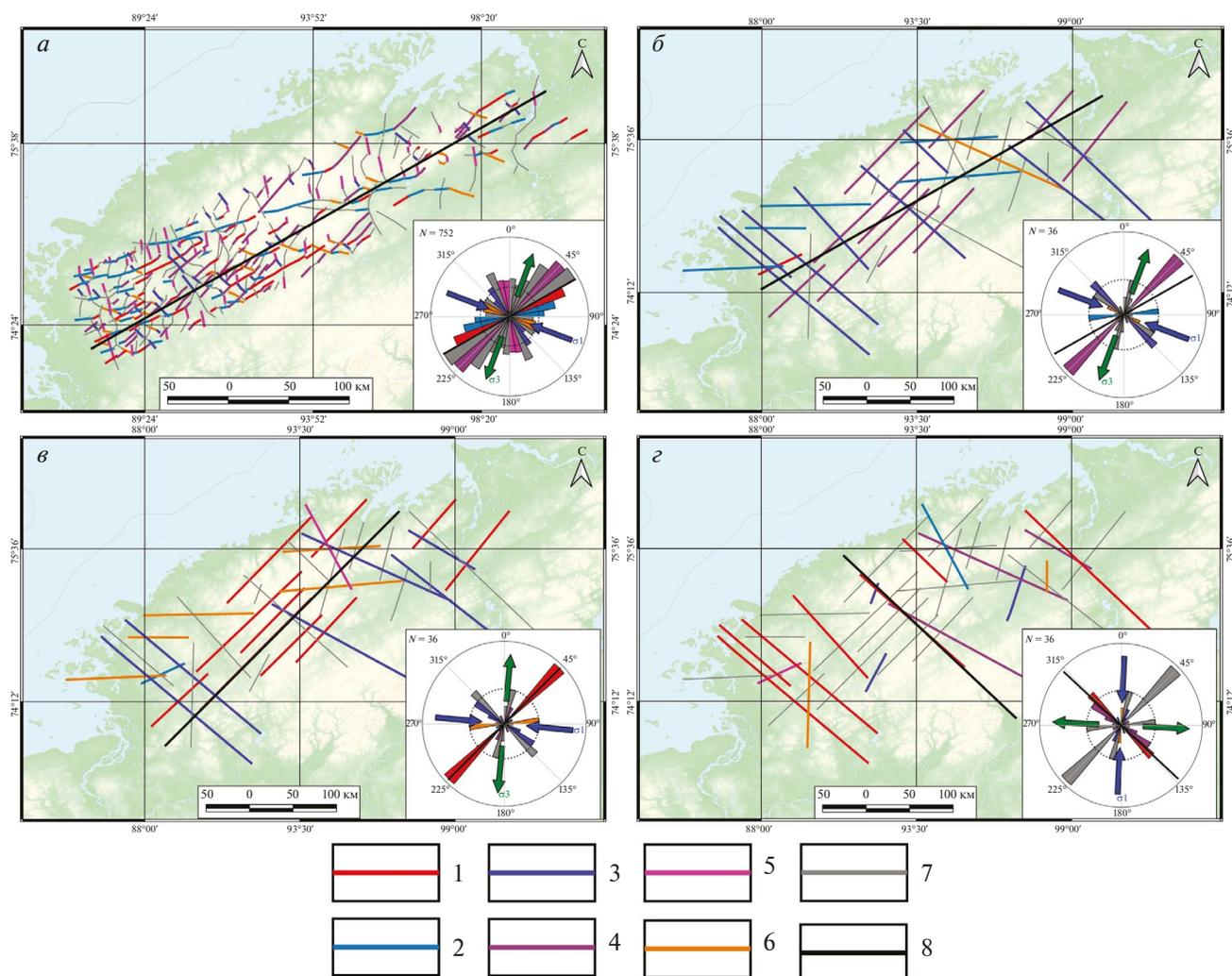


Рис. 8. а–г – Реконструкция ПНД для Главной Таймырско-Диабазовой блок-зоны на основе модели П.Л. Хэнкока для: протяженных линеаментов, выделенных вручную (а); трендов плотностей линеаментов: с линией сдвига, проведенной согласно трассе разлома (б); с линией сдвига, проведенной согласно преобладающей системе вторичных сколов (в); г – с линией сдвига, проведенной согласно северо-западной системе трендов линеаментов. 1 – Y-трещины; 2 – R-трещины; 3 – R'-трещины; 4 – P-трещины; 5 – X-трещины; 6 – T-трещины; 7 – не определено; 8 – “тренд” разлома (линия сдвига). Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зеленые стрелки – ориентировка оси максимального растяжения. N – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

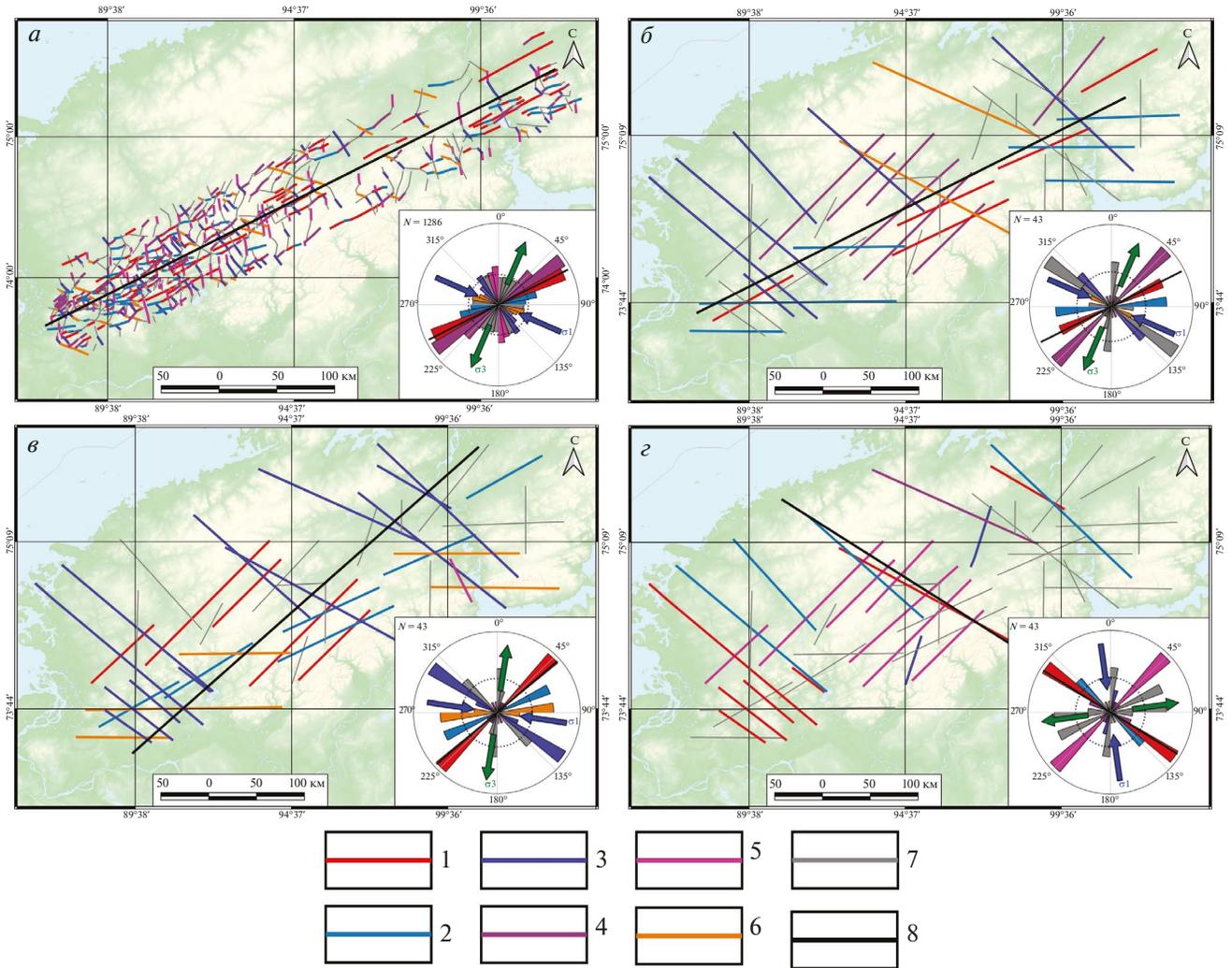


Рис. 9. *а–г* – Реконструкция ПНД для Пясино-Фаддеевской блок-зоны на основе модели П.Л. Хэнкока для: протяженных линеаментов, выделенных вручную (*а*); трендов плотностей линеаментов: с линией сдвига, проведенной согласно трассе разлома (*б*); с линией сдвига, проведенной согласно преобладающей системе вторичных сколов (*в*); *г* – с линией сдвига, проведенной согласно северо-западной системе трендов линеаментов. 1 – Y-трещины; 2 – R-трещины; 3 – R'-трещины; 4 – P-трещины; 5 – X-трещины; 6 – T-трещины; 7 – не определено; 8 – “тренд” разлома (линия сдвига). Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зеленые стрелки – ориентировка оси максимального растяжения. N – количество объектов, использованных для построения розы-диаграммы.

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 трансенсии. Расчеты проводились для разломов, отраженных на Государственной геологической карте, и трендов плотностей линеаментов, выделенных по методике (Сивков и др., 2020), как сомасштабных объектов (рис. 10).

В связи с едиными параметрами реконструированного ПНД, вычисления коэффициента тен-

денции к сдвигу (μ) проводились совместно для Главной Таймырско-Диабазовой и Пясино-Фаддеевской блок-зон.

В результате сегменты рассматриваемых структур классифицированы от непроницаемых до высокопроницаемых и представлены на объединенной схеме (см. рис. 10*а*). Для наглядности построена схема зон влияния сегментов разломов и сегментов трендов плотностей линеаментов проницаемых и повышенной проницаемости (см. рис. 10*б*).

При этом ширина зоны влияния для всех структур принята условно 10 км. Необходимо отметить, что разломы северо-западного простирания сфор-

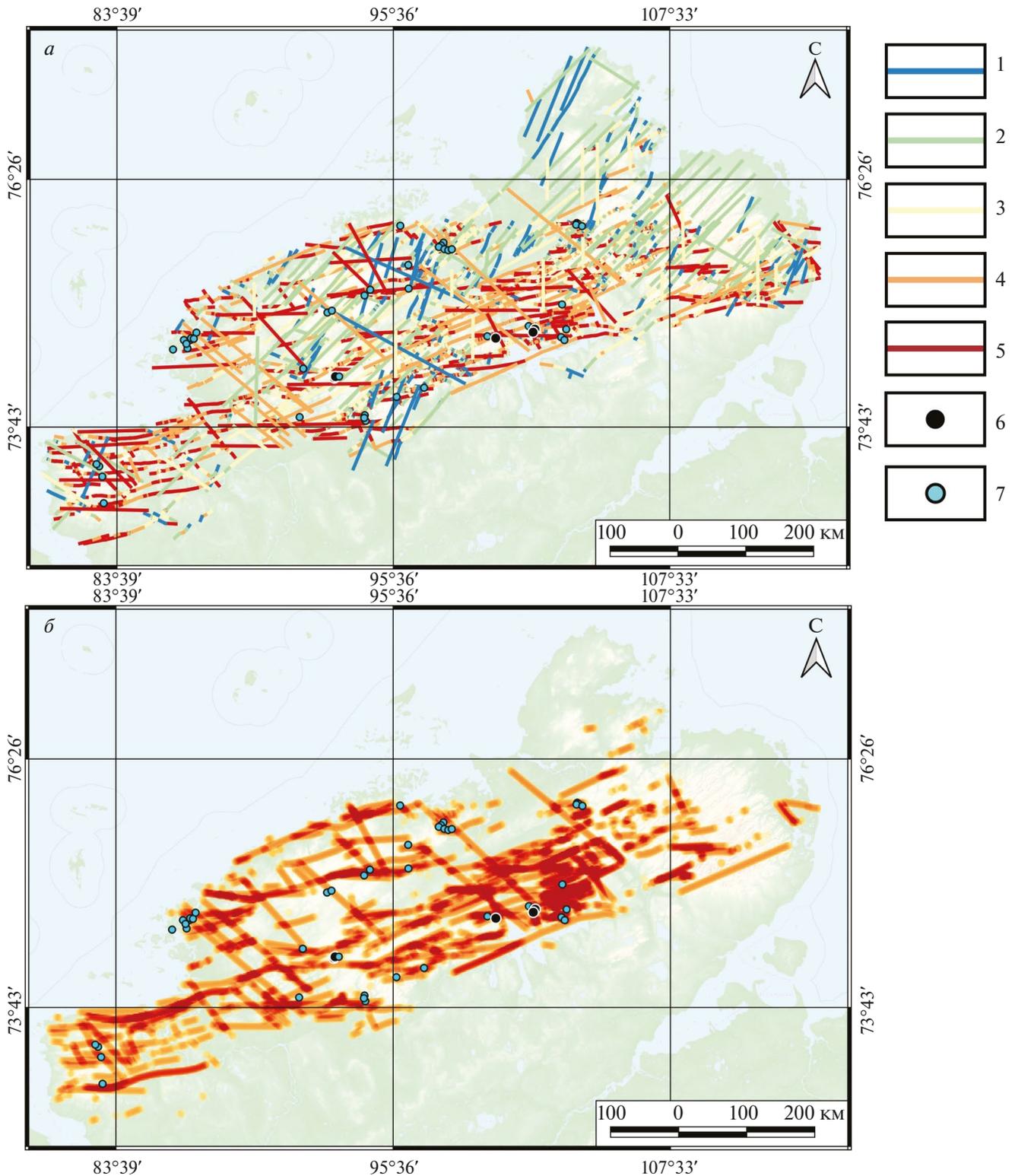


Рис. 10. Результаты реконструкции гидравлической активности сегментов тектонических элементов: *a* – классифицированные сегменты всей разломной сети Государственной геологической карты и трендов плотностей линеаментов; *б* – схема зон влияния (оранжевые линии) сегментов разломов и сегментов трендов плотностей линеаментов проницаемых и повышенной проницаемости. Участки перекрытия зон влияния нескольких разломов окрашены красным. 1 – непроницаемые сегменты; 2 – слабопроницаемые сегменты; 3 – сегменты средней проницаемости; 4 – проницаемые сегменты; 5 – сегменты повышенной проницаемости, 6 – гидротермальные месторождения металлических полезных ископаемых; 7 – гидротермальные рудопроявления полезных ископаемых.

мировались в ПНД отличном от коллизионного. Однако в связи с их относительно малым количеством принято решение включить их в расчеты.

Из приведенных рисунков видно, что за исключением одного рудопроявления, все рудные объекты гидротермального генезиса попали в условные зоны влияния структур проницаемых и повышенной проницаемости на время позднепалеозойско-раннемезозойского тектоно-минерагенического цикла, что подтверждает наши расчеты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

Для территории Таймыро-Североземельского орогена проведен комплексный структурно-линеamentный анализ на основе различных данных и научно-методических подходов, в том числе авторских, к выделению линеamentов с использованием цифровой модели рельефа, включая ее разнонаправленную фильтрацию, и применением геоинформационных технологий.

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 исследуемой территории. Результаты палеореконструкций отвечают конкретным обстановкам, выявленным ранее другими исследователями (Проскурнин, 2013; Афанасенков и др., 2016; Верниковский и др., 2022) на основе применения иного научно-методического подхода.

Расчет показателя тенденции к сдвигу (транстенсии) с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур.

С точки зрения прогноза размещения полезных ископаемых, дальнейшие детализирующие работы необходимо сосредоточить на изучении зон влияния гидравлически активных разломов северо-восточного простирания. Данные надрегиональные и региональные структуры могли выступать в качестве флюидоподводящих в процессе гидротермального рудообразования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в молодежной 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

- Афанасенков А.П., Никишин А.М., Унгер А.В., Бордунов С.И., Луговая О.В., Чикишев А.А., Яковичина Е.В.* Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника. 2016. № 2. С. 23–42.
- Брянцева Г.В., Демина Л.И., Промышлова М.Ю., Косевич Н.И.* Новейшие структуры Западного Таймыра // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2019. № 6. С. 17–23.
- Верниковский В.А., Полянский О.П., Бабичев А.В., Верниковская А.Е., Проскурнин В.Ф., Матушкин Н.Ю.* Тектонотермальная модель для позднепалеозойского синколлизийного этапа формирования Карского орогена (Северный Таймыр, Центральная Арктика) // Геология и геофизика. 2022. № 4. С. 440–457.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Мурашов К.Ю.* Пространственная связь металлогении с глубинными структурами Таймыра // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 42–46.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-48 (оз. Таймыр, восточная часть). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф., Межубовский В.В., Трофимов В.В. Гл. научн. ред.: Проскурнин В.Ф. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2009.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Северо-Карско-Баренцевоморская и Таймырско-Североземельская серии. T-45-48 (м. Челюскин). Авторы: Макарьева Е.М., Гавриш А.В. Гл. научн. ред.: Шнейдер Г.В. ФГУП “ПМГРЭ”, 2011.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-49 (Хатангский залив). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф., Межубовский В.В. Гл. научн. ред.: Проскурнин В.Ф. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2013.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-46 (р. Тарей). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф. Гл. научн. ред.: Нагайцева Н.Н. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2014.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-47 (оз. Таймыр, западная часть). Авторы: Гавриш А.В., Проскурнин В.Ф. Гл. научн. ред.: Проскурнин В.Ф. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2015.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Таймырско-Североземельская серия. S-44 (Диксон), S-45 (Усть-Тарей). Авторы: Макарьева Е.М., Молчанова Е.В. Гл. научн. ред.: Гусев Е.А., Нагайцева Н.Н. Картографическая фабрика “ВСЕГЕИ”, 2020.
- Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А.* Разработка методики автоматического выделения

- линементов на основе нейросетевого подхода // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86–97.
- Демина Л.И., Захаров В.С., Промышлова М.Ю., Завьялов С.П. Соотношение коллизионного и траппового магматизма Таймыра по геологическим данным и результатам моделирования // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2018. № 1. С. 16–25.
- Зобак М.Д. Геомеханика нефтяных залежей. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. 479 с.
- Овсяченко А. Н., Жостков Р. А., Едемский Д. Е., Собисевич А.Л., Сысолин А.И., Преснов Д.А. Активная тектоника северо-восточного Таймыра (горы Бырранга) и вопросы сейсмотектонической регионализации Российской Арктики // Физика Земли. 2023. № 6. С. 207–223.
- Петров В.А., Сим Л.А., Насимов Р.М., Шукин С.И. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельцовой кальдеры // Геология рудных месторождений. 2010. Том 52. № 4. С. 310–320.
- Проскурнин В.Ф. Минерагенический анализ Таймыро-Североземельского региона и оценка его золотоносного потенциала. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. СПб., 2013, 45 с.
- Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Романов А.П., Курбатов И.И., Гавриш А.В., Проскурнина М.А. Центральнo-Арктический золотоносный медно-молибден-порфировый пояс // Региональная геология и металлогения. 2021. № 85. С. 31–49.
- Ребецкий Ю.Л. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений // Физическая мезомеханика. 2008. № 11. Т.1. С. 66–73.
- 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 Всероссийской конференции (13–17 октября 2008 г.). М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2009. Т. 1. С. 340–366.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 235 с.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал “ГЕО”, 2003. 243 с. EDN: WPMWBH
- Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л. Применение линементного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 3–19.
- Устинов С.А., Петров В.А. Использование детальных цифровых моделей рельефа для структурно-линементного анализа (на примере Ургуйского гранитного массива, ЮВ Забайкалье) // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 51–60.
- Черезов А.М., Широких И.Н., Васьков А.С. Структура и зональность гидротермальных месторождений в разрывных зонах. Новосибирск, Наука. Сибирская издательская фирма, 1992, 104 с.
- Anderson E.M. The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. pp. 387–402.
- 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. Geod. Cartogr. 2021. 47. pp. 34–44.
- Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. № 88. pp. 357–371.
- Papilinski A. Directional filtering in edge detection. IEEE Trans. Image Processing 1998. 7. pp. 611–615.
- Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. pp. 437–457.4–368.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th edit. Blackwell Publishing, 2007. 486 p.
- Suzen M.L., Toprak V. Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. Int. J. Remote Sens. 1998. 19. pp. 1101–1114.

Regional Remote Sensing Analysis of Fault Tectonics of the Taimyr-Severozemelsky Orogen and its Role in Ore Formation

V. A. Minaev, S. A. Ustinov, V. A. Petrov, A. D. Svecherevsky, I. O. Nafigin

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

The results of a comprehensive analysis of the fault tectonics of the Taimyr-Severozemelsky orogen, carried out on a regional scale, are considered. Based on the digital relief model, lineaments were identified using manual and automatic methods. The results obtained in combination with literature data made it possible to carry out tectonophysical reconstructions using the model of P.L. Hancock (1985). Based on the reconstructions, the estimated areas of tectonic structures that had the greatest hydraulic activity during the Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonic-mineragenic cycle were identified, with which ore occurrences of scarce types of strategic mineral raw materials of Taimyr are associated (gold, rare metals, copper, lead, zinc, etc.) Identified areas promising for the discovery of new ore objects.

Keywords: Taimyr, faults, fault tectonics, digital elevation model, remote sensing of the Earth, lineaments, tectonophysics, ore deposits, geographic information system, strategic metals

REFERENCES

- Anderson E.M.* The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. P. 387–402.
- Afanasenkov A.P., Unger A.V., Lugovaya O.V., Chikishev A.A., Nikishin A.M., Bordunov S.I., Yakovishina E.V.* The tectonics and stages of the geological history of the Yenisei–Khatanga basin and the conjugate Taimyr orogeny // Geotectonics. 2016. T. 50. № 2. pp. 161–178.
- Bryantseva G.V., Demina L.I., Promyslova M.Yu., Kosevich N.I.* Neotectonic structures of the Western Taimyr // Bulletin of Moscow University. Ser. 4. Geology. 2019. No. 6. pp. 17–23 (In Russian).
- Cherezov A.M., Shirokikh I.N., Vaskov A.S.* Structure and zoning of hydrothermal deposits in fracture zones. Novosibirsk, Science. Siberian Publishing Company, 1992, 104 p. (In Russian).
- Demina L.I., Zakharov V.S., Promyslova M.Yu., Zavyalov S.P.* The interrelations between collisional and trap magmatism of Taimyr based on geological data and modeling results // Bulletin of Moscow University. Episode 4: Geology. 2018. No. 1. P. 16–25 (In Russian).
- 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. Geod. Cartogr. 2021. 47. P. 34–44.
- Fuchs K., Müller B.* World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. № 88. P. 357–371.
- Galyamov A.I., Volkov A.V., Murashov K.Yu.* Spatial relation of metallogeny to Taimyr deep structures // proceedings of the fersman scientific session of GI KSC RAS. 2022. № 19. C. 42–46 (In Russian).
- Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A.* Development of a technique for automatic lineament allocation based on a neural network approach // Exploration of the Earth from Space. 2023. No. 6. P. 86–97 (In Russian).
- Gzovsky M.V.* Fundamentals of tectonophysics. M.: Nauka, 1975. 536 p (In Russian).
- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.4–368.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W.* Fundamentals of Rock Mechanics. 4th edit. Blackwell Publishing, 2007. 486 p.
- Ovsyuchenko A.N., Zhostkov R.A., Edemskii D.E., Sobisevich A.I., Sysolin A.I., Presnov D.A.* Active tectonics of north-eastern Taimyr (Byrranga mountains) and questions of seismo-tectonic regionalization of the Russian Arctic // Physics of the Earth. 2023. No. 6. P. 207–223.
- Papilinski A.* Directional filtering in edge detection. IEEE Trans. Image Processing 1998. 7. P. 611–615.
- Petrov V.A., Sim L.A., Nasimov R.M., Shchukin S.I.* Fault tectonics, neotectonic stresses, and hidden uranium mineralization in the area adjacent to the Strel'tsovka caldera // Geology of Ore Deposits. 2010. T. 52. № 4. C. 279–288.
- Proskurnin V.F.* Mineragenic analysis of the Taimyr–Severozemelsky region and assessment of its gold-bearing potential. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. St. Petersburg, 2013, 45 p. (In Russian).
- Proskurnin V.F., Petrov O.V., Romanov A.P., Kurbatov I.I., Gavrish A.V., Proskurnina M.A.* Central Arctic gold-bearing copper-molybdenum-porphyric belt // Regional geology and metallogeny. 2021. No. 85. pp. 31–49 (In Russian).
- Rebetsky Yu.L.* Mechanism of tectonic stress generation in the zones of high vertical movements // Physical mesomechanics. 2008. No. 11. T.1. pp. 66–73 (In Russian).
- Rebetsky Yu.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-fold orogens // Tectonophysics and current issues of Earth sciences. To the 40th anniversary of the creation of M.V. Gzovsky Laboratory of Tectonophysics at the Institute of Physical Sciences of the Russian Academy of Sciences: Materials of the All-Russian Conference (October 13–17, 2008). M.: Publishing house IPE RAS, 2009. T. 1. pp. 340–366 (In Russian).
- Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V.* From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms. M.: GEOS, 2017. 235 p. (In Russian).
- Seminsky K.Zh.* Internal structure of continental fault zones: tectonophysical aspect. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, Branch “GEO”, 2003. 243 p. (In Russian).
- Sivkov D.V., Chitalin A.F., Dergachev A.L.* Application of lineament analysis to identify patterns of localization of gold mineralization on the territory of the Taryn ore field in the Republic of Sakha (Yakutia) // Research of the Earth from Space. 2020. No. 1. P. 3–19 (In Russian).
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-48 (Lake Taimyr, eastern part). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F., Mezhubovsky V.V., Trofimov V.V. Ch. scientific ed.: Proskurnin V.F. Cartographic factory “VSEGEI”, 2009.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. North Kara-Barents Sea and Taimyr-Severozemelsky series. T-45-48 (m. Chelyuskin). Authors: Makarieva E.M., Gavrish A.V. Ch. scientific ed.: Schneider G.V. FSUE “PMGRE”, 2011.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-49 (Khatanga Bay). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F., Mezhubovsky V.V. Ch. scientific ed.: Proskurnin V.F. Cartographic factory “VSEGEI”, 2013.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-46 (Tareya river). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F. Ch. scientific ed.: Nagaitseva N.N. Cartographic factory “VSEGEI”, 2014.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-47 (Lake Taimyr, western part). Authors: Gavrish A.V., Proskurnin V.F. Ch. scientific ed.: Proskurnin V.F. Cartographic factory “VSEGEI”, 2015.
- State geological map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000. Taimyr-Severozemelskaya series. S-44 (Dixon), S-45 (Ust-Tareya). Authors: Makarieva E.M., Molchanova E.V. Ch. scientific ed.: Gusev E.A., Nagaitseva N.N. Cartographic factory “VSEGEI”, 2020.

Suzen M.L., Toprak V. Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. *Int. J. Remote Sens.* 1998. 19. pp. 1101–1114.

Ustinov S.A., Petrov V.A. Use of detailed digital relief models for structural-lineament analysis (using the example of the Urtui granite massif, SE Transbaikalia). // *Geoinformatics*. 2016. No. 2. P. 51-60 (In Russian).

Vernikovsky V.A., Polyansky O.P., Babichev A.V., Vernikovskaya A.E., Proskurnin V.F., Matushkin N.Yu. Tectonothermal model for the late paleozoic syncollisional formation stage of the Kara orogen (Northern Taimyr, Central Arctic) // *Geology and geophysics*. 2022. No. 4. P. 440–457 (In Russian).

Zobak M.D. Geomechanics of oil deposits. Izhevsk: Institute of Computer Research, 2018. 479 p. (In Russian).