



SPECIAL-PURPOSE MAPPING FOR THE CRUSTAL FAULT STRUCTURE: USE AND CAPABILITIES ON THE EXAMPLE OF THE NATALKA ORE FIELD (THE MAGADAN REGION, RUSSIA)

K.Zh. Seminsky ¹, Yu.P. Vodovozova ¹, A.K. Seminsky ¹, G.L. Vursiy², R.N. Ovsov²

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Management Company Polyus LLC, 3-1 Krasin St, Moscow 123056, Russia

ABSTRACT. The paper considers the results of special-purpose mapping for the Nataka ore field (the Magadan Region, Russia), within which, according to most researches, a similarly named super-large gold deposit is controlled by fault tectonics. Actually, the groundwork for a formal-based mapping was laid by mass measurements of non-displaced fractures made in 52 geological-structural observation points. Their paragenetic analysis yielded local solutions concerning orientation and kinematics of the fault zones along which the displacement-related fracture networks were formed, same-type point-to-point trace solutions, and, therefore, a scheme of fault structures for the mapping area. This scheme reflects a fault-block style of the crustal destruction at the intersection of two large fault zones – northwestern Tenka and sub-latitudinal Inyakan-Kolyma. According to the formal principles of rank analysis of local solutions, there have been identified three regional dynamic settings of the tectonic knot structure formation: sub-meridional compression, NE-SW compression, and a shear related to WNW compression and NNE extension. The ore field was formed within the intersection of regional faults, and the shear setting has become decisive in the ore-hosting structure formation. Left-lateral shearing along the Tenka fault zone was followed by the right-lateral kinematics along the conjugate Inyakan-Kolyma fault zone – the disjunctive zone which influenced the northwest-trending faults, developed under the secondary extension conditions controlling the formation of major ore bodies of the Nataka deposit. A special-purpose mapping-based scheme of fault structures, as well as stress-state and structure-formation stage reconstructions, are largely consistent with the results of the previous large-scale studies based on the processing of the structural-geological data obtained from the multiyear exploration of the Nataka ore field. This fact, together with the experience of using a methodical approach for different geological objects and the opportunity for its operations automation at the current level of development of electronic technology, makes it possible to recommend a special-purpose mapping for solving applied problems within relatively small areas and for identifying specific features of the stress-strain state of the Earth's crust at different tectogenesis stages in large natural landscapes.

KEYWORDS: special-purpose mapping; Nataka ore field; faults; fractures; rock stress state; structural control of mineralization

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the Institute of the Earth's Crust SB RAS on 2021–2025 "Recent geodynamics, lithosphere destruction mechanisms, and geological hazards in Central Asia" (project No. FWEF-2026-0010).



EDN: GURXSX

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Konstantin Zh. Seminsky, seminsky@crust.irk.ru

Received: October 15, 2025

Revised: November 12, 2025

Accepted: November 14, 2025

FOR CITATION: Seminsky K.Zh., Vodovozova Yu.P., Seminsky A.K., Vursiy G.L., Ovsov R.N., 2025. Special-Purpose Mapping for the Crustal Fault Structure: Use and Capabilities on the Example of the Nataka Ore Field (the Magadan Region, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (6), 0863. doi:10.5800/GT-2025-16-6-0863

СПЕЦКАРТИРОВАНИЕ РАЗЛОМНОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ: ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ НА ПРИМЕРЕ НАТАЛКИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ)

К.Ж. Семинский¹, Ю.П. Водовозова¹, А.К. Семинский¹, Г.Л. Вурсий², Р.Н. Овсов²

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² ООО «УК Полус», 123056, Москва, ул. Красина, д. 3, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены результаты специального структурного картирования (спецкартирования) Наталкинского рудного поля (Магаданская область, Россия), в пределах которого располагается одноименное суперкрупное месторождение золота, контролируемое, по мнению большинства исследователей, разломной тектоникой. Фактической основой построений, проведенных в соответствии с формализованным методическим подходом, стали массовые замеры трещин без признаков смещений, проведенные в 52 пунктах геолого-структурных наблюдений. Их парагенетический анализ позволил получить локальные решения об ориентировке и кинематике разломных зон, при подвижках по которым сформировались трещинные сети, протрассировать однотипные решения от пункта к пункту и, таким образом, составить для участка картирования схему разрывных структур. Она отражает разломно-блоковый стиль деструкции земной коры в узле пересечения двух крупных разломных зон – северо-западной Тенькинской и субширотной Иньякано-Колымской. Согласно формализованным принципам порангового анализа локальных решений, установлены три региональные динамические обстановки формирования структуры разломного узла: субмеридиональное сжатие, сжатие в направлении СВ-ЮЗ и сдвиг с западно-северо-западной ориентировкой оси сжатия и северо-северо-восточной ориентацией оси растяжения. Рудное поле сформировалось в границах узла пересечения региональных разломов, а обстановка сдвига стала определяющей для формирования рудовмещающих структур. После левостороннего сдвига в Тенькинской зоне по сопряженной зоне Иньякано-Колымского разлома произошли правосторонние подвижки, причем северо-западные разрывы, попавшие в зону влияния этого дизъюнктива, развивались в условиях вторичного растяжения, контролируя формирование основных рудных тел Наталкинского месторождения. Составленная в итоге спецкартирования схема разломных структур, реконструкции напряженного состояния и этапов структурообразования во многом согласуются с результатами предшествовавших исследований, проведенных в более крупном масштабе на базе обработки структурно-геологических данных, которые были получены при проведении в пределах Наталкинского рудного поля многолетних поисково-разведочных работ. Это в совокупности с опытом применения методического подхода на разных геологических объектах и возможностью автоматизации многих его операций на современном уровне развития электронной техники позволяет рекомендовать спецкартирование для применения при решении прикладных задач в пределах сравнительно небольших площадей, а также для обширных природных регионов с целью установления особенностей напряженно-деформированного состояния земной коры на разных этапах тектогенеза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спецкартирование; Наталкинское рудное поле; разломы; трещины; напряженное состояние пород; структурный контроль оруденения

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (проект № FWEF-2026-0010).

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология геологической съемки постоянно совершенствуется, поскольку она остается главным методом непосредственного изучения строения верхней части земной коры. С целью повышения достоверности картирования различных элементов геологической структуры разрабатываются и модифицируются способы и приемы проведения съемочных работ. Одним из полезных методов выявления и характеристики разломов, контролирующих многие важные в практическом отношении геологические процессы, является специальное структурное картирование (спецкартирование) [Seminsky, 2014, 2015]. Для его реали-

зации достаточно создать на площади исследования сеть пунктов наблюдения с массовыми замерами «немых» (без признаков смещения) трещин, которые, в отличие от собственно разломных структур, имеют место практически в каждом коренном выходе горных пород. Как следствие, спецкартирование может применяться в слабо обнаженных регионах, где вероятность провести измерения разрывных смещений и тем более собственно разломных элементов существенно снижается.

В любом случае дополнение измерений разрывных смещений традиционного типа приемами спецкартирования повышает достоверность выявления

структуры земной коры. В рамках данной работы это показано на примере располагающегося в Магаданской области Наталкинского рудного поля (НРП) (рис. 1, врезка), где оруденение контролируется сетью разрывных нарушений [Kalinin et al., 1992; Goncharov et

al., 2002; Struzhkov et al., 2006; Golubev, 2008; Golub et al., 2008; и др.]. Как следствие, получение дополнительной информации об его состоянии и закономерностях формирования имеет существенное практическое значение. Кроме выполнения этой главной цели,

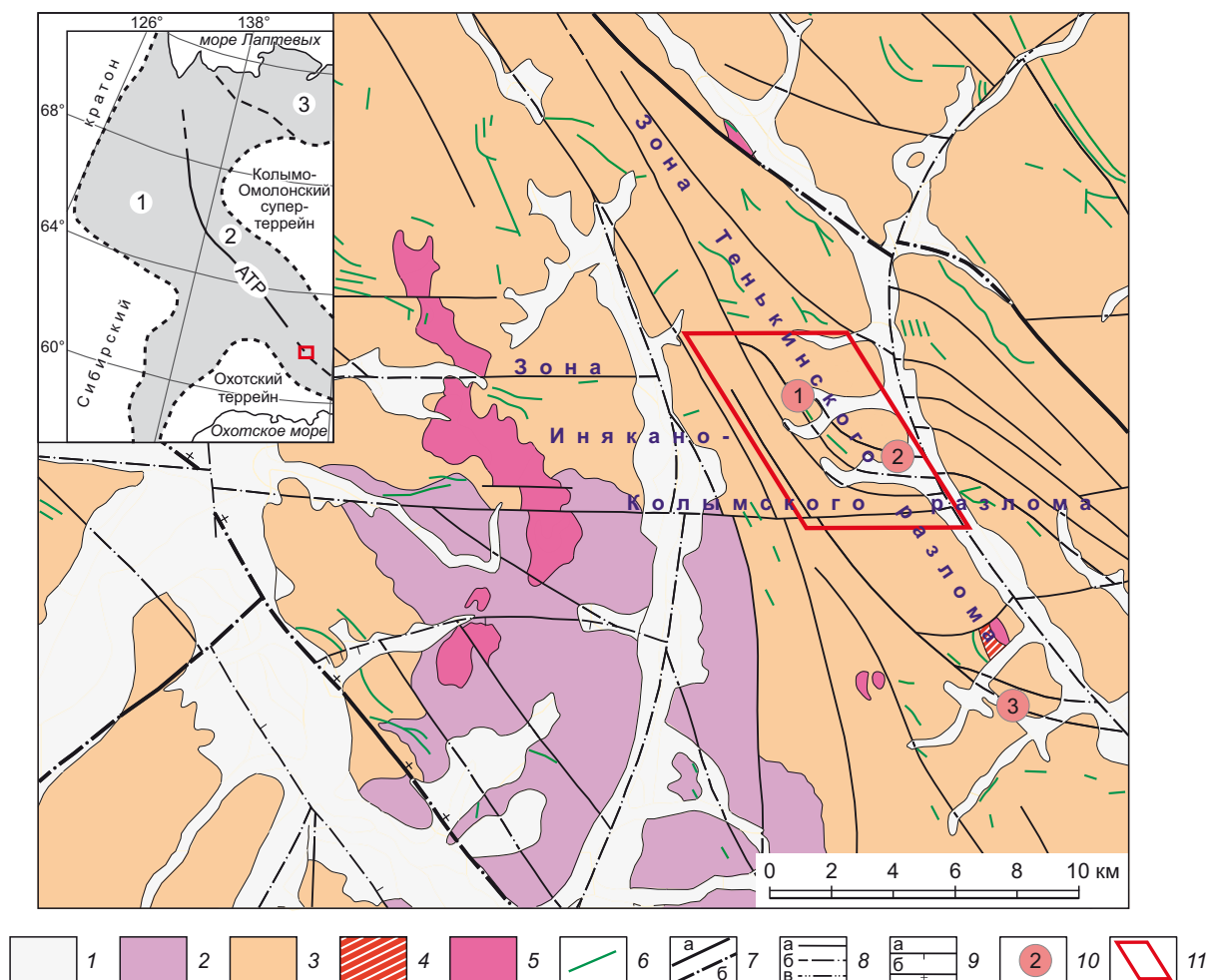


Рис. 1. Расположение участка исследований на фрагменте Государственной геологической карты РФ масштаба 1:200000 ([State Geological Map..., 2002], с упрощениями и дополнениями).

1 – четвертичные отложения; 2 – отложения нижнего и среднего отдела триаса (алевроитоглинистые сланцы, реже – алевролиты и мелкозернистые песчаники, линзы глинистых известняков); 3 – пермские отложения (алевроитоглинистые, углисто-глинистые сланцы, алевролиты, песчаники, редко – гравелиты и конгломераты); 4 – поздне меловые магматические образования (субпластовые и штокообразные тела риолитов, дайки риолитов, дацитов, риодацитов); 5 – позднеюрские интрузивные образования (гранодиориты, диориты, кварцевые диориты); 6 – дайки различного состава; 7–8 – разрывные нарушения: 7 – главные сложной кинематики – достоверные (а) и достоверные скрытые под вышележащими образованиями (б); 8 – второстепенные неустановленной кинематики – достоверные (а), достоверные скрытые под вышележащими образованиями (б) и предполагаемые скрытые под вышележащими образованиями (в); 9 – сбросы (а) и взбросы (б); 10 – золоторудные месторождения (1 – Наталка, 2 – Омчак, 3 – Павлик); 11 – контур площади исследования. На врезке: обзорная схема; красный квадрат – район исследований.

Fig. 1. Location of the study area on the fragment of the State geological map of the Russian Federation, scale 1:200000 (simplified and supplemented after [State Geological Map..., 2002]).

1 – Quaternary deposits; 2 – Lower and Middle Triassic deposits (silt-shale deposits, less often – aleurolites and fine-grained sandstones, clayed limestone lenses); 3 – Permian deposits (silt-shale and carbonaceous-shale deposits, aleurolites, sandstones, rare gravelites and conglomerates); 4 – Late Cretaceous magmatic formations (substratal and stock-shaped rhyolite bodies, rhyolite, dacite, rhyodacite dikes); 5 – Late Jurassic intrusive formations (granodiorites, diorites, quartz diorites); 6 – dikes of various compositions; 7–8 – faults: kinematically complex major – known (a) and known hidden underneath the overlying formations (б); 8 – kinematically undetermined secondary (б), known hidden underneath the overlying formations (б) and inferred hidden underneath the overlying formations (в); 9 – normal faults (а) and reverse faults (б); 10 – gold deposits (1 – Natalka, 2 – Omchak, 3 – Pavlik); 11 – contour of the study area. The inset shows a survey map; red square – study location.

исследование было акцентировано на оценке возможностей спецкартирования, что для рассматриваемого объекта было реализовано посредством сопоставления его результатов с данными о состоянии разломной сети, отраженными на разномасштабных геологических картах НРП и одноименного месторождения золота.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА СПЕЦКАРТИРОВАНИЯ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Золоторудные месторождения Наталка, Омчак и Павлик образуют Омчакский рудно-рассыпной узел, в пределах которого, согласно определениям абсолютного возраста [Akinin et al., 2023], в воланжинское время раннего мела образовались суперкрупные скопления золота. По данным [Grigorov, 2006], запасы благородного металла в главной рудной залежи Наталкинского месторождения оцениваются примерно в 2000 т при среднем содержании ≈ 1.5 г/т.

Золоторудные месторождения Наталка и Омчак принадлежат к НРП, в центральной части которого были проведены работы по спецкартированию разломной структуры и напряженного состояния осадочно-вулканогенной толщи (рис. 1). Месторождения относятся к орогенному типу [Groves et al., 1998; Goryachev et al., 2000] и, согласно данным предшественников [Kalinin et al., 1992; Goryachev et al., 2000; Pristavko et al., 2000; Goncharov et al., 2002; Struzhkov et al., 2006; Bortnikov et al., 2010; Konstantinov, 2010; Nekrasov et al., 2015, 2019; Chitalin, 2016; Nekrasov, 2019; Yushmanov, 2020; Akinin et al., 2023; и мн. др.], представлены десятками рудных тел, образующих сеть разноориентированных кварцевых жил и прожилков золото-арсенопирит-анкерит-серицит-альбит-кварцевого состава, которые локализуются во вмещающих, часто брекчированных породах.

Согласно [Geological-Structural Map..., 1991; Kalinin et al., 1992], рудные жилы НРП залегают среди пермских (P_2) отложений, включающих более древнюю тасскую (углисто-глинистые и алевроглинистые сланцы, неслоистые с вулканической примесью алевролиты), атканскую (гальково-гравийные алевролиты и туфогенные сланцы или диамиктиты) и более молодую нерючинскую (песчанистые алевролиты, алевроглинистые сланцы) свиты. Породы района исследований смяты в складки, нарушены разломами и прорваны интрузиями.

В целом НРП располагается в зоне Тенькинского разрыва (рис. 1), который является юго-восточным продолжением Адыча-Тарынского разлома – крупнейшего дизъюнктива Яно-Колымского орогенного пояса (рис. 1, врезка). В отличие от многих субпараллельных разрывных структур, контролирующих рудные месторождения пояса, Тенькинский разлом не выражен сместителем магистрального типа (разрывом 1-го порядка), а представляет зону эшелонированных разрывов 2-го и более высоких порядков, которая в районе Омчакского рудно-рассыпного узла имеет ширину ≈ 15 км. Однако в поле кажущегося электрического со-

противления выделяется только ее связанная с оруденением электропроводящая часть размером 4–6 км [Sharafutdinov et al., 2008]. Аномалия прослеживается до глубины 10–15 км при мощности осадочного чехла 6–10 км.

В районе исследований в состав рассматриваемой дизъюнктивной зоны обычно включают собственно Тенькинский разлом, менее протяженные Машковский, Наталкинский, Главный разломы, а также другие разрывные нарушения, располагающиеся в пределах площади картирования и имеющие генерализованную северо-западную ориентировку (рис. 2, д). Рудные жилы Омчакского месторождения опережают собственно Тенькинский разлом. Наталкинское месторождение представляет сеть разноориентированных золотоносных кварцевых жил и прожилков, образующих к северо-востоку от сместителя Главного разлома в центральной части месторождения единую минерализованную зону (рис. 2, г, д), которая разветвляется и изгибается к юго-востоку согласно строению сети рудоконтролирующих разрывов 2-го и более высоких порядков.

За исключением представленных выше наиболее общих закономерностей разломного контроля рудных тел, у исследователей расходятся представления о роли в рудолокализации отдельных систем тектонических нарушений и их ранговой соподчиненности, а также о динамических обстановках формирования разломной структуры Наталкинского рудного поля в целом. Так, относительно типа напряженного состояния породного массива в период рудоотложения существует практически полный спектр мнений: сдвиг с ориентацией оси сжатия в направлении СЗ-ЮВ и оси растяжения в направлении СВ-ЮЗ [Goncharov et al., 2002; Shakhtyrov, 2009]; сложный сдвиг с трансенсией для северо-северо-западных разломных зон [Yushmanov, 2020]; растяжение в направлении В-СВ [Kornilov et al., 2007]; сжатие в направлении СВ-ЮЗ [Kalinin et al., 1992]. Положение рудного узла связывают с изгибом всей Тенькинской зоны или собственно Тенькинского разлома, где активизируются рудолокализирующие разрывы оперения, относящиеся ко 2-му порядку [Mezhov, 2000]. Другие исследователи придавали главное значение условиям, возникающим при пересечении одноранговых разломов или разломных зон. При этом существуют разные мнения об ориентировках дизъюнктивов, формирующих рудный узел: северо-западные и меридиональные [Kalinin et al., 1992]; северо-северо-западные и широтные [Zhirnov, 1984; Nekrasov, 2019]; северо-западные, меридиональные и широтные [Pluteshko et al., 1988].

Наличие широкого спектра мнений по принципиальным вопросам строения рудного поля во многом связано с различием схем разломов, принимаемых за основу при их решении. Это видно при сравнении разрывных сетей, которые были закартированы на участке исследований в ходе поисково-разведочных работ (рис. 2, б–д). Несмотря на различие масштабов базовых карт, можно заключить, что в первом приближении

на них отражено доминирование разных стилей дислоцированности осадочно-вулканогенной толщи. По схемам, показанным на рис. 2, б, г, можно сделать предположение о существенном вкладе пластической составляющей при небольшом количестве разломов, из которых наиболее протяженные характеризуются изогнутой в плане формой. В противоположность этому схемы, представленные на рис. 2, в, д, отражают разломно-блоковую структуру осадочно-вулканогенной толщи с большим количеством разрывов различной ориентировки и протяженности.

Характерно то, что отмеченные различия особенно отчетливо проявлены на двух картах (рис. 2, г, д), со-

ставленных в наиболее крупном масштабе (1:10000). Более того, есть определенные отличия в положении наиболее крупных и/или значимых для контроля оруженения разломов: на рис. 2, г – Наталкинский и Стержневой, на рис. 2, д – Главный и Северо-Восточный. Таким образом, для Наталкинского золоторудного поля, несмотря на многодесятилетнюю историю его изучения, картирование разломной структуры остается востребованным как в плане установления стиля и этапности разрывообразования, так и для повышения качества прогнозных построений. При этом актуальным является использование тех подходов к выявлению разрывов, а также реконструкции региональных и

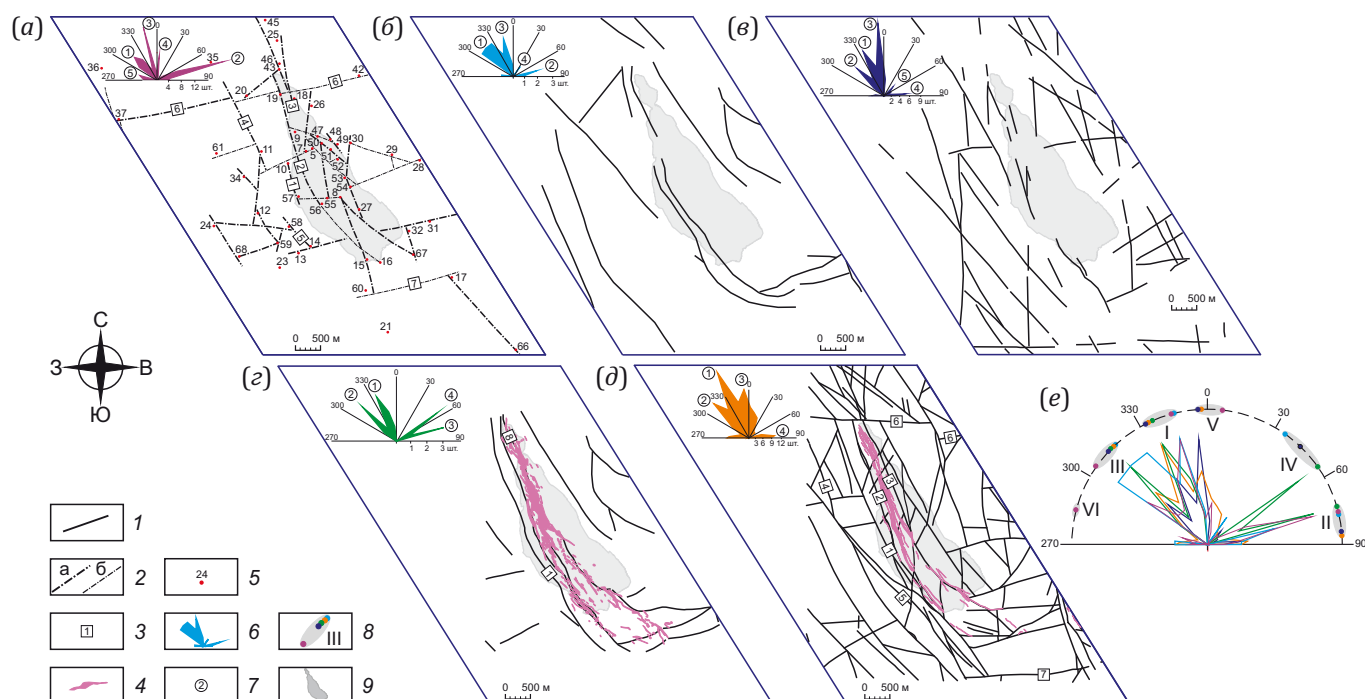


Рис. 2. Сопоставление разломных сетей центральной части НРП на картах разного масштаба.

(а) – 1:100000 (по материалам данного исследования); (б) – 1:50000 по [Karelin et al., 1985]; (в) – 1:25000 по [Bulgakov et al., 1976]; (г) – 1:10000 по [Akinin et al., 2023]; (д) – 1:10000 по [Geological-Structural Map..., 1991]; (е) – с использованием анализа роза-диаграмм простираций разрывов.

1 – разломы; 2 – оси разломных зон, в которых зафиксированы продольные зоны дробления и крупные плоскости со штрихами скольжения (а) или таковые не наблюдались (б); 3 – разломы и разломные зоны, упоминающиеся в тексте (1 – Наталкинский, 2 – Главный, 3 – Северо-Восточный, 4 – Ветвь, 5 – Машковский, 6 – Геологический, 7 – Глухаринский, 8 – Стержневой); 4 – рудные зоны месторождения Наталка (для фрагмента (г) – по [Akinin et al., 2023], для фрагмента (д) – по [Geological-Structural Map..., 1991]); 5 – точки геолого-структурных наблюдений с номерами; 6 – роза-диаграммы простираций разломных структур; 7 – номера систем разломов на роза-диаграмме; 8 – системы разломов участка исследований и их номера на фрагменте (е), выявленные при анализе взаимного положения систем разрывов (кружки разного цвета), соответствующих роза-диаграммам, построенным по разным схемам (фрагменты (а–д)); 9 – карьер.

Fig. 2. Comparison between fault networks in the central part of the Natalka ore field mapped at various scales.

(а) – 1:100000 (according to the results of the present study); (б) – 1:50000 after [Karelin et al., 1985]; (в) – 1:25000 after [Bulgakov et al., 1976]; (г) – 1:10000 after [Akinin et al., 2023]; (д) – 1:10000 after [Geological-Structural Map..., 1991]; (е) – using the analysis of rose diagrams of the strike directions of faults.

1 – faults; 2 – axes of the fault zones with the evidence of longitudinal crush zones and large fault planes with (а) or without (б) slickenlines thereon; 3 – faults and fault zones mentioned in the text (1 – Natalka, 2 – Main, 3 – Northeast, 4 – Vetr, 5 – Mashkovskii, 6 – Geologicheskii, 7 – Glukharinskii, 8 – Sterzhnevoi); 4 – ore zones of the Natalka deposit (for fragment (г) – after [Akinin et al., 2023], for fragment (д) – after [Geological-Structural Map..., 1991]); 5 – geological-structural observation points with numbers; 6 – rose diagrams of the strike directions of fault structures; 7 – fault system numbers on the rose diagram; 8 – fault systems of the study area and their numbers in fragment (е), identified through analysis of the mutual position of fault systems (circles with different colors) corresponding to the rose diagrams based on different schemes (fragments (а–д)); 9 – quarry.

локальных полей напряжений, которые ранее на этом объекте не применялись.

В связи с вышеизложенными основными задачами проведенного исследования были:

1) провести на территории НРП специальное структурное картирование и составить для его центральной части схему разломных зон;

2) установить на основе материалов спецкартирования главные динамические обстановки формирования структуры осадочно-вулканогенной толщи в пределах Наталкинского рудного поля с акцентом на этапе рудообразования;

3) на основе сопоставления полученных результатов о закономерностях и обстановках разрывообразования в НРП с данными предшественников охарактеризовать возможности и стратегию использования спецкартирования для решения комплекса геологических задач.

3. МЕТОДИКА СПЕЦИАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО КАРТИРОВАНИЯ

В данном разделе представлено основное содержание метода спецкартирования, подробное описание которого приведено в публикациях [Seminsky, 1994, 2014, 2015; Burzunova, 2011].

Основной теоретической предпосылкой метода является широкая трактовка ключевого объекта спецкартирования, которым является «разломная зона». С позиций тектонофизики это часть породного массива, для которой в определенной динамической обстановке (обычно при сжатии, растяжении или сдвиге) реализуется деформация скалывания, характеризующаяся локализацией с постадийным формированием определенного парагенезиса разрывных структур. В процессе деформирования они эволюционируют от трещин и мелких нарушений посредством объединения во все более и более крупные разрывы вплоть до появления магистрального сместителя, разрушающего нагруженный блок земной коры единой разломной поверхностью (рис. 3, а).

Как видно из рис. 3, а, на примере правосдвиговой зоны, магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка или «разлом» в классическом понимании термина) формируется лишь на третьей заключительной стадии разломообразования (III). Предыдущая – поздняя дизъюнктивная – стадия (II) отличается наличием крупных кулисообразно расположенных сегментов будущего сместителя, между которыми имеют место широкие участки повышенной плотности разрывов 2-го порядка, за счет эволюции которых эти кулисы стремятся соединиться друг с другом в единый тектонический шов. Ранняя дизъюнктивная стадия (I) существенно отличается от стадий II и III, так как представляет широкую зону развития сравнительно мелких разрывов. Среди них присутствуют все известные морфогенетические типы при доминировании тех, кинематика которых соответствует характеру смещения по зоне в целом (в данном случае это правые сдви-

ги). В тектонике такие структуры называют зонами скрытых разломов фундамента, геодинамически активными зонами, зонами повышенной трещиноватости и пр. [Radkevich et al., 1956; Rats, Chernyshev, 1970; Khrenov et al., 1977; Makarov, Shchukin, 1979; Nekrasov et al., 2015].

Вследствие представленного выше широкого понимания разломных зон и учитывая то, что практически любой участок земной коры в течение геологической истории претерпевает несколько этапов разновозрастных деформаций, можно сделать вывод, что он неизбежно в тот или иной период времени принадлежал к зоне влияния одного или нескольких разнотипных и разноранговых разломов. Последняя, наиболее сложная, ситуация характерна для подвижных областей и поясов, испытавших активизацию в различных сменяющихся во времени геодинамических режимах. В регионах новейшего времени активизации разломные зоны в верхней части коры соизмеримы с блоками, поскольку их размеры непропорционально увеличиваются вследствие расширения области хрупкого разрывообразования у свободной поверхности, чему способствует интенсивная разгрузка напряжений [Seminsky et al., 2013; Seminsky, Bobrov, 2018]. В подавляющем большинстве случаев это разрывы и трещины ранних стадий разломообразования (рис. 3, а, стадии I и II), так как их размеры в несколько раз превышают ширину зоны магистрального сместителя, которая в предельном случае представляет узкую зону проявления тектонитов (рис. 3, а, стадия III).

Таким образом, в рамках спецкартирования любой участок земной коры с системной сетью мелких разрывов и трещин анализируется с позиций его принадлежности к разломной зоне, причем чаще всего к той ее части, которая сформировалась на ранней дизъюнктивной стадии разломообразования. Магистральный сместитель зоны редко обнажается в пределах случайным образом выбранного локального коренного выхода, но может располагаться на смежной территории или в глубине, а иногда и вовсе отсутствовать, если полной локализации деформации не произошло ввиду слабой или непродолжительной активности сил, воздействовавших на деформируемый объем горных пород.

Представленные положения открывают принципиальную возможность по измерениям параметров разрывных структур (пространственная ориентировка, кинематика) не только реконструировать локальное напряженное состояние породного массива, но и установить его принадлежность к зоне разлома определенного морфогенетического типа, а при создании сети пунктов геолого-структурных наблюдений – протрассировать дизъюнктив на местности. Основные динамические обстановки, реконструируемые для земной коры, и типы соответствующих им стресс-тензоров представлены на рис. 4: в обстановке растяжения формируются сбросовые зоны, в обстановке сжатия – взбросовые (надвиговые) зоны, в обстановке сдвига – сдвиговые зоны.

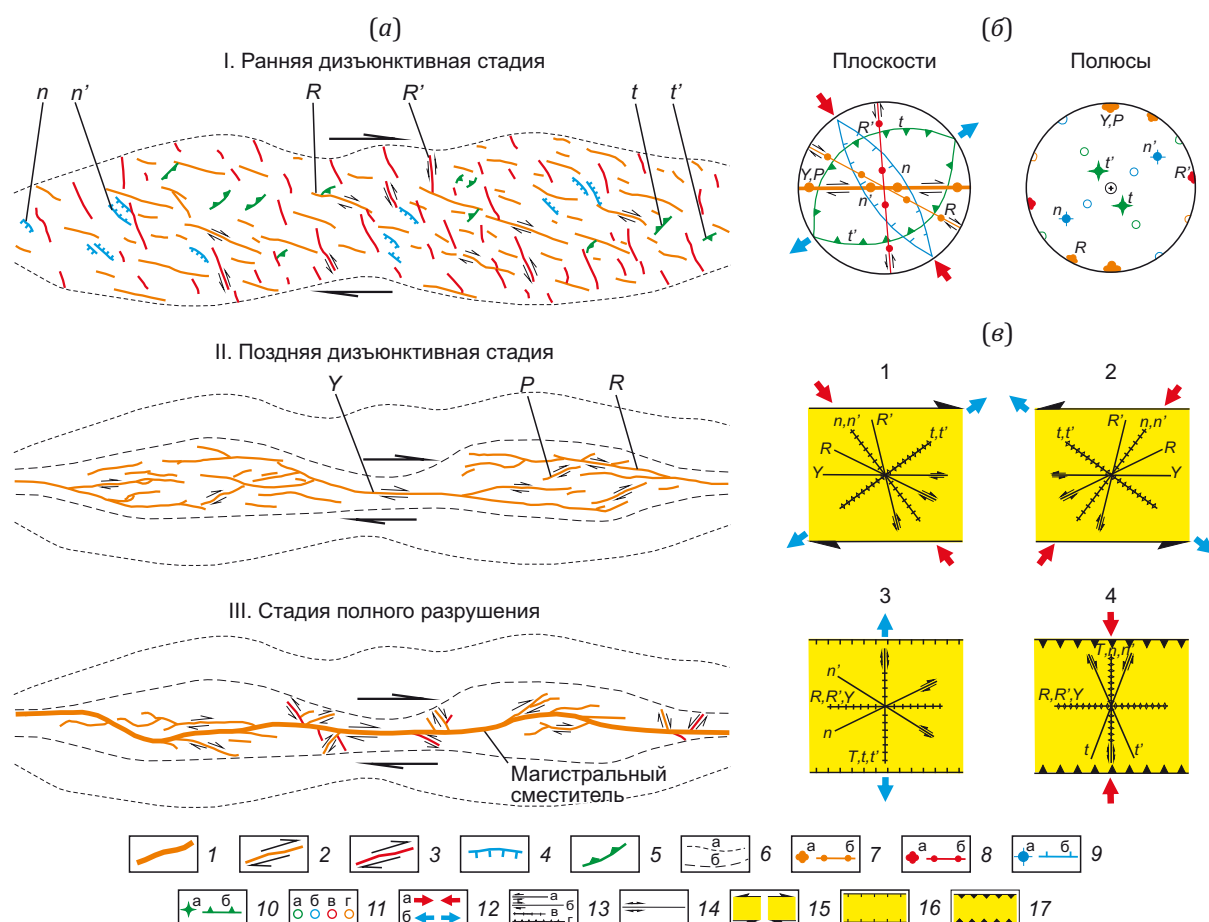


Рис. 3. Структура разломной зоны (на примере правого сдвига), представленная на схемах (а) и диаграммах парагенезисов разрывов (б-в).

(а) – строение разломной зоны на трех главных стадиях развития (I–III): 1 – магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка); 2 – правые сдвиги; 3 – левые сдвиги; 4 – сбросы; 5 – взбросы (надвиги); 6 – границы зоны разрывов, активных на стадии I (а) и II (б).

(б) – эталонные парагенезисы (трафареты) разрывов 2-го порядка для сдвиговой зоны, представленные на круговых диаграммах в плоскостях и полюсах (верхняя полусфера): 7 – полюсы (а) и плоскости (б) сместителей левосдвигового типа, относящегося к 1-му (значок крупнее) или 2-му (значок мельче) порядку; 8 – полюсы (а) и плоскости (б) сместителей 2-го порядка левосдвигового типа; 9 – полюсы (а) и плоскости (б) сместителей 2-го порядка сбросового типа; 10 – полюсы (а) и плоскости (б) сместителей 2-го порядка взбросового (надвигового) типа; 11 – положение полюса второстепенной или дополнительной системы тройственного парагенезиса трещин (цвет знака соответствует цвету главной системы тройственного парагенезиса); 12 – ориентировка субгоризонтальных осей сжатия (а) и растяжения (б).

(в) – эталонные парагенезисы (трафареты) разрывов 2-го порядка в зоне правого сдвига (1), левого сдвига (2), сброса (3) и взброса (надвига) (4), представленные простираниями плоскостей в плане: 13 – плоскости левых сдвигов (а), правых сдвигов (б), сбросов (в) и взбросов (надвигов) (г) 2-го порядка; 14 – плоскости трансформационных сдвигов 2-го порядка; 15–17 – зоны левого и правого сдвига (15), сброса (16) и взброса (надвига) (17) 1-го порядка. Латинские буквы – обозначение разнотипных систем разрывов 2-го порядка (R' , R , n' , n , t' , t , P) и магистрального сместителя 1-го порядка (Y).

Fig. 3. Fault zone structure (on the example of the right-lateral shear) on schemes (a) and diagrams (б-в) showing parageneses of faults.

(а) – fault zone structure at three main stages of development (I–III): 1 – main fault plane (1st order fault); 2 – right-lateral shears; 3 – left-lateral shears; 4 – normal faults; 5 – reverse faults (thrusts); 6 – boundaries of fault zones active at stage I (a) and stage II (б).

(б) – standard parageneses (patterns) of the 2nd order faults for the shear zone, shown on circle diagrams in planes and poles (upper hemisphere): 7 – poles (а) and planes (б) of the left-lateral faults assigned to the 1st (larger mark) or to the 2nd (smaller mark) order; 8 – poles (а) and planes (б) of the left-lateral faults assigned to the 2nd order; 9 – poles (а) and planes (б) of the 2nd order normal faults; 10 – poles (а) and planes (б) of the 2nd order reverse faults (thrusts); 11 – pole location for the secondary or additional system of the triple paragenesis of fractures (color mark corresponds to the color of the main system of the triple paragenesis); 12 – orientation of the sub-horizontal compression (а) and extension (б) axes.

(в) – standard parageneses (patterns) of the 2nd order faults in the zone of the right-lateral shear (1), left-lateral shear (2), normal fault (3) and reverse fault (thrust) (4), represented by the plane strike directions in plan: 13 – left-lateral shear planes (а), right-lateral shear planes (б), normal faults (в) and reverse faults (thrusts) (г) of the 2nd order; 14 – 2nd order transformation shear planes; 15–17 – zones of the left-lateral and right-lateral shears (15), normal fault (16) and reverse fault (thrust) (17) of the 1st order. Roman characters stand for the various types of the 2nd order fault systems (R' , R , n' , n , t' , t , P) and the 1st order fault plane (Y).

Кроме отмеченных выше наиболее общих тектонофизических представлений, в основу спецкартирования положены приемы и принципы парагенетического анализа, которые, как известно, позволяют по совокупности пространственно связанных и возникших в ходе единого деформационного процесса структур реконструировать динамическую обстановку их образования (напряженное состояние). В спецкартировании принципиально новым является использование полных парагенезисов разрывов, которые развиваются в разломной зоне на разных стадиях развития. Как следует из рис. 3, а, в результате постадийного разломообразования в зоне скалывания 1-го порядка происходит закономерная смена вторичных динамических обстановок, в каждой из которых формируются элементы полного парагенезиса (сдвиги, сбросы, надвиги), соответствующие типу напряженного состояния 2-го порядка.

В методике спецкартирования используются идеализированные структурные парагенезисы (эталоны), представляющие модели разломно-трещинных сетей в зонах скалывания разломного типа, составленные в результате обобщения теоретических, экспериментальных и природных закономерностей разрывообразования для трех основных типов динамических обста-

новок – сжатия, сдвига и растяжения [Seminsky, 2003, 2014, 2015; Burzunova, 2011]. Несмотря на различия в морфогенетических типах разломных зон, эталон состоит для них из одинаковых в механическом отношении структурных элементов. Это главный разломный сместитель 1-го порядка, семь направлений опережающих разломов 2-го порядка (R-, R', t-, t', n-, n', T-типа) (см. рис. 3, б), а также соответствующие каждому из них (и, в свою очередь, являющиеся структурами 2-го порядка) парагенезисы еще более мелких разрывов в виде троек систем опережающих трещин [Seminsky, 1994]. Опережающими называют разрывы 2-го порядка, образованные до формирования сместителя 1-го порядка, вне зависимости от ранга.

Использование тройственного парагенезиса примерно перпендикулярных систем трещин является принципиальной особенностью парагенетического анализа в методе спецкартирования. Две системы трещин парагенезиса являются классической парой сопряженных сколов [Gzovsky, 1963; Nikolaev, 1992], а третья перпендикулярна к ним и, характеризуясь двойственным сколово-отрывным генезисом, обеспечивает возможность подвижек по двум первым системам [Seminsky, 2003]. Этот парагенезис наиболее часто встречается в зоне тектонического разлома в виде одной

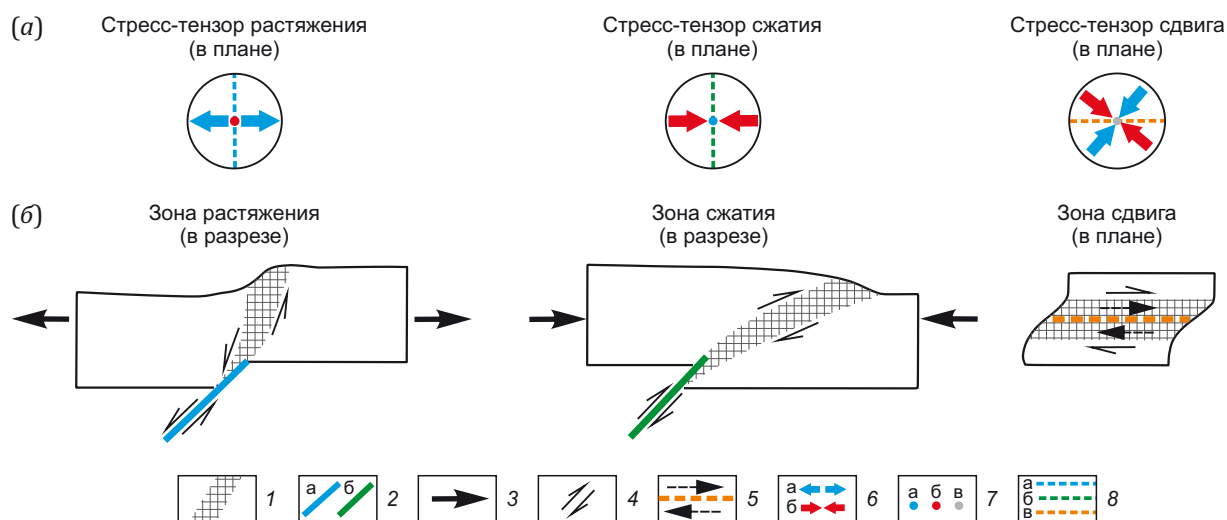


Рис. 4. Динамические обстановки растяжения, сжатия и сдвига, в которых происходит формирование разнотипных разломных зон.

(а) – диаграммы стресс-тензоров для разных динамических обстановок; (б) – способы нагружения, при реализации которых в деформируемом объеме образуются зоны растяжения, сжатия и сдвига. 1 – разломные зоны, образующиеся при деформации скалывания; 2 – инициирующий сместитель сбросового (а) или взбросового (надвигового) (б) типа; 3 – направление действия внешних сил; 4 – направление смещения крыльев разломной зоны; 5 – положение инициирующего сместителя и направление действия внешних сил, имеющих место у основания деформируемого объема при сдвиге; 6 – положение субгоризонтальных осей растяжения (а) и сжатия (б); 7 – положение субвертикальных осей растяжения (а), сжатия (б) и промежуточной (в); 8 – положение осей разломных зон, формирующихся при растяжении (а), сжатии (б) и правом сдвиге (в).

Fig. 4. Dynamic extension, compression and shear settings in which the fault zones of various types form.

(а) – stress tensor diagrams for various dynamic settings; (б) – tectonic loading processes in which the extension, compression and shear zones of a deformable volumes are formed. 1 – shear deformation-induced fault zones; 2 – normal fault (а) or reverse fault (thrust) (б) initiation plane; 3 – external force directions; 4 – direction of the displacement of the fault zone sides; 5 – initiation plane location and external force directions at the shear volume deformation; 6 – sub-horizontal extension (а) and compression (б) axes location; 7 – sub-vertical extension (а), compression (б) and intermediate (в) axes location; 8 – location of the fault zone axes at extension (а), compression (б) and right-lateral shear (в).

тройки трещинных систем либо нескольких троек систем трещин, наложенных друг на друга при изменении напряженного состояния.

Каждый из эталонов, приведенных в предыдущих публикациях для основных типов разломных зон – правый и левый сдвиги, надвиги, взбросы и сбросы с разными углами падения сместителей [Burzunova, 2011; Seminsky, 2014], представляет в форме трафарета полный набор систем разрывов, составляющих их внутреннюю структуру. Эталоны составлены в виде круговых трафаретов в равноугольной проекции верхней полусферы, как это показано на рис. 3, б, на примере зоны правого сдвига, а также в виде трафаретов разнотипных разломных зон в плане (см. рис. 3, в), где простирающиеся разрывные системы показаны линиями с навесными знаками. Первая группа трафаретов используется в том случае, когда пространственное положение каждого элемента природной разрывной сети определено полностью значениями азимута и угла падения, а вторая – когда известны только простирающиеся разрывные структуры.

Парагенетический анализ заключается в сравнении природных и эталонных сетей разрывов, что позволяет в каждом пункте измерений определить динамическую обстановку, являвшуюся причиной формирования разрывной сети, а также морфогенетический тип разломной зоны 1-го порядка, в которой происходило разрывообразование. При условии многоэтапности процесса деформации изучаемого объема горных пород таких решений будет несколько. Использование парагенетического анализа в описанной выше модификации позволяет восстановить поля напряжений и положение разломных зон на основе массовых наблюдений за «немыми» (без признаков смещений) разрывами, причем степень достоверности реконструкций будет повышаться по мере уплотнения на площади картирования сети пунктов наблюдений.

При наличии в некоторых обнажениях структур разломного типа (зоны тектонитов, разрывы со смещениями, кинематическими маркерами и пр.) полученные решения о положении разломной зоны или стресс-тензоре дополняются применением стандартных методов структурной геологии, а также способов кинематического анализа [Gushchenko, 1975; Parfenov, 1984; Ramsay, Huber, 1983, 1987; Angelier, 1984; Rebetsky, 2007; Rebetsky et al., 2017]. Для территории Наталкинского рудного поля такой комплексный подход особенно актуален, поскольку она характеризуется неравномерной обнаженностью пород: высокой в карьере и низкой на остальной площади спецкартирования.

Таким образом, этапами спецкартирования, проведенного в пределах НРП, были:

- полевой этап – создание на изучаемой территории сети пунктов массового замера элементов залегания трещин, а также разрывов со смещениями и разломов (в случае их наличия в обнажениях);

- этап обработки – парагенетический анализ массовых замеров с получением решений локального уровня

о стресс-тензорах и типах разломных зон, в которых сформировалась трещинная сеть на разных стадиях структурообразования;

- этап картосоставления – трассирование однотипных локальных решений с выделением линейно вытянутых участков их распространения в пространстве, т.е. составлением карты или схемы разломных зон;

- этап интерпретации – анализ выявленной разломной сети с определением закономерностей строения и формирования разломной сети.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕЦКАРТИРОВАНИЯ

На полевом этапе спецкартирования в пределах площади исследования была создана сеть из 52 пунктов геолого-структурных наблюдений с массовыми замерами трещин (см. рис. 2). Примерно половина из них располагалась в бортах Наталкинского карьера, а остальные – на склонах, подрезанных дорогами, и, реже, в геологических канавах и естественных обнажениях горных пород. Как следствие, созданная сеть характеризуется закономерной неравномерностью: в центральной части площади плотность пунктов наблюдений соответствует масштабу 1:50000, а на периферии – 1:200000.

При изучении коренного выхода, кроме типа и залегания пород, фиксировались следующие особенности их нарушенности: основные системы трещин, зоны трещиноватости, зоны дробления и тектонитов, признаки перемещений по трещинам (зеркала скольжения, ориентировка штрихов, смещения маркеров). Массовые замеры элементов залегания трещин проводились в соответствии с известными в структурной геологии правилами. Участки коренного выхода для измерений выбирались исходя из их структурно-вещественной однородности и минимального воздействия техногенных процессов на породный массив. В каждом пункте измерялось в среднем по 100 трещин, поскольку такое количество является оптимальным для выявления всех разрывных систем в локальном объеме горных пород [Nikolaev, 1992; Seminsky, 2015].

На этапе обработки данных спецкартирования для каждого пункта наблюдений с массовыми замерами элементов залегания трещин (рис. 5, а) были построены стандартные круговые диаграммы (стереограммы) в плоскостях (рис. 5, б, слева) и изолиниях плотности полюсов трещин (рис. 5, б, справа). Далее с целью реконструкции стресс-тензоров и положения разломных зон локального ранга для каждой из них проводился парагенетический анализ, как это для примера показано на рис. 5, в, г. Стереодиаграмма последовательно сопоставлялась с эталонными трафаретами для правого и левого сдвига, сбросов и взбросов с разными углами падения главного сместителя. При этом положение его полюса присваивалось различным максимумам, начиная с наиболее интенсивного, пока в рамках полученных совпадений, являющихся решениями парагенетического анализа, не будет объяснено происхождение всех систем трещин.

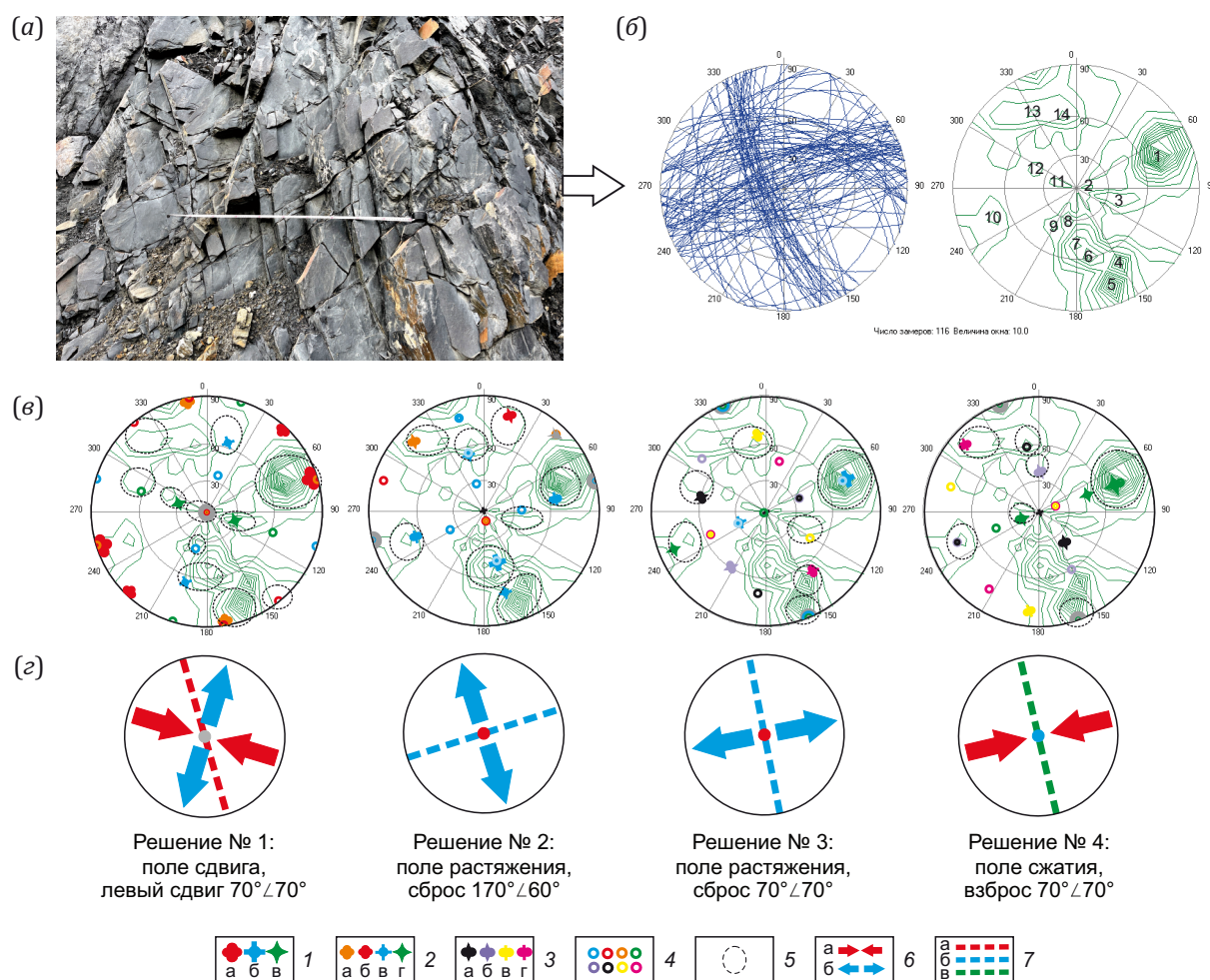


Рис. 5. Пример парагенетического анализа круговой диаграммы трещиноватости (точка наблюдения № 57), позволившего получить решения о четырех типах локальных динамических обстановок, в которых формировалась сеть разрывов коренного выхода.

(a) – фотография трещинной сети; (б) – изображения массового замера трещин (116 шт.) на верхней полусфере в плоскостях (слева) и полюсах с номерами систем трещин (справа) (здесь и далее – верхняя полусфера, сетка Вульфа, величина окна осреднения – 10°); (в-г) – результат сравнения диаграммы с эталонными трафаретами в виде четырех итоговых локальных решений о динамических обстановках для левосдвиговой (реш. № 1), двух сбросовых (реш. № 2, 3) и взбросовой (реш. № 4) зоны (в), а также соответствующих стресс-тензоров сдвига, растяжения и сжатия (г).

1 – полюсы плоскостей левосдвигового (а), сбросового (б) и взбросового (в) разломных сместителей 1-го порядка; 2 – полюсы плоскостей правосдвигового (а), левосдвигового (б), сбросового (в) и взбросового (надвигового) (г) разлома 2-го порядка; 3 – полюсы плоскостей разломов 2-го порядка смешанного типа: левый (а) и правый (б) сдвиг-сброс или сбросо-сдвиг; левый (в) и правый (г) взбросо-сдвиг или сдвиг-взброс; 4 – полюсы второстепенной или дополнительной системы мелких разрывов 3-го порядка; 5 – контур, в котором имеет место совпадение системы трещин, выделяющейся рисунком изолиний на сферограмме, с полюсом системы разрывов эталонного трафарета; 6 – направление действия осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (б); 7 – усредненное положение оси реконструированной левосдвиговой (а), сбросовой (б) и взбросовой (в) разломной зоны.

Fig. 5. An example of the fracturing circle diagram paragenetic analyses (observation point No. 57) which yielded solutions on four types of local dynamic settings where an exposed bedrock fault network was formed.

(a) – fracturing network photographs; (б) – 116 fracture measurement points on the upper hemisphere in planes (left) and poles with fracture system numbers (right) (here and further on – upper hemisphere, Wulff net, averaging window size – 10°); (в-г) – result of comparing the diagram to standard patterns in the form of four final local solutions on dynamic settings for the left-lateral shear (soln. No. 1), two normal fault (solns No. 2, 3) and reverse fault (soln. No. 4) zones (в) and corresponding shear, extension and compression stress tensors (г).

1 – poles of the left-lateral (a), normal (б) and reverse (в) fault planes of the 1st order planes; 2 – poles of the right-lateral (a), left-lateral (б), normal (в) and reverse (thrust) (г) fault planes of the 2nd order; 3 – poles of the planes of the mixed-type faults of the 2nd order: left-lateral (a) and right-lateral (б) strike-slip fault or oblique-slip fault, left-lateral (в) and right-lateral (г) reverse-slip or slip-reverse fault; 4 – poles of the secondary or additional system of small faults of the 3rd order; 5 – contour, in which the fracture system, drawn with isolines on the spherogram, coincides with the pole of the standard pattern fault system; 6 – direction of the principal normal stress axes during compression (а) and extension (б); 7 – average position of the reconstructed left-lateral (а), normal (б) and reverse (в) fault zone axis.

Достоверность полученного решения, кроме совпадения в положении эталонных и природных систем, подтверждалась дополнительными характеристиками разрывной сети: вариациями угла между сопряженными системами разрывов парагенезиса в пределах величин, статистически установленных для условий сжатия, растяжения или сдвига [Seminsky, 1997; Burzunova, 2011]; наличием противоположных разбросов полюсов разрывов у асимметричных максимумов сопряженных систем в сторону оси сжатия [Nikolaev, 1992]; соответствием морфологии трещин типу системы (скол или отрыв) в тройственном парагенезисе; повторяемостью парагенезиса в соседних пунктах наблюдений, косвенно свидетельствующей о единой причине их происхождения.

В ходе анализа использовались все максимумы диаграммы, совпадающие с эталонными системами разрывов 1-го и 2-го порядка. Однако системы с низкой плотностью при выборе решений учитывались только в том случае, если к ним относились протяженные разрывы, плоскости с зеркалами и/или штрихами скольжения. При проведении анализа одна и та же система разрывов могла участвовать в разных решениях вследствие возможности активизации в более молодых полях напряжений [Nevsky, 1979; Rastsvetaev, 1987].

В процессе парагенетического анализа трещинной сети алевролитовых сланцев в пункте № 57 для сопоставления с полюсами главного сместителя (Y) эталонных трафаретов в первую очередь была выбрана наиболее интенсивная система № 1 ($70^\circ \angle 70^\circ$) (здесь и далее первая цифра – азимут падения, вторая угол падения). Видно (рис. 5, в, реш. 1), что наибольшее совпадение дает трафарет левого сдвига, который объясняет происхождение наибольшего количества максимумов. Кроме того, максимуму № 1 соответствуют трафареты сброса и взброса (рис. 5, реш. 3 и 4), объясняющие наличие двух совокупностей из шести максимумов. На поверхностях некоторых трещин системы № 1 имеются штрихи скольжения, склоняющиеся под углом 65° , что свидетельствует о смещении блоков по падению с небольшой горизонтальной составляющей.

Возможность существования решений 1, 3 и 4 о разнотипных подвижках в разломной зоне с элементами залегания $70^\circ \angle 70^\circ$ (рис. 5, в, г), кроме совпадения совокупности большинства систем трещин с эталонными трафаретами, косвенно подтверждается наличием в системе № 1 крупных прямолинейных разрывов сколового типа с зеркалами скольжения. Более того, пункт наблюдения расположен в 100 м от сместителя Наталкинского разлома (см. рис. 2, д), соответствующего по ориентировке системе № 1. Таким образом, рассматриваемый коренной выход относится к зоне влияния этого разлома, а полученные решения отражают его активизацию как левого сдвига, сброса и взброса в разнотипных динамических обстановках.

Второй по интенсивности максимум № 5, а также близлежащий к нему максимум № 4 участвуют в ито-

говых решениях как второстепенные системы (рис. 5, в, г), но при их использовании в качестве главного сместителя не дали самостоятельных решений.

Максимумы № 6 и 7 ($170^\circ \angle 60^\circ$, $180^\circ \angle 50^\circ$) рассматривались в качестве единой системы с вариациями ориентаций плоскостей трещин. Перебор трафаретов дает связанное с этой системой решение сброса (рис. 5, реш. 2), в котором участвуют семь максимумов. Главная система (Y) представлена крупными сколами и имеет асимметричный разброс трещин в сторону оси сжатия. Повышенной плотностью трещин представлены системы, соответствующие в эталоне сколам Риделя (R и R'), а также разрывам t-типа (поперечные второстепенные сбросы со штрихами скольжения по падению плоскости трещин). Имеется также пара трещинных систем меньшей интенсивности, соответствующая в эталоне разрывам n-типа (второстепенные сдвиги в зоне растяжения).

Сравнение остальных максимумов стереограммы с эталонами не привело к удовлетворительным результатам по степени их совпадения. В итоге происхождение всех систем трещинной сети в рассмотренном коренном выходе получило объяснение существованием четырех локальных напряженных состояний – обстановки сдвига, сжатия и растяжения в двух направлениях (рис. 5, в, г), которые имели место при подвижках в зонах разломов северо-северо-западной и восточно-северо-восточной ориентировки.

Представленная на примере пункта № 57 методика сопоставления круговой диаграммы с эталонами применялась для оставшихся пунктов, в каждом из которых получено в среднем 4–5 решений парагенетического анализа, что для участка исследований составило 241 решение. Каждое решение включает ориентировку и тип реконструированной разломной зоны – сброс (79 реш.), взброс или надвиг (72 реш.), левый (51 реш.) или правый (39 реш.) сдвиг, а также соответствующие им локальные стресс-тензоры растяжения, сжатия или сдвига. Значительное количество и разнообразие локальных решений, полученных для изучаемого участка земной коры (см. рис. 2), свидетельствует о его многостадийной деформационной истории, когда одни и те же разрывные нарушения после заложения испытывали активизацию в разных динамических обстановках.

На этапе составления схемы разломных зон локальные решения парагенетического анализа были отдельно для сбросов (рис. 6, а), взбросов (надвигов) (рис. 6, б), левых (рис. 6, в) и правых (рис. 6, г) сдвигов вынесены на схемы пунктов наблюдения в виде элементов залегания – линии простирания и значения угла падения разломной зоны, реконструированной для коренного выхода. Далее зоны трассировались через пункты с аналогичными решениями (близкие значения азимута и угла падения). Затем в пределах каждой из закартированных зон анализировались структурные наблюдения, проведенные в коренных выходах и характеризующие разломную систему. В результате

на схемах были выделены и обозначены отличающиеся знаками разломные зоны, находящиеся на разных стадиях развития внутренней структуры (см. рис. 3). Ранние стадии представлены зонами парагенетически связанной трещиноватости, в пунктах проявления которой наличие сместителя не установлено (рис. 6, а–г). Они показаны на схеме в виде заштрихованных полос в отличие от зон более поздних стадий развития, оси которых обозначены сплошной линией, поскольку в их пределах были зафиксированы крупные трещины с зеркалами скольжения или тектонизированные разрывные поверхности соответствующей ориентировки.

При отражении на схеме строения мест пересечения зон определяющим фактором являлось представительство одной из них более достоверными решениями, которые фиксировались, в том числе, и за пределами пункта сочленения.

На заключительном этапе построений производился анализ пространственных взаимоотношений разломных зон четырех морфогенетических типов (рис. 6, а–г), результатом которого стала единая схема (рис. 6, д), на которой часть разрывных структур, отмеченных черным цветом, отличалась неоднократной активизацией в разнотипных динамических обстановках.

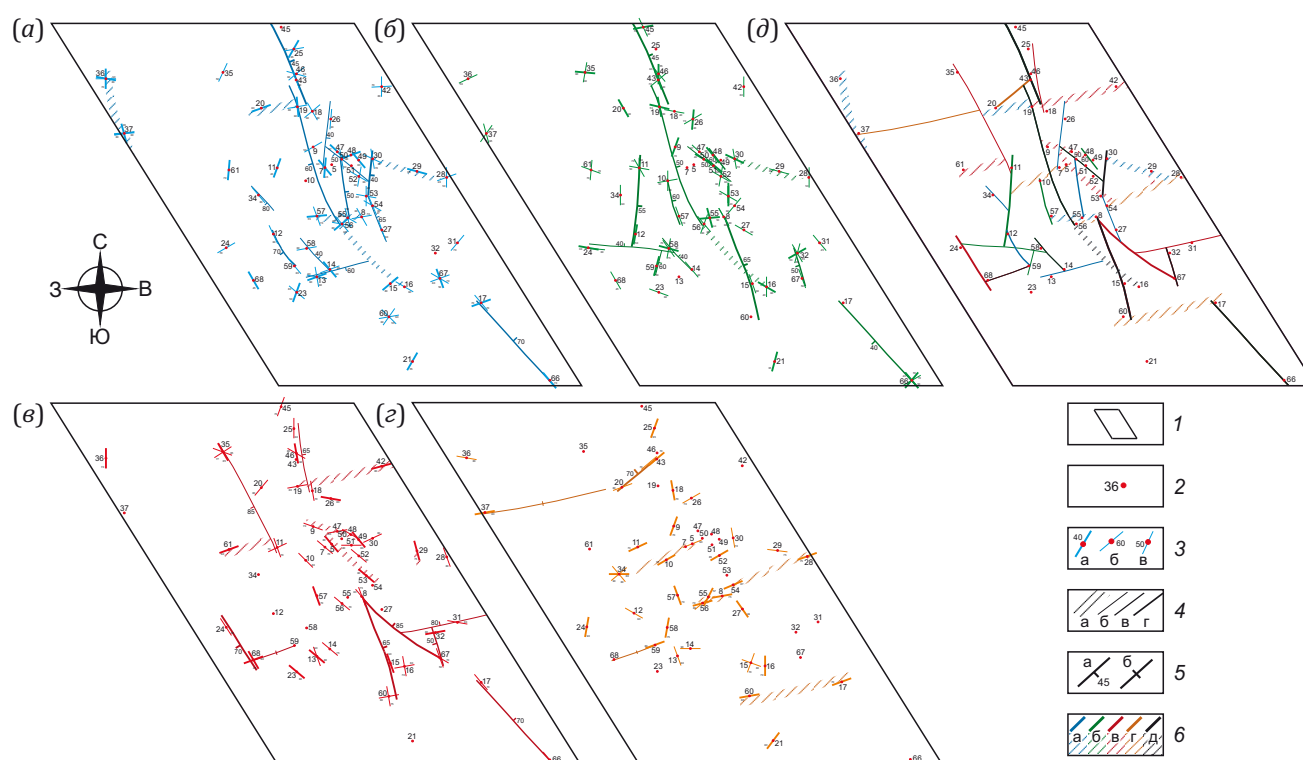


Рис. 6. Схема разрывных структур центральной части Наталкинского рудного поля (д), составленная на основе трассирования сбросовых (а), взбросовых (б), левосдвиговых (в) и правосдвиговых (г) разломных зон по однотипным локальным решениям парагенетического анализа, восстановленным для сетей тектонических трещин в пунктах наблюдения.

1 – контуры участка; 2 – пункт геолого-структурных наблюдений и его номер; 3 – решение парагенетического анализа об элементах залегания и типе разломной зоны локального ранга, реконструированной в пункте наблюдения с высокой (а), средней (б) и низкой (в) степенью достоверности: линия – азимут простирания зоны, цифра – угол падения (показан со стороны висячего крыла); цвет – морфогенетический тип зоны; 4 – разломные зоны, выделенные на участке картирования как зоны трещиноватости (а), зоны трещиноватости с зеркалами скольжения на некоторых крупных разрывных поверхностях (б), зоны дробления мощностью менее 0.15 м (в), зоны дробления мощностью 0.15–1.00 м и более (г) (морфогенетический тип зоны); 5 – наклонное (а) (цифра – угол падения) и субвертикальное (б) залегание разломной зоны, выделенной на участке картирования; 6 – морфогенетический тип выделенных на участке картирования разломных зон: а – сбросы, б – взбросы-надвиги, в – левые сдвиги, г – правые сдвиги, д – разного типа на отдельных этапах развития.

Fig. 6. Map of the fault structures in the central Natalka ore field (д) based on the normal (а), reverse (б), left-lateral (в) and right-lateral (г) fault zone tracing from the same-type local paragenetic analysis solutions reconstructed for tectonic fracture networks in observation points.

1 – contours of the study area; 2 – geologiocal-structural observation point and its number; 3 – paragenetic analysis solution on the altitude (dip and strike) and type of the local-rank fault zone reconstructed in the observation points with a high (а), moderate (б) and low (в) degree of certainty: line – a zone strike azimuth, figure – a dip angle (shown from the hanging wall side); color – a morphogenetic type of zone; 4 – fault zones mapped as fracture zones (а), fracture zones with slickensides on some large fault surfaces (б), crush zones less than 0.15 m thick (в), crush zones 0.15–1.00 m or more thick (г) (morphogenetic type of a zone); 5 – mapped inclined (а) (figure – a dip angle) and sub-vertical (б) bedding fault zone; 6 – morphogenetic type of the mapped fault zones: а – normal faults, б – reverse faults – thrusts, в – left-lateral shears, г – right-lateral shears, д – different-type at certain stages of development.

На этапе интерпретации результатов спецкартирования составленная схема анализировалась на предмет выявления особенностей строения разломной сети Наталкинского рудного поля и динамических обстановок ее формирования.

Как следует из роза-диаграммы простираний осей разломных зон (см. [рис. 2, а](#)), на участке исследований выделяется пять систем разрывных структур. Наиболее распространены нарушения системы 1, которые простираются в северо-западном направлении в соответствии с ориентировкой в регионе зоны Тенькинского разлома (см. [рис. 1](#)). Это самые протяженные разрывные структуры участка картирования ([рис. 6, д](#)), многие из которых имеют в плане форму дуги, выпуклая часть которой обращена на юго-запад. Большая часть из них принадлежит достаточно широкой полосе, которая простирается через весь участок, контролируя рудные тела месторождения Наталка. При этом основная минерализованная зона располагается в северо-восточном крыле Главного разлома, отчетливо выделяющегося по данным спецкартирования. Среди типов разрывов, определенных для данной полосы посредством парагенетического анализа трещинных сетей, доминируют взбросы с наклоном на северо-восток ([рис. 6, б](#)). Это свидетельствует о значимой роли сжатия в формировании разломных структур системы 1, причем форма изгиба осей разломных зон отражает воздействие на осадочно-вулканогенную толщу именно с северо-востока.

Система 2 занимает ортогональное положение по отношению к системе 1 и практически не уступает последней по распространенности разрывных структур в центральной части НРП (см. [рис. 2, а](#)). Наиболее протяженными представителями данной системы являются субширотные разломные зоны (см. [рис. 2, а](#)), положению осей которых можно поставить в соответствие тектонические нарушения, выделенные ранее на территории рудного поля при проведении картирования в крупном масштабе [Geological-Structural Map..., 1991], – Глухаринский, Геологический разломы (см. [рис. 2, д](#)). Эти разрывные структуры, по-видимому, образуют одну субширотную разломную зону, отчетливо проявляющуюся и в более мелком масштабе (см. [рис. 1](#)). Она может именоваться Инякано-Колымской в соответствии с названием разлома, который, простираясь в широтном направлении, пересекает Тенькинскую зону в пределах НРП за северной границей участка исследований [Zhirnov, 1984]. Рассредоточенное распространение рассматриваемых разломов в широкой полосе, а также проявление их представителей на участке спецкартирования в виде зон трещиноватости позволяют предположить, что Инякано-Колымская зона является выражением в чехле скрытого разлома фундамента. Согласно решениям парагенетического анализа в отдельных пунктах геолого-структурных наблюдений, ему свойственна правосдвиговая кинематика ([рис. 6, г](#)), хотя, судя по смещению одного из позднеюрских интрузивов за границами участка исследований (см.

[рис. 1](#)), один из этапов его развития характеризовался противоположным типом подвижек.

Разрывные структуры трех оставшихся систем (см. [рис. 2, а](#)) существенно уступают двум первым по размерам и распространенности на участке спецкартирования ([рис. 6, д](#)). Судя по развитию в зонах их влияния крупных разрывов со штрихами скольжения на плоскостях и дроблением пород, это главным образом разломы разного морфогенетического типа, игравшие определенную, но второстепенную роль в строении узла пересечения крупных дизъюнктивов – Тенькинского и Инякано-Колымского.

Динамические обстановки, соответствующие разным стадиям развития этого узла, были восстановлены на основе парагенетического анализа сети разрывных структур, выделенных в результате спецкартирования. Анализировались простирания разломных зон на основе сопоставления роза-диаграммы (см. [рис. 2, а](#)) с трафаретами, представляющими эталонные парагенезисы разрывов в разломных зонах, формирующихся при сжатии, растяжении, правом или левом сдвиге (см. [рис. 3, в](#)). Результаты анализа представлены в табличной форме на [рис. 7](#) (строка № 1).

Вследствие принадлежности участка исследований к узловому сочленению разломных зон 1-го порядка анализ проводился для обоих разрывных направлений. В первом варианте ([рис. 7](#), левая половина) главный сместитель разломной зоны (У-тип) эталонного трафарета ориентировался в соответствии с простиранием северо-западной системы (1) разрывных структур Тенькинской разломной зоны, а во втором ([рис. 7](#), правая половина) – согласно ориентировке субширотной системы (2) нарушений Инякано-Колымской зоны скрытого разлома фундамента.

Для северо-западной Тенькинской зоны ([рис. 7](#), левая половина) первым решением парагенетического анализа является правый сдвиг при северо-восточном положении оси сжатия и северо-западной ориентации оси растяжения (решение Т-1), поскольку со структурными элементами эталонного парагенезиса совпадает наибольшее количество разрывных систем участка исследований – 4 (системы 1, 3–5). В качестве второго решения должна быть принята обстановка сжатия в направлении СВ-ЮЗ (решение Т-2), так как оставшаяся система 2 могла сформироваться при данном типе напряженного состояния. Она точно совпадает с простиранием т-сколов, хотя других соответствий с эталонным положением систем разрывов 2-го порядка в данном решении нет. Вместе с тем два оставшихся варианта обнаруживают в целом большее количество совпадений, что позволяет принять их в качестве вполне вероятных решений: Т-3 – левый сдвиг с субмеридиональной ориентацией оси растяжения и субширотным простиранием оси сжатия; Т-4 – растяжение в направлении СВ-ЮЗ. Дополнительным аргументом существования рассматриваемых обстановок в формировании разломной сети участка исследований для решения Т-4 является точность совпадения с системами

разрывов эталона, а для решения Т-3 – близкое соответствие системы 2 эталонным направлениям простираний сколов R'- или n (n')-типа.

Для субширотной Инякано-Колымской зоны (рис. 7, правая половина) получено два решения парагенетического анализа, в рамках которых объясняется происхождение всех направлений разрывных структур центральной части НРП. Главным из них является обстановка субмеридионального сжатия (решение И-1), которая объясняет происхождение четырех основных систем разрывных структур участка исследований (1–4). Пятая система по большому счету совпадает с эле-

ментами всех оставшихся эталонов, но наиболее точное соответствие устанавливается для варианта сдвига с северо-западной ориентацией оси сжатия и северо-восточной ориентировкой оси растяжения (решение И-2), который и был принят в качестве второго решения парагенетического анализа. В этом решении, кроме системы 1, соответствующей Y-сколам главного сместителя, и уже упоминавшейся системы 5, отвечающей за наличие правосторонних R-сколов, устанавливается наличие сбросов n(n')-типа, образующих систему 3. Можно предположить, что в качестве левых сдвигов R'-типа, обычно составляющих в подобных

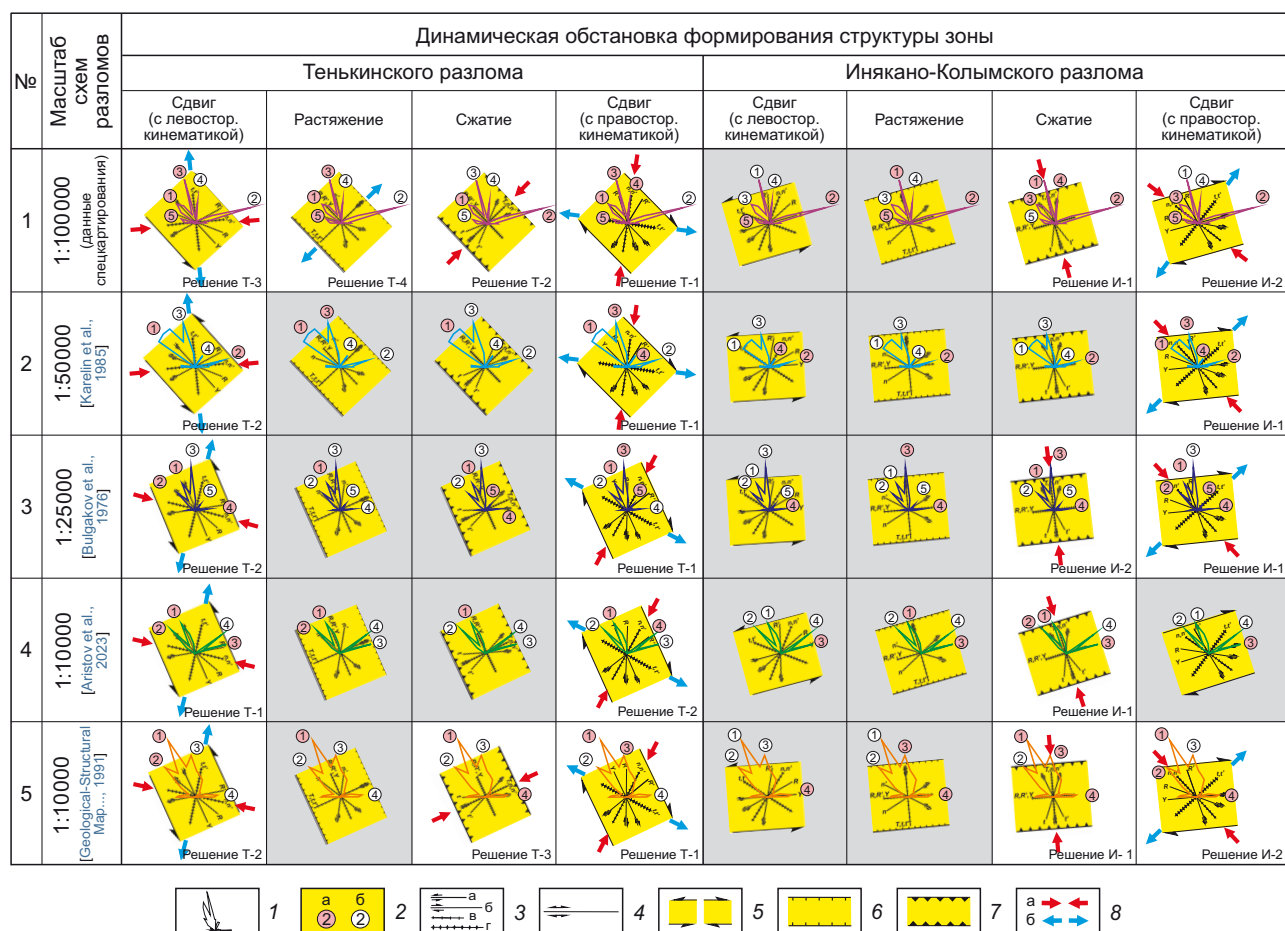


Рис. 7. Сопоставление результатов парагенетического анализа разрывных сетей центральной части НРП, представленных на рис. 2 в соответствии с геологическими картами разного масштаба.

1 – роза-диаграмма простираний разрывных структур; 2 – направления разломов, совпадающие (а) или не совпадающие (б) с системами разрывов эталонного парагенезиса; 3 – плоскости левых сдвигов (а), правых сдвигов (б), сбросов (в) и взбросов (надвигов) (г) 2-го порядка; 4 – плоскости трансформационных сдвигов 2-го порядка; 5–7 – зоны левого и правого сдвига (5), сброса (6) и взброса (надвига) (7) 1-го порядка; 8 – ориентировка субгоризонтальных осей сжатия (а) и растяжения (б). Латинскими буквами обозначены магистральный сместитель 1-го порядка (Y) и разнотипные разрывы 2-го порядка (R', R, n', n, t', t, T). Серым цветом окрашены ячейки с результатами парагенетического анализа, не являющимися его решениями.

Fig. 7. Comparison of the paragenetic analysis results for the fault networks in the central Natak ore field displayed in Fig. 2 in accordance with geological maps of different scales.

1 – rose diagram for the strikes of fault structures; 2 – fault directions coinciding (a) or not coinciding (b) with the standard-paragenesis fault systems; 3 – planes of the left-lateral shears (a), right-lateral shears (b), normal faults (b) and reverse faults (thrusts) (r) of the 2nd order; 4 – planes of the transformational shears of the 2nd order; 5–7 – zones of the left-lateral and right-lateral shears (5), normal fault (6) and reverse fault (thrust) (7) of the 1st order; 8 – orientation of the sub-horizontal compression (a) and extension (b) axes. Roman characters stand for the main fault plane of the 1st order (Y) and different-type faults of the 2nd order (R', R, n', n, t', t, T). Grey color shows the cells with the paragenetic analysis results which are not the analysis solutions.

разломных зонах сопряженную пару с R-сколами, активизируются разрывные структуры системы 1. Они близки по ориентировке с эталонным положением R'-сколов и, безусловно, уже присутствовали в пределах разломного узла как основные продольные разрывы Тенькинской зоны.

Для подтверждения достоверности полученных решений к дальнейшему анализу привлекались определения кинематики разломных зон, полученные в результате спецкартирования и представленные на схемах [рис. 6, а–г](#). По элементам залегания разломных зон были построены четыре круговые диаграммы, соответствующие отдельно сбросам, взбросам, правым и левым сдвигам ([рис. 8](#)). Для каждой из них с внешней стороны большого круга дугами отмечены системы, выделенные по простираниям зон без учета падения плоскостей, так как парагенетический анализ проводился по трафаретам, которые отражают положение структурных элементов эталонного парагенезиса в плане. Далее ориентация и морфогенетические типы этих систем сопоставлялись с аналогичными характеристиками разрывных направлений у эталонов, которые представляют шесть решений парагенетического анализа, полученных для узлового сочленения Тенькинской и Инякано-Колымской разломных зон.

Из результатов сопоставления следует, что наиболее достоверным из восстановленных динамических обстановок является левый сдвиг по Тенькинской зоне ([рис. 8, б](#)), так как в решении Т-3 каждому из эталонных направлений разрывов 2-го порядка и главному сместителю соответствуют по типу и простиранию системы разломных зон, выделенные в результате спецкартирования (1, 2, 6 и 8). Далее по количеству разрывных направлений, представленных на площади исследования разломными зонами, следует решение И-2 о правом сдвиге по Инякано-Колымской зоне ([рис. 8, а](#)). Кроме направления Y-сколов главного сместителя (система 1 – правые сдвиги), на участке картирования были выделены разломные зоны, соответствующие R'-сколам (система 2 – левые сдвиги) и разрывам $n(n')$ -типа (система 7 – сбросы).

Решение Т-1 о правом сдвиге вдоль Тенькинской зоны также подтверждается совпадением трех систем закартированных разрывов с эталонными направлениями нарушений 2-го порядка ([рис. 8, д](#)): системы 3 – левые сдвиги R'-типа, системы 4 – взбросы $t(t')$ -типа и системы 7 – сбросы $n(n')$ -типа. Недостатком данного решения является отсутствие в этом наборе Y-сколов главного сместителя, но есть по крайней мере три причины, по которым рассматриваемую обстановку можно считать существовавшей в истории развития структуры разломного узла. Во-первых, это решение подтверждается тремя направлениями закартированных разрывов, т.е. по данному признаку формально входит в первую тройку уже рассмотренных наиболее достоверных решений. Во-вторых, оно является главным среди реконструкций, полученных для Тенькинской разломной зоны, так как объясняет происхож-

ждение четырех из пяти систем, выделяющихся на роза-диаграмме (см. [рис. 7](#)). В-третьих, в ряде пунктов наблюдений участка исследований реконструировано несколько локальных решений о разломных зонах северо-западной и субмеридиональной ориентировок (см. [рис. 6, г](#)), соответствующих в рассматриваемом эталоне правым сдвигам Y- и R-типа, которые, однако, не трасируются по простиранию, что может быть связано со спецификой неравномерной и сравнительно редкой сети точек массового замера трещиноватости.

Три оставшихся решения парагенетического анализа ([рис. 8, в, г, е](#)) равноценны в отношении степени соответствия составляющих их разрывных систем направлениям и кинематике разломных зон, выявленных при спецкартировании в центральной части НРП. Для каждого из них подтверждается существование на местности двух направлений разрывов определенного морфогенетического типа. Это является достаточным для того, чтобы считать рассматриваемые решения достоверными, так как одно из совпадений соответствует направлению, которое в эталонных трафаретах зон сброса (решение Т-4) и взброса (решения И-1 и Т-2) отвечает не только за Y-сколы главного сместителя, но и за аналогичные по простиранию сколы R- и R'-типа. Кроме подтверждения существования этих главных структурных элементов разломных зон, в каждом из рассматриваемых случаев устанавливается соответствие еще одной системы (решение Т-4 – левые сдвиги n' -типа; решение И-1 – взбросы $n(n')$ -типа; решение Т-2 – левые сдвиги t -типа), что свидетельствует о подтверждении существования на участке картирования большинства структурных элементов эталонного парагенезиса.

Таким образом, все шесть решений парагенетического анализа, полученные при сопоставлении лучей роза-диаграммы с эталонными наборами разрывных систем (см. [рис. 7](#), первая строка), являются достоверными и могут служить основой для выявления типов напряженного состояния, в которых формировалась структура разломного узла, вмещающего рудное поле на разных этапах тектогенеза. Для этого представляющие решения разломные зоны и соответствующие их кинематике ориентировки осей главных нормальных напряжений сопоставлялись друг с другом с целью выявления динамических обстановок регионального уровня, в которых могла происходить совместная активизация движений по взаимодействующим Тенькинской и Инякано-Колымской разломным зонам.

Как следует из [рис. 8](#), таких обстановок три. Первая из них (I) представлена только одним, не объединяющимся с другими решением Т-2 ([рис. 8, е](#)) и характеризующимся сжатием вулканогенно-осадочной толщи в направлении СВ-ЮЗ, под действием которого в Тенькинской зоне северо-западного простирания произошли взбросовые перемещения. Они реализовывались по сети разрывов, среди которых доминировали продольные взбросы, изгибающиеся подобно Главному в плане, с преобладающим наклоном к северо-востоку

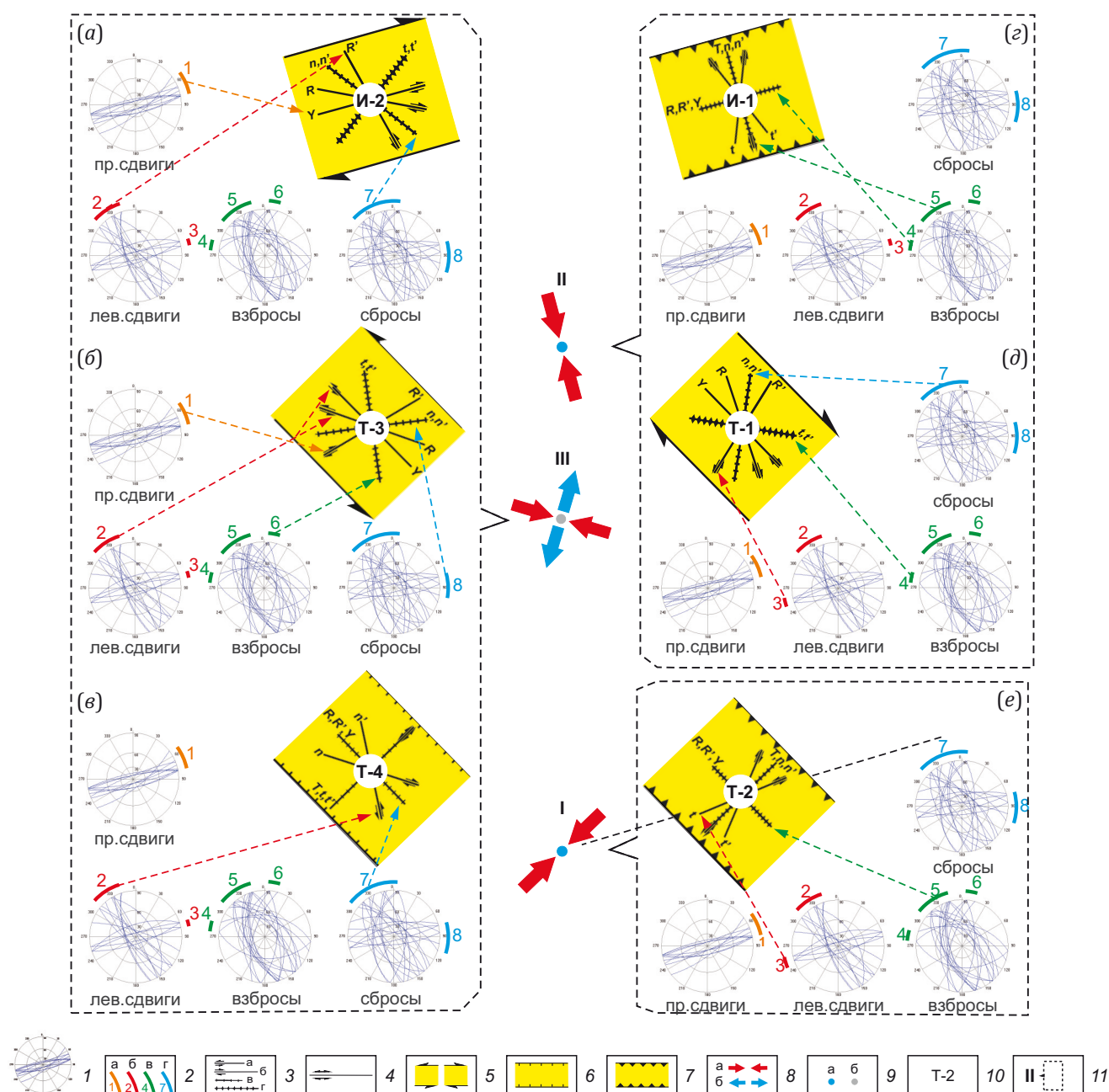


Рис. 8. Распределения разломных зон разных морфогенетических типов, полученные по данным спецкартирования, в шести решениях парагенетического анализа (а-е), которые позволяют выявить три вида напряженного состояния (I-III), имевших место на разных этапах геодинамического развития региона.

1 – диаграммы разломных зон одного морфогенетического типа (а – взбросы, б – сбросы, в – левые или г – правые сдвиги), представленные на верхней полусфере в соответствии с элементами их залегания, установленными при спецкартировании для участка исследований (см. рис. 6, а-г); 2 – системы правосдвиговых (а), левосдвиговых (б), взбросовых (в) или сбросовых (г) разломных зон (цифра – порядковый номер), выделяющиеся по круговым диаграммам; 3-8 – см. условные обозначения к рис. 7; 9 – обозначения субвертикальных осей главных нормальных напряжений: а – ось растяжения, б – ось промежуточная; 10 – индекс решения парагенетического анализа согласно рис. 7; 11 – решения парагенетического анализа, соответствующие одной из трех динамических обстановок регионального уровня, показанных в виде стресс-тензоров (I-III).

Fig. 8. Distributions of the fault zones of different morphogenetic types, obtained from the special-purpose mapping data, in six paragenetic analysis solutions (a-e) making it possible to identify three types of stress state (I-III) at different stages of the regional geodynamic development.

1 – diagrams of fault zones of the same morphogenetic types (a – reverse faults, б – normal faults, в – left-lateral or г – right-lateral shears) on the upper hemisphere in accordance with their altitude (dip and strike) determined during special-purpose mapping of the study area (see Fig. 6, a-r); 2 – right-lateral strike-slip (a), left-lateral strike-slip (б), reverse (в) or normal (г) fault zone systems (figure – an ordinal number) seen on the circle diagrams; 3-8 – see legend to Fig. 7; 9 – designations of the sub-vertical principal normal stress axes: а – extension axis, б – intermediate axis; 10 – paragenetic analysis solution index in accordance with Fig. 7; 11 – paragenetic analysis solutions corresponding to one of three regional dynamic settings shown as stress tensors (I-III).

(см. рис. 6, б), а также менее протяженные восточно-северо-восточные левые сдвиги (см. рис. 6, в).

Вторая динамическая обстановка (II) характеризуется сжатием пород региона в субмеридиональном направлении и объединяет два решения парагенетического анализа (И-1 и Т-1), так как правый сдвиг по Тенькинскому направлению (рис. 8, д) соответствует t' -сколам в парагенезисе взбросовых перемещений в Иньякано-Колымской разломной зоне (рис. 8, г). Судя по схемам разломных зон (см. рис. 6), разрывные структуры соответствующего данной обстановке типа не отличаются существенной протяженностью на участке исследования. В то же время два представляющих ее решения являются основными в плане объяснения происхождения систем разрывов в обеих пересекающихся разломных зонах (см. рис. 7, строка 1).

Третья динамическая обстановка (III) оставила наибольший след в формировании узлового сочленения (рис. 8, а–в), так как включает три оставшихся решения парагенетического анализа. В них задействованы пять из восьми систем разнотипных разрывных структур, выделенных при спецкартировании в центральной части НРП. Участие главных сдвиговых систем 1 и 2 в решении о левосторонних перемещениях в зоне Тенькинского разлома и правосторонних подвижках по Иньякино-Колымской разломной зоне свидетельствует об их сопряженности. При этом формирование структуры узлового сочленения, судя по пространственной ориентировке этих дизъюнктивов, происходило в обстановке сдвига при западно-северо-западном простирании оси сжатия и северо-северо-восточной ориентации оси растяжения. Активизация разломных зон под влиянием рассматриваемого напряженного состояния происходила не синхронно, так как согласно оставшемуся решению Т-4 парагенетического анализа разрывы тенькинского направления в границах зоны Иньякано-Колымского правого сдвига (решение И-2) выполняли роль сбросов $n(n')$ -типа (рис. 8, а, в). К ним относятся Главный и другие протяженные разломы, контролирующие основную минерализованную зону Наталкинского золоторудного месторождения.

Таким образом, закономерности строения сети разрывных структур, выявленной при спецкартировании, и реконструкции, полученные посредством их парагенетического анализа, взаимно дополняют друг друга, свидетельствуя о том, что положение Наталкинского рудного поля контролируется узловым сочленением двух крупных разломных зон. Это согласная с основными тектоническими структурами региона Тенькинская зона, являющаяся северо-восточным продолжением крупнейшего в Яно-Колымском орогенном поясе Адыча-Тарынского разлома, и поперечная Иньякано-Колымская зона, представляющая скрытый разлом фундамента. В центральной части НРП восстановлено четыре режима перемещений в Тенькинской зоне и два – в Иньякано-Колымской, которые группируются в три этапа развития структуры разлом-

ного узла, каждому из которых соответствует определенный тип напряженного состояния регионального уровня.

Наиболее проявлена обстановка сдвига с западно-северо-западной осью сжатия и северо-северо-восточной осью растяжения, в которой сочленяющиеся дизъюнктивы развивались асинхронно: левый сдвиг по Тенькинской зоне, правый – по Иньякано-Колымскому разлому со сбросами по рудоконтролирующим структурам тенькинского направления, попадающим в зону его динамического влияния. Еще одной обстановкой развития узлового сочленения является сжатие в субмеридиональном направлении, инициирующее взбросообразование в Иньякано-Колымской зоне в совокупности с сопряженными правыми сдвигами по разрывам тенькинского направления. Кроме этих региональных обстановок, в районе исследования восстановлено сжатие в направлении СВ-ЮЗ, но его признаки выявлены только для Тенькинской зоны, продольные разломы которой характеризуются взбросовой кинематикой и изгибом в плане, свидетельствующим о давлении с северо-востока.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Главными результатами спецкартирования является схема разломных зон центральной части Наталкинского рудного поля (см. рис. 6, д), а также реконструкция трех типов напряженного состояния регионального уровня, характерных для отдельных этапов структурообразования (рис. 8). Обсуждение этих результатов проводится ниже посредством сравнения составленной схемы с разломными сетями, показанными для участка исследований на разномасштабных геологических картах, а также привлечения к анализу представлений предшественников о динамических обстановках формирования структуры рудного поля и рудоконтролирующей роли отдельных составляющих ее разломных систем. Это позволит, с одной стороны, обобщить на новом уровне исследований закономерности структурообразования в пределах НРП с акцентом на рудном этапе, а с другой – сделать заключение о возможностях и перспективах использования спецкартирования для повышения качества геологической съемки в части оценки напряженно-деформированного состояния земной коры.

5.1. Особенности строения осадочно-вулканогенной толщи НРП по данным спецкартирования

Во вводной части статьи были представлены сети разломных зон изучаемого района, закартированные предшественниками в масштабе 1:200000 (см. рис. 1), 1:50000 (см. рис. 2, б), 1:25000 (см. рис. 2, в) и 1:10000 (см. рис. 2, г, д). Масштаб составленной по данным спецкартирования схемы (см. рис. 2, а) можно в целом оценить, как 1:100000 в соответствии с осреднением детальности структурных исследований, проведенных, судя по плотности пунктов наблюдений, для центральной

части площади в масштабе 1:25000, а на периферии – 1:200000.

Сопоставление рис. 2, а, с рис. 2, б, и рис. 2, в, свидетельствует, с одной стороны, о том, что детальность отражения разломной структуры центральной части рудного поля на схеме спецкартирования выше, чем на карте масштаба 1:50000, и больше соответствует карте масштаба 1:25000. С другой стороны, это является лишь формальной оценкой преимущества спецкартирования, поскольку очевидно, что авторы схем рис. 2, б, и рис. 2, в, использовали разные подходы к выявлению разломной структуры рудного поля, что еще более отчетливо проявлено на картах наиболее крупного, десяти тысячного, масштаба (рис. 2, г, д). Несмотря на одинаковую детальность, на схеме с рис. 2, г, отражающей первый стиль деструкции, как и на рис. 2, б, закартировано небольшое количество разломов, тогда как на схеме с рис. 2, д, соответствующей, как и сеть разрывов рис. 2, в, второму стилю, представлена густая сеть разрывов, причем в этом случае она является замкнутой, т.е. делит осадочно-вулканогенную толщу на отдельные блоки. Схема разрывных структур, выявленных при спецкартировании (см. рис. 2, а), относится ко второму, разломно-блоковому, стилю, хотя в разломных зонах северо-западной системы отчетливо проявлена изогнутость в плане.

Сделанный вывод подтверждают результаты сопоставления системности разломных сетей, представ-

ленной для каждой из схем на роза-диаграммах разрывных структур. Их сопоставление друг с другом (см. рис. 2, е), прежде всего, свидетельствует о подобии всех схем, так как на каждой из них представлены разломы трех главных для участка исследования систем: северо-северо-западной (I), субширотной (II) и северо-западной (III). Однако на схеме спецкартирования (см. рис. 2, а), как и на схемах, отражающих второй стиль (см. рис. 2, в, д), присутствует меридиональная система V, но нет северо-восточной системы (IV), которая имеется на схемах, отвечающих первому стилю (см. рис. 2, б, г).

Схема спецкартирования по набору разрывных направлений практически аналогична схеме с детальной карты м-ба 1:10000, составленной А.И. Калининым с соавторами (см. рис. 2, д), за исключением системы VI, представленной единичными непротяженными разрывными структурами (см. рис. 2, е). Несмотря на существенную разницу в масштабах, на ней выявлены разломные зоны, отражающие фрагментарно положение основных продольных (Наталкинский, Главный, Северо-Восточный, Ветвь, Машковский) и поперечных (Геологический, Глухаринский) разломов центральной части НРП. Удовлетворительная степень соответствия видна на рис. 9, где, кроме осей зон, ранее формализованно «привязанных» к пунктам массовых замеров трещин (см. рис. 6, д), показаны их границы по возможному присутствию соответствующих разрывных

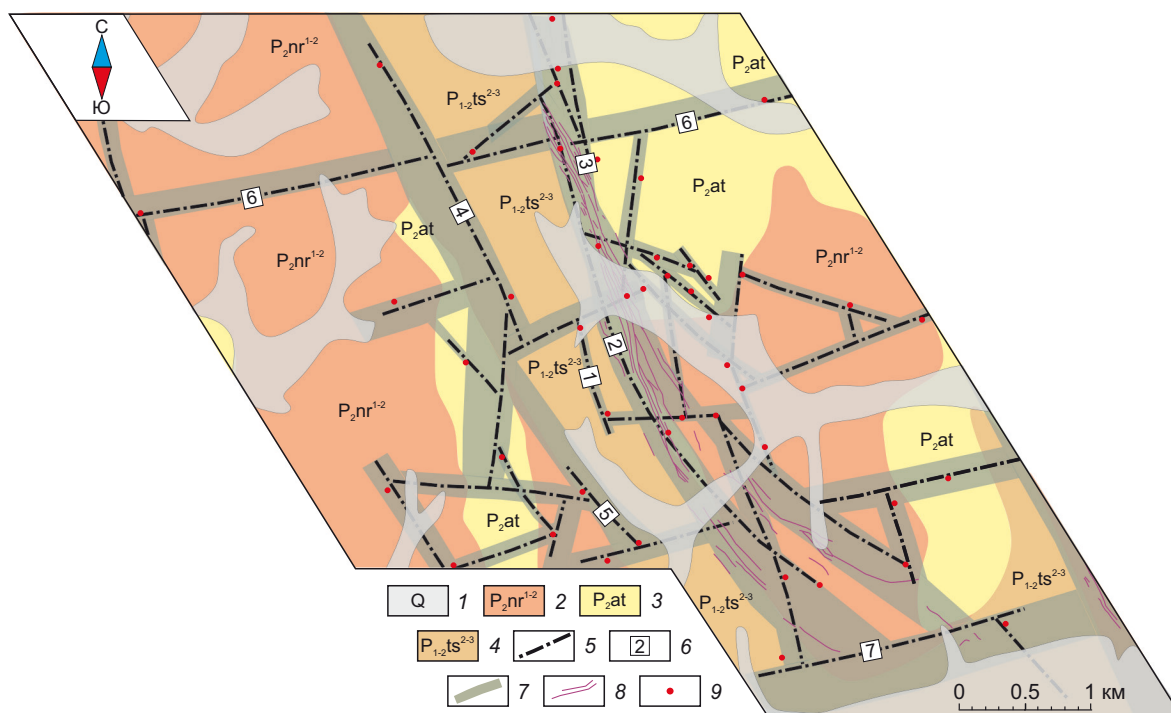


Рис. 9. Схема зонно-блоковой структуры центральной части Наталкинского рудного поля, построенная по результатам спецкартирования.

Границы полей распространения породных комплексов, использованные для схемы в качестве подложки, показаны приблизительно в соответствии с материалами карт [Akinin et al., 2023; Geological-Structural Map..., 1991]. 1 – рыхлые четвертичные отложения, нерасчлененные, преимущественно в техногенном залегании; 2 – нерючинская свита (песчаные алевролиты, мелкозернистые песчаники, алевроглинистые сланцы, гравелиты); 3 – атканская свита (галыково-гравийные алевролиты

и глинистые сланцы, углисто-глинистые сланцы, песчаники, гравелиты, конгломераты); 4 – тасская свита (алевролиты, пиритизированные, алевроитоглинистые и углисто-глинистые сланцы, песчаники, гравелиты); 5 – оси разломных зон, выявленные при спецкартировании (см. рис. 6, д); 6 – номера разломных зон, упоминаемых в тексте (1 – Наталкинская, 2 – Главная, 3 – Северо-Восточная, 4 – Ветвь, 5 – Машковская, 6 – Геологическая, 7 – Глухаринская); 7 – разломные зоны; 8 – рудные тела по [Geological-Structural Map..., 1991]; 9 – пункты геолого-структурных наблюдений, послуживших основой для составления схемы.

Fig. 9. Schematic zone-block structure of the central Natalka ore fields based on the special-purpose mapping results.

The boundaries of the field distribution of rock complexes, used as a substrate, show an approximate correspondence to [Akinin et al., 2023; Geological-Structural Map..., 1991]). 1 – loose deposits of the Quaternary age, undissected, predominantly industrial; 2 – Neryuchi formation (sandy aleurolites, fine-grained sandstones, silty clay shales, gravelites); 3 – Atkan formation (gravel-pebble aleurolites and clay shales, carbonaceous shales, sandstones, gravelites, conglomerates); 4 – Tas formation (aleurolites, pyritized, silty clay and carbonaceous shales, sandstones, gravelites); 5 – fault zone axes identified during special-purpose mapping (see Fig. 6, д); 6 – fault zone numbers mentioned in the text (1 – Natalka, 2 – Main, 3 – Northeast, 4 – Vetv, 5 – Mashkovskii, 6 – Geologicheskii, 7 – Glukharinskii); 7 – fault zones; 8 – ore bodies after [Geological-Structural Map..., 1991]; 9 – points of the geological-structural observations used as a basis for schematic mapping.

парагенезисов в ближайшем окружении. Таким образом, полученная в итоге спецкартирования схема зонно-блоковой структуры в достаточной степени отражает стиль нарушенности центральной части НРП в масштабе 1:100000 и характеризуется закономерной связью с картами, на которых разломная структура района отражена с большей (см. рис. 2, д) и меньшей (см. рис. 1) детальностью. Это позволило расширить некоторые из разломных зон, чтобы учесть в окончательном варианте схемы также установленные при картировании в более крупном масштабе [Geological-Structural Map..., 1991] структурные особенности, как контроль рудных жил или положение контактов разновозрастных породных комплексов.

В соответствии с составленной картой (рис. 9), осадочная толща НРП нарушена сетью разноранговых разломов, зоны влияния которых представлены сетями парагенетически связанных трещин, обусловленными кинематикой перемещений блоков, имевшей место на разных этапах тектогенеза. Разломы группируются в пять систем, среди которых доминируют генерализованное северо-западное и субширотное направления. Это связано с локализацией рудного поля в узле пересечения региональных разломов, что подтверждает мнения некоторых предшественников [Zhirnov, 1984; Nekrasov, 2019]. Как показал проведенный анализ, продольный к складчатой структуре региона Тенькинский разлом взаимодействует с субширотным Иньякано-Колымским скрытым разломом фундамента, представленным в широкой полосе непротяженными разрывами и зонами повышенной трещиноватости (см. рис. 6, д).

Оба направления разломных структур являются рудоконтролирующими. Составленная в результате спецкартирования схема (рис. 9) не противоречит представлениям предшественников о том, что в Тенькинской зоне ключевая роль в миграции рудоносных флюидов принадлежала Главному разлому, висячем крыле которого располагается основная минерализованная зона центральной части месторождения Наталка. На юго-восточном продолжении рудные тела в узкой полосе трассируют этот разлом и отдельно – находящееся восточнее субпараллельное нарушение. Жилы вслед за этими постепенно загибающимися к востоку контро-

лирующими разрывами переходят в зону субширотного Глухаринского разлома, который является одним из главных структурных элементов Иньякано-Колымского дизъюнктива.

5.2. Динамические обстановки формирования структуры осадочно-вулканогенной толщи НРП по данным спецкартирования

Для повышения достоверности реконструкций парагенетического анализа, проведенного по выявленной в результате спецкартирования сети разрывных нарушений (см. рис. 7, строка 1), аналогичные построения проводились для всех схем, рассматриваемых в данной статье в связи с исследованием разломной структуры центральной части НРП (см. рис. 2, б–д). Для каждой из них были составлены роза-диаграммы простираций разломов, которые затем анализировались путем сопоставления с эталонными наборами разрывов зон левого сдвига, сброса, взброса и правого сдвига для двух вариантов. В первом случае положение на трафаретах Y-сколов главного сместителя совмещалось с лучом, соответствующим простирацию Тенькинского (см. рис. 7, левая половина), а во втором – Иньякано-Колымского (см. рис. 7, правая половина таблицы) разлома. Первое решение парагенетического анализа соответствовало эталону, для которого наблюдалось совпадение наибольшего количества систем разрывов 2-го порядка лучам рассматриваемой роза-диаграммы. Очередное решение подбиралось для следующего луча и так до тех пор, пока не будет объяснено происхождение всех систем природных разломов. Таким образом для каждой сети было реконструировано от двух до четырех решений, которые в формате рис. 7 представлены на белом фоне.

Сопоставление решений для зоны Тенькинского разлома (см. рис. 7, левая половина) свидетельствует о том, что формирование ее внутренней структуры однозначно происходило в обстановках правого и левого сдвига, так как они реконструируются по всем схемам. Кроме того, наиболее крупномасштабная схема, отражающая разломно-блоковый стиль деструкции вулканогенно-осадочной толщи (см. рис. 7, строка 5), позволила восстановить еще один тип напряженного

состояния: сжатие в направлении СВ-ЮЗ. По сети разрывных структур, выявленных при спецкартировании, получены три перечисленные выше решения и дополнительно – обстановка растяжения в направлении СЗ-ЮВ, причем существование их всех подтверждено определениями кинематики перемещений по отдельным системам разрывов независимым способом (см. рис. 8).

Сопоставление решений, полученных для зоны Инякано-Колымского разлома (см. рис. 7, правая половина) посредством парагенетического анализа различных схем, свидетельствует о том, что формирование ее внутренней структуры происходило в двух динамических обстановках, поскольку обе они реконструированы для трех из четырех проанализированных схем. Первая обстановка – правый сдвиг – не восстановлена по схеме м-ба 1:10000 (строка 4), а вторая – сжатие с субширотном направлении – для схемы м-ба 1:50000 (строка 2), причем обе схемы отражают первый стиль деструкции. Что же касается схем с разломно-блоковой структурой участка исследования (строки 3 и 5), то по ним восстановлены обе обстановки, так же как и для рассмотренной ранее схемы спецкартирования (строка 1).

Таким образом, решения о динамических обстановках формирования разрывной структуры узла пересечения Тенькинской и Инякано-Колымской разломных зон, полученные на основе схемы спецкартирования,

полностью подтверждаются результатами парагенетического анализа, проведенного по сетям разрывов, откартированных предшественниками в аналогичном и более крупном масштабе. При этом наибольшее подобие имеет место для схем, отражающих разломно-блоковый стиль деструкции вулканогенно-осадочной толщи. Это позволяет считать приемлемым объединение пяти рассмотренных обстановок в три типа регионального напряженного состояния, которое было проведено при интерпретации данных спецкартирования с учетом оценок кинематики разломных систем, реализующейся в ходе формирования разломного узла (см. рис. 8) и в обобщенном виде показанной на рис. 10.

В связи с тем, что установленные динамические обстановки обуславливают характер смещений по двум крупным разломным зонам, из которых Тенькинская является юго-восточным продолжением протягивающегося практически вдоль всего Яно-Колымского орогенного пояса Адыча-Тарынского разлома, причиной их образования являются смещения крупных блоков земной коры. Согласно известным для рассматриваемого региона геодинамическим реконструкциям, сжатие породных комплексов в направлении СВ-ЮЗ (рис. 10, а) целесообразно связывать с фронтальной коллизией Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертепсейна [Parfenov, Kuzmin, 2001; Konstantinovskiy, 2007; Bortnikov et al., 2010; Goldfarb et al., 2014;

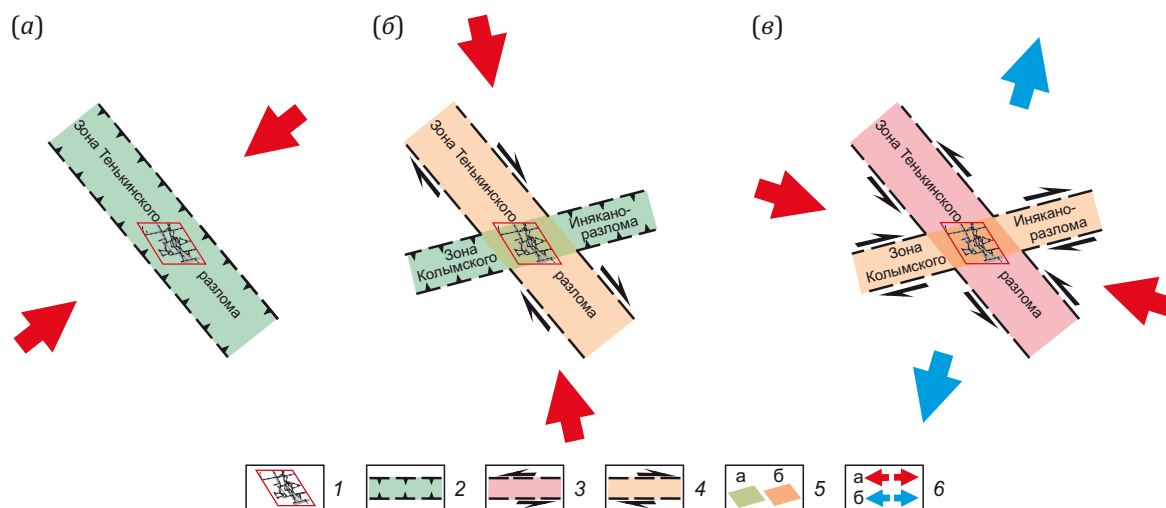


Рис. 10. Принципиальные схемы кинематики Тенькинской и Инякано-Колымской разломных зон 1-го порядка, в результате взаимодействия которых в трех динамических обстановках (а–в) сформировалась внутренняя структура узлового сочленения, контролирующего Наталкинское рудное поле.

1 – условное положение участка спецкартирования с сетью выявленных разломных зон 2-го и более высоких порядков; 2–4 – взбросовая (2), левосдвиговая (3) и правосдвиговая (4) кинематика разломной зоны; 5 – область узлового сочленения правосдвиговой и сбросовой (а), а также левосдвиговой и правосдвиговой (б) разломных зон; 6 – направления действия субгоризонтальных осей сжатия (а) и растяжения (б).

Fig. 10. Principal kinematic schemes of the 1st order Tenka and Inyakan-Kolyma fault zones, the interaction of which means that three dynamic settings (a–v) gave rise to the formation of the internal structure of the nodal junction controlling the Natalka ore field.

1 – conditional location of the special-purpose mapping area with a network of identified fault zones of the 2nd and higher orders; 2–4 – kinematics of reverse fault (2), left-lateral strike-slip (3) and right-lateral strike-slip (4) fault zone; 5 – area of nodal junction of the right-lateral strike-slip and normal (a) and the left-lateral strike-slip and right-lateral strike-slip (b) fault zones; 6 – sub-horizontal compression (a) and extension (b) axes directions.

Savchuk et al., 2023]. Сокращение земной коры достигается за счет формирования системы складок, а также продольных надвигов и взбросов, которые в Тенькинской разломной зоне выделялись некоторыми предшественниками, и в частности для НРП – в работах [Kalinin et al., 1992; Golub et al., 2008; Goldfarb et al., 2014; Kondratyev et al., 2018].

Этап субмеридионального сжатия для Яно-Колымского пояса (рис. 10, б) может быть обусловлен вхождением Охотского террейна с юга в область коллизии Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна [Fridovskii, 1999; Prokopiev et al., 2018; Bortnikov et al., 2010; Gamyranin et al., 2018; Aristov, 2019; Tretyakov, 2021; Savchuk et al., 2023]. Соответствующая данному напряженному состоянию правосдвиговая кинематика зоны Тенькинского разлома отмечалась для НРП в работах [Goncharov et al., 2002; Shakhtyrov, 2009], а для располагающегося юго-восточнее района золоторудного месторождения Павлик – в статьях [Savchuk et al., 2018; Aristov et al., 2021]. Взбросовые смещения по субширотным нарушениям, представляющим в НРП зону Инякано-Колымского скрытого разлома фундамента (Глухаринский и др.), были зафиксированы в ходе детальных геолого-структурных работ А.И. Калининым с соавторами [Kalinin et al., 1992; Kalinin, Kanishchev, 1992].

Третий из реконструированных типов регионального напряженного состояния – сдвиг с западно-северо-западной осью сжатия и северо-северо-восточной осью растяжения (рис. 10, в), по-видимому, связан с известным для Яно-Колымского пояса перемещением Колымо-Омолонского супертеррейна на запад-северо-запад при его «косой» коллизии с Сибирским кратоном [Prokopiev, 1998; Fridovskii, 1999; Parfenov, Kuzmin, 2001; Konstantinovskiy, 2007; Bortnikov et al., 2010; Aristov, 2019]. Левосдвиговая кинематика смещения блоков по зоне Тенькинского разлома, соответствующая этой динамической обстановке, отмечена многими исследователями НРП [Shakhtyrov, 2009; Chitalin, 2016; Aristov, 2019; Ovsov, 2020; Yushmanov, 2020]. Как следствие, движения по поперечным тектоническим нарушениям, в т.ч. и по Инякано-Колымскому дизъюнктиву, должны быть правосдвиговыми, если имеет место их совместное развитие.

Подобная структурная ситуация, причем для рудного этапа, предполагалась Е.М. Некрасовым [Nekrasov, 2019], который считал, что месторождения золота в зоне регионального Тенькинского сдвига локализируются в местах пересечения с широтными или западно-северо-западными разломными структурами, имеющими глубокое, возможно мантийное, заложение. Кроме того, по мнению В.Д. Володина [Goncharov et al., 2002], конкретно субширотный Глухаринский разлом являлся каналом, подводящим из глубины золотоносные растворы.

В отношении динамических обстановок, контролирующих оруденение на месторождении Наталка, важным в контексте данного исследования являются пред-

ставления предшественников о существенном вкладе режима растяжения в развитие на рудном этапе разломов северо-западного простирания [Golub et al., 2008; Konstantinov, 2010; Kondratyev et al., 2018]. Аналогичный тип напряженного состояния отмечен для формирования главной минерализованной зоны А.И. Калининым с соавторами [Kalinin et al., 1992], хотя эти исследователи предполагали его появление только на локальном уровне – в виде сбросовых смещений по прожилкам на фоне доминирования региональной обстановки горизонтального сжатия. В целом это подтверждает достоверность существования реконструированной по данным спецкартирования вторичной обстановки растяжения для разрывов тенькинского направления (Главного и др.), попавших в Инякано-Колымскую зону правосторонних смещений, реализующихся в рассматриваемой региональной обстановке сдвига (см. рис. 8; рис. 10, в).

Таким образом, три типа напряженного состояния регионального уровня, восстановленные в итоге спецкартирования для центральной части узла пересечения Тенькинской и Инякано-Колымской разломных зон, согласуются с основными геодинамическими обстановками развития юго-восточной части Яно-Колымского орогенного пояса. При этом характерная для этих условий кинематика разломных зон 1-го и 2-го порядка в совокупности с оценкой их роли в структурном контроле оруденения находит подтверждение в результатах процитированных выше работ по НРП.

Более того, полученные выводы об обстановках регионального уровня, кинематике разломных зон 1-го порядка и особенностях рудоконтроля структурами 2-го и более высоких порядков полностью соответствуют тем, которые были получены авторами ранее при первичном анализе материалов спецкартирования [Seminsky et al., 2025, 2026]. В отличие от реконструкций, представленных в данной статье и основанных на составленной при спецкартировании схеме разломных зон, они базировались на группировании локальных решений о стресс-тензорах, полученных в отдельных пунктах наблюдений, а также структурно-парагенетическом анализе сетей разломов, разнотипных даек и рудных жил, представленных в публикациях предшественников и, прежде всего, на карте м-ба 1:10000 [Geological-Structural Map..., 1991].

Всесторонний анализ возрастных соотношений полученных реконструкций, проведенный в предыдущих статьях [Seminsky et al., 2025, 2026], позволил предложить предварительную модель формирования структуры рудного поля. В соответствии с ней напряженное состояние сдвига, являющееся более молодым по отношению к обеим обстановкам сжатия, инициировало сначала левый сдвиг по Тенькинскому разлому, а затем правый сдвиг по Инякано-Колымской зоне с внедрением в узловое сочленение рудоносных флюидов. Результаты анализа, представленные в данной статье, подтвердили существование этих главных этапов формирования структуры НРП, что закономерно,

так как, несмотря на разные направления обработки и интерпретации материалов спецкартирования, основой для анализа был один и тот же фактический материал – массовые замеры трещиноватости на участке исследования. Это дает возможность, не останавливаясь на подробной характеристике предложенной модели структурообразования в пределах НРП, проанализировать эффективность спецкартирования в целом. Материалы данной статьи позволяют сделать это в полном объеме, так как в ходе реализации метода для участка исследований была составлена схема разломных зон и именно на ее основе восстановлена иерархия напряженного состояния земной коры.

5.3. Возможности и перспективы использования спецкартирования для исследования напряженно-деформированного состояния земной коры

Метод спецкартирования, базирующийся на принципах тектонофизики и структурной геологии, направлен на оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) участка земной коры посредством выявления разломной структуры и реконструкции напряженного состояния на разных этапах тектогенеза. Основным фактическим материалом для его реализации служит трещиноватость без признаков смещений, которая повсеместно распространена в коренных выходах горных пород. Применение метода для центральной части НРП позволяет кратко охарактеризовать его возможности, отметить основные преимущества и особенности, а также оценить перспективы использования на современном уровне развития тектонофизики.

Участок в центральной части НРП является хорошим примером для оценки возможностей спецкартирования, поскольку он, несмотря на наличие горных выработок, характеризуется, как и большинство природных территорий, сложными условиями для сбора фактического материала. Созданная сеть пунктов наблюдений отличается неравномерностью с редкими точками измерений на слабо обнаженной периферии и сравнительно высокой плотностью массовых замеров трещин в центральной части (см. рис. 2, а), хотя даже в карьере не удалось реализовать способ прослеживания разломных сместителей вследствие специфики режима проведения эксплуатационных работ на горнодобывающем предприятии.

Схема разломных структур, составленная при спецкартировании в подобных условиях, приблизительно соответствует м-бу 1:100000 (см. рис. 6, д). Вместе с тем она отражает основные закономерности деструкции вулканогенно-осадочной толщи, которые ранее были выявлены с существенно большей детальностью на основе использования большого объема производственных геолого-структурных материалов (см. рис. 2, г, д). Это характерный стиль нарушенности породного массива, обуславливающийся его делением на блоки разломами нескольких направлений, главными из

которых являются северо-западное, субширотное и северо-северо-западное (см. рис. 2, е). В отличие от ранее составленных схем первые два из них доминируют по распространенности и представлены на площади картирования наиболее протяженными разрывами (см. рис. 2, роза-диаграммы). Это послужило главной причиной для заключения о контроле НРП узлом пересечения известной северо-западной зоны Тенькинского разлома скрытым Иньякано-Колымским разломом фундамента, который имеет субширотную ориентировку. При спецкартировании выделяются основные рудоконтролирующие представители этих зон – Главный и Глухаринский разломы, а также сегменты тектонических нарушений, показанных на крупномасштабных картах (северо-западные – Наталкинский, Машковский, Ветвь; субширотные – Геологический в трех фрагментах). Таким образом, схема, составленная при спецкартировании в сравнительно мелком масштабе по неравномерной сети пунктов наблюдений, не только отражает основные черты разломной структуры участка исследований, но также позволяет определить структурную позицию Наталкинского золоторудного поля и выделить те разрывы, которые играют ключевую роль в его строении и, как следствие, в локализации оруденения.

Иерархия напряженного состояния земной коры в районе НРП была восстановлена посредством парагенетического анализа разрывных систем, используемого в рамках спецкартирования на локальном уровне – при обработке замеров трещиноватости (см. рис. 5) и на региональном уровне – по сети разрывных структур, выявленной для участка исследования (см. рис. 7, строка 1). Анализ может проводиться по любой схеме разрывов, но при спецкартировании его достоверность повышается за счет учета кинематики закартированных разрывных структур (см. рис. 8). Для НРП эти оценки по основным системам разломов соответствуют определениям, сделанным в ходе некоторых предшествовавших исследований, а реконструкции трех типов напряженного состояния регионального уровня (рис. 10) – известным геодинамическим обстановкам, обусловленным контактированием крупных блоков земной коры. Полученное на разных уровнях соответствие определяется тем, что реконструкции в рамках спецкартирования базируются на большом объеме первичного фактического материала и формализованности операций его обработки в рамках порангового парагенетического анализа.

Модель формирования разломной структуры изучаемого участка земной коры, как итог спецкартирования, отражает последовательность формирования его разломной структуры на разных временных этапах тектонического развития региона и в графическом виде отображается серией схем разрывных структур, активных в реконструированных динамических обстановках регионального уровня. Для НРП модель представлена в статье [Seminsky et al., 2026] и базировалась на поранговом анализе реконструкций стресс-тензоров

в отдельных пунктах наблюдений с оценкой кинематики активных на этапе рудообразования разломов, сеть которых отображена на карте м-ба 1:10000 [Geological-Structural Map..., 1991]. Эти построения актуальны, поскольку изложенные в настоящей статье результаты реконструкций региональных обстановок аналогичны, а сеть закартированных разрывных структур соответствует более мелкому масштабу.

Таким образом, из построений по Наталкинскому рудному полю следует, что спецкартирование обладает широкими возможностями для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, так как позволяет на основе сравнительно небольшого объема неравномерно распределенных на местности структурных наблюдений построить схему разрывных нарушений, реконструировать иерархию динамических обстановок их формирования и предложить модель последовательности структурообразования с выделением активных разломов на каждом из этапов тектогенеза. Как и любой метод, данный вид структурного картирования в силу его специфики обладает рядом преимуществ и определенными особенностями, которые рассматриваются ниже.

Базовым преимуществом метода является возможность его реализации практически в любом регионе, так как фактическим материалом для применения парагенетического анализа служат разрывы без признаков смещения. Это может быть трещиноватость горных пород, как для НРП, а также линеаменты рельефа или зоны, выделенные геохимическими и геофизическими методами, для которых обоснована генетическая связь с разломами. В последнем случае особую актуальность применение спецкартирования имеет для сетей разрывов, которые выделяются из кубов сейсмической информации на месторождениях углеводородов, располагающихся в слабоактивных платформенных регионах [Seminsky et al., 2023]. Детальная 3D сейсмика, широко используемая в настоящее время для выявления особенностей строения осадочного разреза, позволяет с помощью применения атрибутов, базирующихся на методах искусственного интеллекта, получить для изучаемого объекта сети разрывных структур, которые по большей части не смещают маркирующие горизонты. Однако применение к их анализу приемов спецкартирования позволяет выделить зоны повышенной нарушенности и реконструировать для каждого элементарного объема стресс-тензор, т.е. получить информацию о НДС породного массива, необходимую для выявления структурных ловушек, трассирования путей миграции углеводородов, прогноза условий бурения скважин, оконтуривания участков возможного обводнения разреза или рапообразования.

Дополнительным преимуществом спецкартирования является формализованность его основных операций, начиная от массового измерения разрывов, реконструкции локальных стресс-тензоров, восстановления региональных типов напряженного состояния и заканчивая трассированием осей разломных зон, а

также построением схем разрывных структур, активных на каждом из этапов тектогенеза. Эта особенность метода, с одной стороны, сводит к минимуму субъективизм в построениях, а с другой – позволяет получать достоверные результаты специалистам, обладающим стандартным набором базовых знаний по структурной геологии и геологическому картированию.

Еще одним достоинством спецкартирования является то, что его основные операции производятся на количественном уровне, причем достоверность результатов повышается с увеличением статистики измерений, числа пунктов наблюдений, количества однотипных решений о положении разломной зоны, типе стресс-тензора и пр. Кроме того, параметризация разрывных сетей позволяет оценивать условия структурообразования на количественном уровне. Так, плотность разрывов свидетельствует об интенсивности напряженного состояния или длительности его существования для изучаемого участка земной коры. Сложность (системность) трещинной сети косвенно отражает количество этапов деформации земной коры, а величина угла скалывания – степень ее хрупкости – пластичности. Эти и другие параметры напряженно-деформированного состояния могут быть представлены в виде распределений на местности и прокоррелированы с количественными характеристиками геохимических, геофизических и других полей в целях углубленного решения задач конкретного исследования.

Наряду с перечисленными достоинствами, спецкартирование имеет определенные особенности, которые необходимо учитывать при рассмотрении вопроса о его проведении в запланированном для исследований регионе. Прежде всего необходимо учитывать, что получаемые в ходе реализации метода схемы в исходном виде отражают зонно-блоковую структуру земной коры, поскольку менее нарушенные блоки ограничиваются разломными зонами, представленными однотипными структурными парагенезисами. Они могут находиться на разных стадиях развития (см. рис. 3, а), определение которых представляется возможным, когда в каком-либо из пунктов массового замера задокументирована зона тектонитов, крупные плоскости с признаками смещения соответствующей ориентировки и пр. В этом случае положение разломного сместителя трассируется с учетом наличия косвенных признаков (уступы в рельефе, V-образные фрагменты долин, спрямленные русла рек и др.) через всю пространственно связанную с этой точкой зону проявления соответствующего парагенезиса. Таким образом, построение схемы зонно-блоковой структуры способствует выявлению разломных сместителей, а в случае их отсутствия отражает делимость земной коры на блоки зонами сгущения разрывов 2-го порядка и повышенной трещиноватости.

Отличием рассматриваемого метода от традиционной структурной съемки, препятствующим в определенной мере его широкому внедрению в геологическую практику, является время- и трудоемкость работ,

связанные с необходимостью получения и анализа большого объема количественной информации по разрывам, увеличение которой прямо пропорционально повышению степени достоверности итоговых результатов. Вместе с тем на современном уровне развития компьютерных технологий практически каждый из трудоемких этапов спецкартирования может быть автоматизирован в связи с формализованностью базовых операций метода.

Так, при проведении массового замера в пункте наблюдения вместо горного компаса и записей измерений в полевой дневник может использоваться смартфон с созданием массива данных в электронном виде. Интенсивное развитие беспилотных технологий в ближайшее время позволит получать кондиционные статистические замеры трещин в недоступных для непосредственных измерений коренных выходах, что обеспечит возможность создания более плотной и равномерной сети точек наблюдений на площади исследования. Для построения и первичного анализа диаграмм трещиноватости существуют различные программы, например «Structure», созданная параллельно с разработкой методики спецкартирования. Не автоматизированы в настоящее время операции реконструкции локальных стресс-тензоров и перехода от них к восстановлению напряженного состояния регионального уровня, однако формализованность осуществляемых в их рамках базовых построений и широкое развитие методов искусственного интеллекта не позволяют сомневаться в возможности автоматизирования процесса и в этом случае. Наконец, геоинформационные системы, предназначенные для анализа и отображения информации в пространственных координатах («ArcGIS», «Petrel», «MapInfo» и мн. др.), могут широко применяться на этапе составления и анализа схем разломных зон, а также карт распределения количественных параметров разрывной сети.

Возможности глубокой автоматизации спецкартирования, с одной стороны, и положительный опыт применения метода в рудной геологии (настоящее исследование), при алмазопромысловых работах [Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016], в нефтегазовой геологии [Seminsky et al., 2023], гидрогеологии [Seminsky, Tugarina, 2011] и инженерной геологии [Seminsky et al., 2005] – с другой, свидетельствуют об определенных перспективах его использования. Они связаны с масштабированием методического подхода, который может быть применен в пределах сравнительно небольших площадей для решения разноплановых прикладных задач, а также для обширных природных регионов с целью установления закономерностей НДС на разных этапах тектогенеза.

В обоих случаях тактика проведения работ должна включать создание управляемой и пространственно ориентированной базы данных массовых замеров трещин, полученных традиционным способом и при помощи дистанционных технологий, а также ключевых параметров сети (плотность, сложность и др.). Эта объ-

ективная информация представляет, по сути, структурный портрет коренного выхода, который, как тип и состав пород (вещественная характеристика), может быть получен практически в любом обнажении. Подобная база данных является основой для дальнейших реконструкций НДС (иерархии стресс-тензоров, картирования разломных зон и др.) любым заинтересованным специалистом при условии ее нахождения в общем доступе. При этом возможность использования для одних и тех же участков породного массива структурной информации вместе с данными по веществу выводит стратегию использования спецкартирования для решения комплекса геологических задач на качественно новый уровень.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории Наталкинского золоторудного поля в Магаданской области проведены работы по специальному структурному картированию, что позволило для его центральной части составить схему разломных зон на основе парагенетического анализа трещинных сетей, задокументированных в 52 пунктах геологоструктурных наблюдений. Схема отражает структуру двух региональных разломных зон – северо-западной Тенькинской и субширотной Инякано-Колымской, узел пересечения которых контролирует Наталкинское рудное поле.

Сопоставление кинематики выявленных зон и решений о стресс-тензорах в отдельных пунктах наблюдений стало основой для реконструкции трех типов напряженного состояния регионального уровня, которые соответствуют главным этапам формирования структуры разломного узла. В обстановке сжатия, направленного с северо-востока на юго-запад, по продольным разрывам Тенькинской зоны происходили взбросовые движения. В обстановке субмеридионального сжатия подобные перемещения имели место в Инякано-Колымской зоне, тогда как разломы тенькинского направления являлись правыми сдвигами.

Наибольший след в структуре узлового сочленения оставила обстановка сдвига с западно-северо-западной ориентировкой оси сжатия и северо-северо-восточной ориентацией оси растяжения. В условиях напряженного состояния данного типа региональные разломные зоны активизировались последовательно. Вначале произошел левый сдвиг в Тенькинской зоне, а затем правый сдвиг – в Инякано-Колымской, причем северо-западные разрывы, попавшие в зону влияния этого дизъюнктива, развивались в условиях растяжения, что способствовало миграции вверх минерализованных флюидов и формированию рудных тел Наталкинского месторождения.

Реконструированные в итоге спецкартирования сети парагенетически связанных разрывов, иерархия напряженного состояния и этапность структурообразования

– согласуются с геодинамическими обстановками, обусловленными взаимодействием в мезозое крупных

литосферных блоков (Сибирский кратон, Колымо-Омолонский супертеррейн, Охотский террейн);

- отражают выявленный предшественниками для Наталкинского рудного поля разломно-блоковый стиль деструкции земной коры;

- подтверждают установленные ранее при крупномасштабном картировании закономерности разломного строения вулканогенно-осадочной толщи;

- позволяют объединить в рамках общей модели особенности формирования структуры Наталкинского рудного поля на основе полученных данных о напряженно-деформированном состоянии породного массива.

Это свидетельствует об эффективном применении спецкартирования в центральной части Наталкинского рудного поля, несмотря на недостаточную для создания равномерной сети пунктов наблюдений обнаженность горных пород.

Формализованность основных операций метода, с одной стороны, и интенсивное развитие технологий по получению массовых замеров трещин (применение смартфонов, БПЛА), обработке больших объемов статистической информации (программа «Structure», внедрение методов ИИ), отображению получаемых результатов в геоинформационных системах («ArcGIS», «Petrel», «MapInfo» и др.) – с другой, открывают существенные перспективы применения спецкартирования для решения широкого спектра геологических задач, предполагающих оценку напряженно-деформированного состояния различных по масштабам участков земной коры. При этом стратегия использования метода состоит в соединении спецкартирования с современной геологической съемкой, что позволит создавать для изучаемых регионов управляемые базы данных с равноценной информацией по структуре и веществу и таким образом получать объективный материал в качестве основы для дальнейшего целенаправленного анализа.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны заведующему лабораторией фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, к.г.-м.н. А.В. Маринину и анонимному рецензенту за советы и рекомендации, высказанные в процессе подготовки материалов исследования к публикации.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Akinin V.V., Alshevsky A.V., Polzunenkov G.O., Sergeev S.A., Sidorov V.A., 2023. The Age of the Natalka Orogenic Gold Deposit (U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os Constrain). *Russian Journal of Pacific Geology* 17 (6), 570–585. <https://doi.org/10.1134/S1819714023060027>.

Angelier J., 1984. Tectonic Analysis of Fault Slip Data Sets. *Journal of Geophysical Research* 89 (B7), 5835–5848. <http://doi.org/10.1029/JB089iB07p05835>.

Aristov V.V., 2019. Spatial Regularities of Localization of Gold Ore Occurrences in the Yana-Kolyma Province. *Russian Geology and Geophysics* 60 (8), 876–889. <https://doi.org/10.15372/RGG2019060>.

Aristov V.V., Grigorieva A.V., Savchuk Y.S., Sidorova N.V., Sidorov V.A., 2021. Forms of Gold and Some Typomorphic Characteristics of Native Gold of the Pavlik Orogenic Deposit (Magadan Oblast). *Geology of Ore Deposits* 63 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1134/S1075701521010025>.

Bortnikov N.S., Gamynin G.N., Vikent'eva O.V., Prokof'ev V.Yu., Prokop'ev A.V., 2010. The Sarylakh and Sentachan Gold-Antimony Deposits, Sakha-Yakutia: A Case of Combined Mesothermal Gold-Quartz and Epithermal Stibnite Ores. *Geology of Ore Deposits* 52 (5), 339–372. <https://doi.org/10.1134/S1075701510050028>.

Bulgakov V.S., Deshevykh A.P., Portyanko A.A., 1976. Gold Prospectivity Map at a Scale of 1:25000 for the Expedition's Territory. Omchak Group of Sheets. Explanatory Note. Ust-Omchug (in Russian) [Булгаков В.С., Дешевых А.П., Портянко А.А. Карта золотоносности масштаба 1:25000 на территорию деятельности экспедиции. Омчакская группа листов: Объяснительная записка. Усть-Омчуг, 1976].

Burzunova Yu.P., 2011. Angles Between Conjugated Systems of near Fault Fractures in Idealized and Natural Parageneses Formed in Various Dynamic Settings. *Lithosphere* 2, 94–110 (in Russian) [Бурзунова Ю.П. Углы между сопряженными системами приразломных трещин в идеализированных и природных парагенезисах, формирующихся в различных динамических обстановках // Литосфера. 2011. № 2. С. 94–110].

Chitalin A.F., 2016. Shear Tectonics and Gold Content of the Kolyma Region Gold and Technologies 4 (34), 122–126 (in Russian) [Читалин А.Ф. Сдвиговая тектоника и золотоносность Колымского региона // Золото и технологии. 2016. № 4 (34). С. 122–126].

Fridovskii V.Yu., 1999. Structures of Gold Deposits in the Verkhoyansk-Kolyma Orogenic Area. Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Yakutsk, 33 p. (in Russian) [Фридовский В.Ю. Структуры месторождений золота Верхояно-Колымской орогенной области: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Якутск, 1999. 33 с.].

Gamyanin G.N., Fridovsky V.Yu., Vikent'eva O.V., 2018. Noble-Metal Mineralization of the Adycha-Taryn Metallogenic Zone: Geochemistry of Stable Isotopes, Fluid Regime, and Ore Formation Conditions. *Russian Geology and*

Geophysics 59 (10), 1271–1287. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.006>.

Geological-Structural Map of the Natalka Ore Field, 1991. Scale of 1:10000. TsNIGRI, Moscow (in Russian) [Геологическая структурная карта Наталкинского рудного поля масштаба 1:10000. М.: ЦНИГРИ, 1991].

Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F., 2014. Phanerozoic Continental Growth and Gold Metallogeny of Asia. *Gondwana Research* 25 (1), 48–102. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>.

Golub V.N., Petrov A.N., Goryachev N.A., 2008. Geology and Structure of Ore Zones in the Southeast Flank of Natalka Gold Lode Deposit. *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of FEB RAS* 4, 16–20 (in Russian) [Голуб В.Н., Петров А.Н., Горячев Н.А. Геолого-структурные условия локализации рудных зон юго-восточного фланга Наталкинского золоторудного месторождения // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2008. № 4. С. 16–20].

Golubev S.Yu., 2008. Formative Environment of the Natalkinskoe Gold Deposit. *Ores and Metals* 6, 72–76 (in Russian) [Голубев С.Ю. Условия локализации рудных тел Наталкинского месторождения золота // Руды и металлы. 2008. № 6. С. 72–76].

Goncharov V.I., Voroshin S.V., Sidorov V.A., 2002. Natalka Gold Lode Deposit. NEISRI FEB RAS, Magadan, 250 p. (in Russian) [Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинский золоторудный месторождение. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 250 с.].

Goryachev N.A., Sidorov V.A., Litvinenko I.S., Mikhaliytina T.I., 2000. Mineral Composition and Petrochemical Features of the Ore-Bearing Rocks in Deep Horizons of the Natalka Deposit. *Kolyma* 2, 38–49 (in Russian) [Горячев Н.А., Сидоров В.А., Литвиненко И.С., Михалицына Т.И. Минеральный состав и петрохимические особенности рудных зон глубоких горизонтов Наталкинского месторождения // Колыма. 2000. № 2. С. 38–49].

Grigorov S.A., 2006. Natalka Gold Deposit: Origin and Dynamics of Formation as Portrayed by the Systems Analysis of Geochemical Field. *Ores and Metals* 3, 44–48 (in Russian) [Григоров С.А. Генезис и динамика формирования Наталкинского золоторудного месторождения по данным системного анализа геохимического поля // Руды и металлы. 2006. № 3. С. 44–48].

Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F., 1998. Orogenic Gold Deposits: A Proposed Classification in the Context of Their Crustal Distribution and Relationship to Other Gold Deposit Types. *Ore Geology Reviews* 13 (1–5), 7–27. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7).

Gushchenko O.I., 1975. Kinematic Reconstruction of the Principal Stress Directions (from the Geological and Seismological Data). *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 225 (3), 557–560 (in Russian) [Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Доклады АН СССР. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560].

Gzovsky M.V., 1963. General Problems of Tectonophysics and Tectonics of the Bajansai Anticlinorium. Parts 3, 4. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, 544 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. М.: Изд-во АН СССР, 1963. Ч. 3, 4. 544с.].

Kalinin A.I., Kanishchev V.K., 1992. The Natalka Ore Field Structure. Explanatory Note to the 1:10000 Geological-Structural Map. Book 1. Northeast Branch of TsNIGRI, Magadan, 192 p. (in Russian) [Калинин А.И., Канищев В.К. Структура Наталкинского рудного поля. Пояснительная записка к геолого-структурной карте масштаба 1:10000. Магадан: СВ филиал ЦНИГРИ, 1992. Кн. 1. 192 с.].

Kalinin A.I., Kanishchev V.K., Orlov A.G., Gashtold V.V., 1992. The Natalka Ore Field Structure. *Kolyma* 10–11, 10–14 (in Russian) [Калинин А.И., Канищев В.К., Орлов А.Г., Гаштольд В.В. Структура Наталкинского рудного поля // Колыма. 1992. № 10–11. С. 10–14].

Karelin Yu.P., Beltsov A.I., Fomin V.K., 1985. A Report on Multi-Sheet Geological Mapping and Additional 1:50000 Scale Surveying of the Omchak Ore Cluster (Sheets P-55-80, B, Г; -81-81-B; -92-A,Б,Г; -93-A,Б) for 1981–1985. *Ust-Omchug*, 248 p. (in Russian) [Карелин Ю.П., Бельцов А.И., Фомин В.К. Отчет о групповой геологической съемке и доизучении масштаба 1:50000 Омчакского рудного узла (листы P-55-80, Б, Г; -81-81-B; -92-A,Б,Г; -93-A,Б) за 1981–1985 гг. Усть-Омчуг, 1985. 248 с.].

Khrenov P.M., Demin A.N., Taskin A.P., Alexandrov V.K., Mordovskaya T.V., 1977. Blind Transverse Faults of the Baikal Rift System. In: N.A. Logachev, N.A. Florensov (Eds), *A Role of Rifting in the Geological History of the Earth*. Nauka, Novosibirsk, p. 99–104 (in Russian) [Хренов П.М., Демин А.Н., Таскин А.П., Александров В.К., Мордовская Т.В. Скрытые поперечные разломы Байкальской рифтовой системы // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли / Ред. Н.А. Логачев, Н.А. Флоренсов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 99–104].

Kondratyev M.N., Polzunenkov G.O., Anikin V.V., 2018. Stages of Deformations at the Natalka Gold Deposit. In: *Scientific Youth to the Northeast Russia: Proceedings of the VII Interregional Conference of Young Scientists* (May 24–25, 2018). Iss. 7. Tipografia LLC, Magadan, p. 20–22 (in Russian) [Кондратьев М.Н., Ползуненков Г.О., Акинин В.В. Этапы деформаций на золоторудном месторождении Наталка // Научная молодежь – Северо-Востоку России: Материалы VII Межрегиональной конференции молодых ученых (24–25 мая 2018 г.). Магадан: ООО «Типография», 2018. Вып. 7. С. 20–22].

Konstantinov M.M. (Ed.), 2010. *Gold Deposits of Russia*. Akvarel, Moscow, 365 p. (in Russian) [Золоторудные месторождения России / Ред. М.М. Константинов. М.: Акварель, 2010. 365 с.].

Konstantinovskiy A.A., 2007. Structure and Geodynamics of the Verkhoyansk Fold-Thrust Belt. *Geotectonics* 41 (5), 337–354. <https://doi.org/10.1134/S0016852107050019>.

Kornilov M.F., Mishin N.I., Panfilov A.L., 2007. Structural-Geological Models of Deposits as a Basis for Estimating Mineral Resources and Reserves. *Subsoil Use in the 21st*

Century 3, 60–62 (in Russian) [Корнилов М.Ф., Мишин Н.И., Панфилов А.Л. Структурно-геологические модели месторождений как основа оценки ресурсов и запасов полезных ископаемых // Недропользование XXI век. 2007. № 3. С. 60–62].

Makarov V.I., Shchukin Yu.K., 1979. Blind Fault Activity Assessment. *Geotectonics* 1, 96–109 (in Russian) [Макаров В.И., Щукин Ю.К. Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96–109].

Mezhov S.V., 2000. Geological Structure of the Natalka Gold Deposit. *Kolymskie Vesti* 9, 8–17 (in Russian) [Межов С.В. Геологическое строение Наталкинского золоторудного месторождения // Колымские вести. 2000. № 9. С. 8–17].

Nekrasov E.M., 2019. Localisation of Gold Ores in Faults of Different Types. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration* 6, 33–43 (in Russian) [Некрасов Е.М. Локализация руд золота в разломах разных типов // Известия вузов. Геология и разведка. 2019. № 6. С. 33–43].

Nekrasov E.M., Dorozhkina L.A., Dudkin N.V., 2015. *Geology and Structural Features of the Largest Endogenous Gold Ore Deposits*. Astreya-Tsentr, Moscow, 192 p. (in Russian) [Некрасов Е.М., Дорожкина Л.А., Дудкин Н.В. Особенности геологии и структуры крупнейших золоторудных месторождений эндогенного класса. М.: Астрейя-центр, 2015. 192 с.]

Nekrasov E.M., Dorozhkina L.A., Dudkin N.V., Kosovets T.N., 2019. *Systematics, Structure and Reserves of Gold Ore Deposits*. Astreya-Tsentr, Moscow, 241 p. (in Russian) [Некрасов Е.М., Дорожкина Л.А., Дудкин Н.В., Косовец Т.Н. Систематика, структура и запасы золоторудных месторождений. М.: Астрейя-центр, 2019. 241 с.]

Nevsky V.A., 1979. *Fracture Tectonics of Ore Fields and Deposits*. Nedra, Moscow, 224 p. (in Russian) [Невский В.А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1979. 224 с.]

Nikolaev P.N., 1992. *Methodology of Tectonodynamic Analysis*. Nedra, Moscow, 295 p. (in Russian) [Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.]

Ovsov R.N., 2020. Structural Control of Mineralization of the Natalka Deposit. In: *Science of the Northeast Russia: Fundamental and Applied Studies in the North Pacific and Arctic. Proceedings of the Jubilee Conference Dedicated to the 60th Anniversary of the NEISRI FEB RAS* (March 5–6, 2020). NEISRI FEB RAS, Magadan, p. 121–122 (in Russian) [Овсов Р.Н. Структурный контроль оруденения Наталкинского месторождения // Наука Северо-Востока России: фундаментальные и прикладные исследования в Северной Пацифике и Арктике: Материалы докладов юбилейной конференции, посвященной 60-летию СВКНИИ им. Н.А. Шило ДВО РАН (5–6 марта 2020 г.). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2020. С. 121–122].

Parfenov L.M., Kuzmin M.I. (Eds), 2001. *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. MAIK Nauka/Interperiodica, Moscow, 571 p. (in Russian) [Тектоника, геодинамика и металлогения террито-

рии Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.]

Parfenov V.D., 1984. On Tectonophysical Analysis Method for Geological Structure. *Geotectonics* 1, 60–72 (in Russian) [Парфенов В.Д. К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. № 1. С. 60–72].

Pluteshko V.P., Yablokova S.V., Yanovskii V.M., 1988. Natalka Deposit. In: *Geology of Gold Deposits in the East of the USSR*. TsNIGRI, Moscow, p. 126–140 (in Russian) [Плутешко В.П., Яблокова С.В., Яновский В.М. Наталкинский месторождение // Геология золоторудных месторождений Востока СССР. М.: ЦНИГРИ, 1988. С. 126–140.]

Pristavko V.A., Sidorov V.A., Mikhailitsyna T.I., Burova A.S., Krasnaya E.N., 2000. Geological-Geochemical Model of the Natalka Gold Deposit. *Kolymskie Vesti* 9, 18–24 (in Russian) [Приставко В.А., Сидоров В.А., Михалицина Т.И., Бурова А.С., Красная Е.Н. Геолого-геохимическая модель золоторудного месторождения Наталка // Колымские вести. 2000. № 9. С. 18–24].

Prokopiev A.V., 1998. The Verkhoyansk-Chersky Collisional Orogenic Belt. *Russian Journal of Pacific Geology* 17 (5), 3–10 (in Russian) [Прокопьев А.В. Верхояно-Черский коллизионный ороген // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 5. С. 3–10].

Prokopiev A.V., Borisenko A.S., Gamyranin G.N., Fridovsky V.Yu., Kondrat'eva L.A., Anisimova G.S., Trunilina V.A., Vasyukova E.A. et al., 2018. Age Constraints and Tectonic Settings of Metallogenic and Magmatic Events in the Verkhoyansk-Kolyma Folded Area. *Russian Geology and Geophysics* 59 (10), 1237–1253. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.004>.

Radkevich E.A., Tomson I.N., Gorlov N.V., 1956. On Regional Excessive Fracture Belts and Belts and Zones. *Soviet Geology* 58, 170–185 (in Russian) [Радкевич Е.А., Томсон И.Н., Горлов Н.В. О региональных поясах и зонах повышенной трещиноватости // Советская геология. 1956. № 58. С. 170–185].

Ramsay J.G., Huber M.I., 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology*. Vol. 1: Strain Analysis. Academic Press, London, 307 p.

Ramsay J.G., Huber M.I., 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology*. Vol. 2: Folds and Fractures. Academic Press, London, 391 p.

Rastsvetaev L.M., 1987. Structural-Paragenetic Analysis of Disjunctive Tectonic Faults. In: A.V. Peive, A.V. Lukyanov (Eds), *Problems of Structural Geology and Physics of Tectonic Processes*. Moscow, p. 173–235 (in Russian) [Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов / Ред. А.В. Пейве, А.В. Лукьянов. М., 1987. С. 173–235].

Rats M.V., Chernyshev S.N., 1970. *Fracturing and Properties of Fractured Rock*. Nedra, Moscow, 164 p. (in Russian) [Рат М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.]

Rebetsky Yu.L., 2007. Tectonic Stresses and Strength of Natural Mountain Ranges. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.].

Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V., 2017. From Slickenside to Tectonic Stresses. Techniques and Algorithms. GEOS, Moscow, 234 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.].

Savchuk Yu.S., Volkov A.V., Aristov V.V., Murashov K.Yu., 2023. Ore-Bearing Faults of Transpressional-Collisional Kinematics in the Verkhoyansk-Kolyma Fold Belt (Structural Consequences of the Geodynamic Model). *Geology of Ore Deposits* 65 (2), 170–189 (in Russian) [Савчук Ю.С., Волков А.В., Аристов В.В., Мурашов К.Ю. Рудовмещающие нарушения транспрессионно-коллизийной тектоники Верхояно-Колымского складчатого пояса (структурные следствия геодинамической модели) // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 2. С. 179–198]. <https://doi.org/10.31857/S001677702302003X>.

Savchuk Yu.S., Volkov A.V., Aristov V.V., Sidorov V.A., Lyamin S.M., 2018. Structure and Composition of Gold Pavlik Deposit. *Ores and Metals* 2, 77–85 (in Russian) [Савчук Ю.С., Волков А.В., Аристов В.В., Сидоров В.А., Лямин С.М. Структура и состав золоторудных залежей месторождения Павлик // Руды и металлы. 2018. № 2. С. 77–85].

Seminsky K.Zh., 1994. Principles and Stages of Special Mapping of the Fault-Block Structure on the Basis of Fracturing Studies. *Russian Geology and Geophysics* 9, 112–130 (in Russian) [Семинский К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // Геология и геофизика. 1994. № 9. С. 112–130].

Seminsky K.Zh., 1997. Angle Relationships Between Conjugate Joint Systems near Strike-Slip, Normal, and Thrust Fault Planes. *Doklady Earth Sciences* 354 (4), 531–533.

Seminsky K.Zh., 2003. Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO, Novosibirsk, 244 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 244 с.].

Seminsky K.Zh., 2014. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 1: Basic Theoretical Concepts and Principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.

Seminsky K.Zh., 2015. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 2: Main Stages and Prospects. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (1), 1–43 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>.

Seminsky K.Zh., Bobrov A.A., 2018. Geoelectrical Images of Normal Fault Zones: Tectonophysical Interpretation of the Shallow-Depth Electrical Resistivity Tomography Data on the Buguldeika-Chernorud Graben in the Western Baikal Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1339–1361 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бобров А.А. Геоэлектрический имидж сбросовых зон: тектонофизическая интерпретация малоглубинной электротомографии на примере Бугульдейско-Чернорудского грабена в Западном Прибайкалье // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1339–1361]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0399>.

Seminsky K.Zh., Burzunova J.P., Seminsky A.K., Vursiy G.L., Ovsov R.N., Bortnikov N.S., 2025. The Natalkinskoe Gold Deposit: Formation Conditions Based on Paragenetic Analysis of Dike and Ore Vein Networks. *Doklady Earth Sciences* 525 (2), 27. <https://doi.org/10.1134/S1028334X25608661>.

Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P., Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.S., Seminsky A.K., Buddo I.V., Smirnov A.S., Gorlov I.V., 2023. Analysis of the Fault-Block Structure and Stress State of the Sedimentary Cover in Gas-Condensate Deposits: Basics of the Tectonophysical Approach. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (2), 0689 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П., Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Черемных А.С., Семинский А.К., Буддо И.В., Смирнов А.С., Горлов И.В. Анализ разломно-блоковой структуры и напряженного состояния осадочного чехла на газоконденсатных месторождениях: основы тектонофизического подхода // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 2. 0689]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0689>.

Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P., Seminsky A.K., Bortnikov N.S., Vursiy G.L., Ovsov R.N., Bornyakov S.A., 2026 (in press). A Tectonophysical Model of Formation of the Fault Structure of the Natalka Ore Field: Special-Purpose Mapping Results. *Geology of Ore Deposits* 1 (in Russian) [Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П., Семинский А.К., Бортников Н.С., Вурсий Г.Л., Овсов Р.Н., Борняков С.А. Тектонофизическая модель формирования разломной структуры Наталкинского рудного поля: результаты спецкартирования // Геология рудных месторождений. 2026. № 1 (в печати)].

Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A., 2005. Internal Structure of Continental Fault Zones. Applied Aspect. GEO Publishing House, Novosibirsk, 293 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2005. 293 с.].

Seminsky K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Pospееva E.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Tugarina M.A., Potapov V.V., Zaripov R.M., Cheremnykh A.S., 2013. Interblock Zones in the Crust of the Southern Regions of East Siberia: Tectonophysical Interpretation of Geological and Geophysical Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 203–278 (in Russian) [Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.С., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В.,

Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0099>.

Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016. Special Mapping of Crustal Fault Zones and Its Capabilities for the Study of Structural Control of Kimberlites in the Alakit-Markha Field of the Yakutian Diamondiferous Province. Publishing House of Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 204 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алаakit-Мархинском поле Якутской алмазонасной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.]. <http://crust.irk.ru/art/2016speccart.pdf>.

Seminsky K.Zh., Tugarina M.A., 2011. Results of Comprehensive Studies of the Underground Hydrosphere Within the Western Shoulder of the Baikal Rift (As Exemplified by the Bayandai – Krestovsky Cape Site). *Geodynamics & Tectonophysics* 2 (2), 126–144 (in Russian) [Семинский К.Ж., Тугарина М.А. Результаты комплексных исследований подземной гидросферы западного плеча Байкальского рифта (на примере участка п. Баяндай – м. Крестовский) // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 2. С. 126–144]. <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-2-0037>.

Shakhtyrov V.G., 2009. Structural Parageneses in the Tenka Deep-Seated Fault Zone (Yana-Kolyma Folded System). *Natural and Technical Sciences* 6 (44), 313–319 (in Russian) [Шахтыров В.Г. Структурные парагенезы в зоне Тенькинского глубинного разлома (Яно-Колымская складчатая система) // Естественные и технические науки. 2009. № 6 (44). С. 313–319].

Sharafutdinov V.M., Khasanov I.M., Mikhailitsyna T.I., 2008. Petrophysical Zoning of the Natalka Ore Field. *Rus-*

sian Journal of Pacific Geology 2 (5), 441–453. <https://doi.org/10.1134/S1819714008050072>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2002. Nero-Bakhapchinsky Series. Scale of 1:200000. Sheet P-55-XXII (Omchak). *Magadangeology*, Magadan (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Неро-Бахапчинская серия. Масштаб 1:200000. Лист P-55-XXII (Омчак). Магадан: Магадангеология, 2002].

Struzhkov S.F., Natalenko M.V., Chekvaidze V.B., Isakov I.Z., Golubev S.Yu., Danil'chenko V.A., Obushkov A.V., Zaitseva M.A., Kryazhev S.G., 2006. Natalka Gold Deposit: A Multi-Factor Model. *Ores and Metals* 3, 34–44 (in Russian) [Стружков С.Ф., Наталенко М.В., Чекваидзе В.Б., Исаков И.З., Голубев С.Ю., Данильченко В.А., Обушков А.В., Зайцева М.А., Кряжев С.Г. Многофакторная модель золоторудного месторождения Наталка // Руды и металлы. 2006. № 3. С. 34–44.]

Tretyakov F.F., 2021. Modern Aspects of the Tectonic Structure of the South Verkhoyansk Synclinorium. *Russian Journal of Pacific Geology* 15 (3), 268–277. <https://doi.org/10.1134/S1819714021030088>.

Yushmanov Yu.P., 2020. Gold-Bearing Stockwork of the Natalka Deposit in the Structure of a Rotational Shear Duplex of the Central Kolyma Tenkinsky Fault. *Regional Problems* 23 (1), 6–12 (in Russian) [Юшманов Ю.П. Золотоносный штокверк месторождения Наталка в ротационной структуре сдвигового дуплекса Тенькинского разлома Центральной Колымы // Региональные проблемы. 2020. Т. 23. № 1. С. 6–12]. <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2020-23-1-6-12>.

Zhirnov A.M., 1984. Localization Features of Gold Mineralization in the Circular Structure. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 3, 98–111 (in Russian) [Жирнов А.М. Локализация золотого оруденения в кольцевой структуре // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1984. № 3. С. 98–111].