

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТРУКТУРНО-ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗА РУДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ТУЮКАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА

© 2024 г. С. А. Устинов^{1,*}, А. М. Чепчугов^{1,2}, М. А. Томаровская³, В. А. Петров¹,
А. Д. Свечеревский¹, Е. В. Яровая¹

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

²ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского”,
Москва, Россия

³ООО “Восток ГеоСервис Партнер”, Чита, Россия

*E-mail: stevesa@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2024 г.

Для района Туяканского рудного узла, расположенного в России в Мамско-Чуйском районе Иркутской области и определенного в качестве перспективного на обнаружение новых урано-, золото- и железорудных объектов, на основе геоинформационных технологий и обработки данных дистанционного зондирования Земли применен оригинальный подход, включающий структурно-геоморфологические, пространственно-геометрические, пространственно-плотностные и тектонофизические методы для выявления специфических стадий развития каркаса разрывных нарушений, определяющих размещение рудной минерализации. Доказана возможность использования морфологических особенностей рельефа территории для достоверной реконструкции каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нарушений, с помощью специальной методики линеamentного анализа на основе цифровой модели рельефа, созданной с использованием данных SRTM. Показано, что решающее значение в локализации оруденения играют зоны динамического влияния северо-восточных и северо-западных разломов. На основе тектонофизического подхода реконструированы ориентировки главных осей сжатия и растяжения регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов формируемых разрывов на предполагаемый период рудообразования. Учет установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций при расчете тенденции к сдвигу позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур. В пределах зон динамического влияния установленных разломов реконструированы параметры локальных полей напряжений-деформаций, а также стадийность формирования данных структур. Полученная информация должна быть принята во внимание при составлении металлогенического очерка и прогноза полезных ископаемых в районе.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли, геоинформационные системы, линеamentный анализ, структурно-геоморфологический метод, тектонофизика, поле напряжений-деформаций, структуры рудных полей и месторождений, разломы, прогноз рудных месторождений, уран, Патомское нагорье, Тонодское поднятие, Туяканский рудный узел

DOI: 10.31857/S0205961424050037, EDN: RRUKNС

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития минерально-сырьевой базы страны возникает острая необходимость постановки и обоснования задач поисково-оценочных геологоразведочных работ с целью обнаружения новых месторождений, особенно, стратегических металлов. Важнейшим источником информации, учитывая значительную площадь поисков и труднодоступность слабоизученных тер-

риторий, часто выступают разномасштабные картографические материалы, а также данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), для сбора, обработки, анализа и интерпретации которых применяются геоинформационные системы (ГИС). Для прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых (ПИ), основанных на анализе результатов выявления особенностей тектонического строения территории, проведения геодинамических реконструкций, оценки напряженно-деформированного

состояния массивов пород, установления кинематики перемещений в зонах основных разломов и создания объемных визуальных моделей рудоносных геологических структур с помощью ГИС создаются прогнозные карты, позволяющие оценить структурные особенности рудных формаций и выбрать перспективные площади для постановки крупномасштабного геологического картографирования, проведения поисковых работ.

Отложение как рудной минерализации, так и нерудного минерального сырья, связано с миграцией в земной коре растворов, транспортирующих вещества и, при наличии определенных факторов, формирующих промышленно значимые их скопления. В основе прогноза подобных объектов лежит представление о продуктивной минеральной палеосистеме – участке земной коры со свойствами трещинной перколяционной структуры, которые позволяют рудоносным флюидам мигрировать и формировать те или иные скопления полезных ископаемых (Тарасевич, 2002; Шевырев, Хомич, 2013; Шевырев, 2015).

Задачей прогноза и поисков таких месторождений является установление закономерностей строения и распространения элементов палеосистемы, которые включают источники рудного вещества, инфраструктуру, определяющую пути его перемещения, и места отложения. Подобный подход по смыслу близок к концепции “минеральных систем” (Wyborn et al., 1994).

Нарушения земной поверхности, выделяемые по данным ДЗЗ, представлены структурами различной природы и возраста. В практике дистанционных структурных исследований обычно выделяют линейные, кольцевые и дугообразные элементы дистанционного изображения. Линейные элементы, прослеживаемые в рельефе, часто маркируют зоны разломов различного порядка (Кац и др., 1986; Шевырев, Хомич, 2013). Но для определения перспективности территории на наличие полезных ископаемых, связанных с миграцией флюидов, следует учитывать также иные структурные особенности несплошностей породы, образующих перколяционный кластер. Для возникновения инфильтрации растворов система трещиноватости должна достигнуть некоторого порога протекания – минимально необходимого развития в ней несплошностей, образовавших проницаемые кластеры. Их формирование обусловлено не только существованием несплошностей в массиве пород, но и их связностью (Тарасевич, 2002).

Для заверки известных разломов, отмеченных на геологических и тектонических картах, выявления разломно-трещинных структур различных рангов и детализации каркаса разрывных нарушений часто проводится линеаментный анализ. Тер-

мин “линеамент” введен американским геологом У. Хоббсом (Hobbs, 1904). Линеаменты чаще всего представляют собой прямолинейные отрицательные формы рельефа, экспонированные прямолинейные склоны, эскарпы и уступы, последовательность прямолинейных отрезков мелких водотоков, пересекающих в одном направлении водоразделы и долины, прямолинейные осевые линии водоразделов, участки сгущения и перегибов горизонталей. Линеаментный анализ включает в себя комплекс геоморфологических, геологических, дистанционных и других методов картирования геолого-геоморфологических объектов линейного характера. Данный анализ является одним из наиболее эффективных дистанционных методов изучения каркаса разрывных нарушений и глубинного строения территорий (Кац и др., 1986).

Предлагаемый к исследованию район Туяканского рудного узла (ТРУ), расположенный в России в Мамско-Чуйском районе Иркутской области, определен в качестве перспективного на такие виды ПИ как урановые (первоочередные), а также железо- и золоторудные. Учитывая перспективы обнаружения новых месторождений, принимая во внимание сложность геологического строения и труднодоступность территории для полевого обследования, с целью составления геологического обоснования и постановки задач поисковых работ возникает необходимость выявления особенностей тектонического строения и истории развития каркаса разрывных нарушений рассматриваемого района в целом, проведения геодинамических реконструкций, оценки напряженно-деформированного состояния массивов пород и кинематики перемещений в зонах основных разломов. Для района ТРУ на основе ГИС технологий и данных ДЗЗ проведен комплексный анализ, включающий структурно-геоморфологические, пространственно-геометрические, пространственно-плотностные и тектоно-физические методы для выявления специфических особенностей развития каркаса разрывных нарушений, определяющих размещение месторождений полезных ископаемых в пределах территории. Представляемые результаты исследования являются ключевым шагом для выявления региональных структурных критериев локализации уранового оруденения в пределах изучаемой площади и создания комплексных разномасштабных прогнозно-поисковых моделей на рассматриваемый тип рудной минерализации.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования определена территория листа государственной геологической карты (ГГК) О-49-ХП (зимовье Саталах), масшта-

бом 1 : 200 000. Географически площадь расположена в Мамско-Чуйском районе Иркутской области, в крайней северо-западной части Патомского нагорья. Территория представляет собой среднегорный гольцовый массив с абсолютными отметками 1040–1469 м. Рельеф площади резко расчленен, поднятые участки разделены глубокими узкими долинами. Относительные превышения плоских вершин над днищами долин рек составляют 300–700 м. Склоны имеют крутизну 10°–35° и более на бортах речных долин, осложненных ледниковыми карами. Перечисленные особенности рельефа определяют возможность проведения геоморфологического и линейного анализа.

С геологической позиции район локализован вблизи юго-восточной границы Сибирской платформы и относится к Байкало-Вилуйской окраинной плитно-коллизонной области (Митрофанова и др., 2012). Данная область, по мнению исследователей (Никольский, 1975; Сизых, 2001), является значительно переработанной частью фундамента плитного комплекса Сибирской платформы и включает в себя Байкало-Патомскую композитную перикратонную взбросо-надвиговую систему, которая состоит из тектонически совмещенных коллизонными процессами линейных блоков дорифейского фундамента и реликтов Прибайкало-Патомского перикратонного прогиба с рифейским параплитным комплексом.

Прибайкало-Патомский перикратонный прогиб состоит из разделенных разломами блоков – Миньского, Малочуйско-Витимского, Лимпея-Тонодского и Саталахского. Прогиб выполнен рифейскими осадочными породами мощного параплитного комплекса, который в основном находится в сорванном с основания положении, образуя покровно-складчатую структурную ассоциацию. Фундамент прогиба представлен мелкими тектоническими клиньями, сложенными амфиболит-гнейсовым комплексом архея и метаосадками карелия (зона сучивания), которые в форме выдавленных бескорневых линз обнажаются в блоках-линзах, сложенных метаосадочными толщами нижнего карелия и гранитоидами позднего карелия, среди метаосадочных пород рифея (Митрофанова и др., 2012).

К крупным геологическим образованиям Прибайкальско-Патомской краевой системы Саяно-Байкальской складчатой области относятся Тонодское, Чуйское, Нечерское поднятия, являющиеся выступами карельского гранитоидно-метаморфического фундамента среди рифейских параплитных комплексов Прибайкальско-Патомского перикратонного прогиба (Макарьев, Миронов, 2014). На исследуемой территории листа ГК размещается юго-западная часть Тонодского поднятия (рис. 1), которое представляет собой струк-

туру горст-антиклинального типа, сложенную в основном метаморфизованными терригенными породами кевактинской серии нижнего карелия и интродуцирующими их позднекарельскими гранитоидами чуйско-нечерского и габбродолеритами чайского комплексов. В строении юго-западной части поднятия также принимают участие нижнекарельские образования большеминьской толщи и кушимского плутонического комплекса, развитые в виде ксенолитов в гранитах Когальского массива. Перечисленные карельские гранитоидно-метаморфические образования со структурно-стратиграфическим несогласием перекрываются отложениями нижнерифейской пурпольской и/или среднерифейской медвежьей свит (Макарьев и др., 2019).

С точки зрения металлогении территория входит в Саяно-Забайкальскую провинцию и Байкало-Патомскую минерагеническую субпровинцию. Известные рудные объекты включены в Чуйско-Тонодскую золото-редкометалльно-урано-железородную минерагеническую зону, включающую два рудных района – Тонодский в границах Тонодского поднятия и Витимский в зоне перехода от Чуйского к Тонодскому поднятию. Важнейшие полезные ископаемые Тонодского рудного района – золото и уран. Второстепенное значение имеют объекты олова, а также вольфрама и бериллия. В рифейском обрамлении Тонодского поднятия также известны многочисленные проявления железа, титана и высокоглиноземистого сырья. Благороднометалльное оруденение сконцентрировано в Кевактинском рудном узле.

Главным объектом ТРУ является Туюканское урановое месторождение, залегающее среди дезинтегрированных и интенсивно измененных гранитов Кевактинского массива с ксенолитами пород албазинской и михайловской свит. Считается, что рудоконтролирующее значение имеют субширотные тектонические нарушения, субпараллельные границе выходов отложений нижнерифейского чехла (пурпольской свиты). Месторождение не получило окончательной оценки (Машковцев и др., 2010).

В контексте актуальности результатов представляемого исследования необходимо отметить, что территория листа ГК О-49-ХII характеризуется крайне сложным тектоническим строением. Здесь распространены разрывные нарушения, имеющие северо-западную, северо-восточную, реже близширотную и субмеридиональную ориентировки. Установлено преобладание северо-западной вергентности поверхностей сместителей разрывных нарушений главных направлений, согласующейся с вергентностью складчатых структур, что свидетельствует об их взаимосвязи; широкое проявление полициклических надвиговых дислокаций в зоне

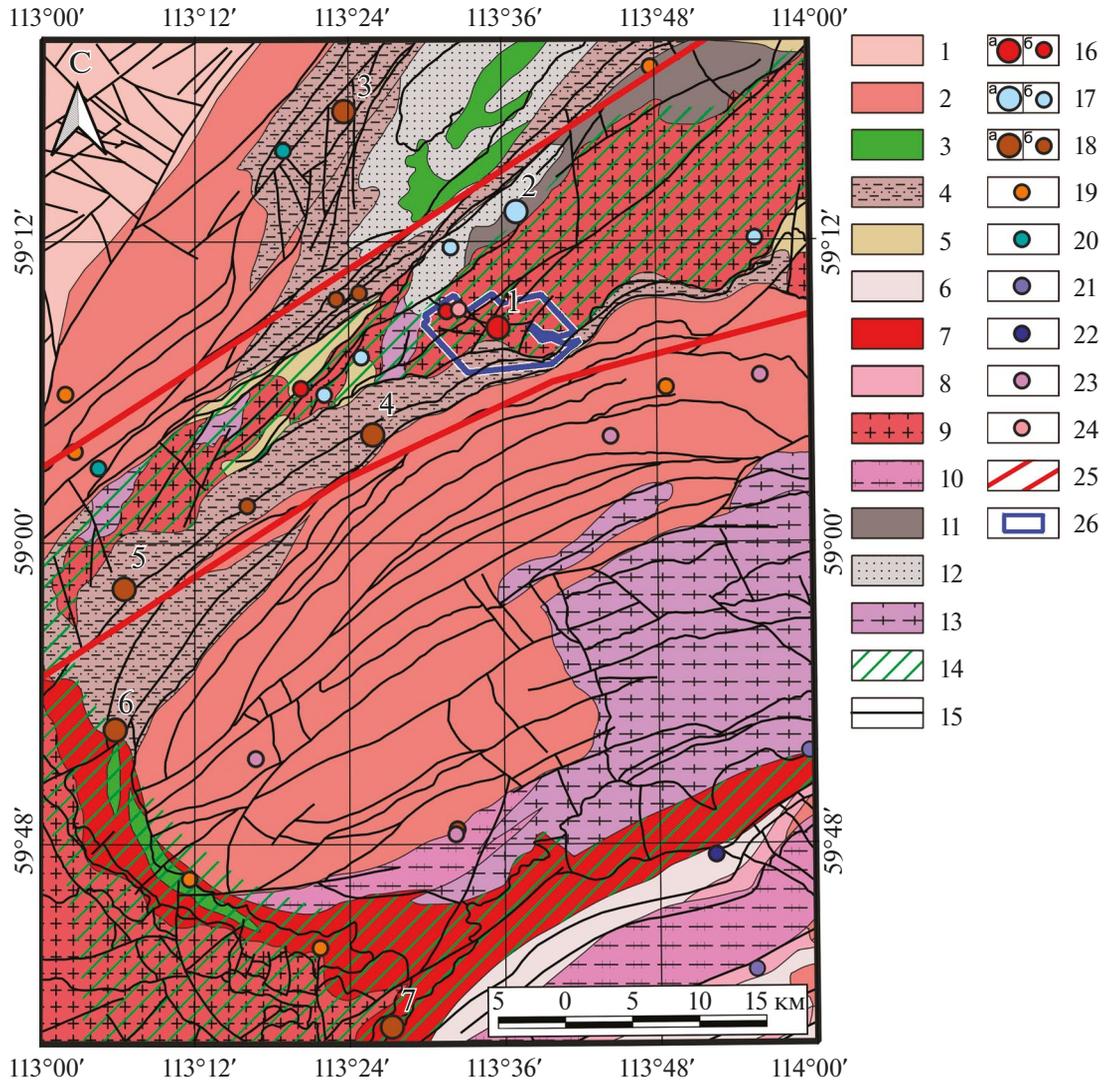


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района Туюканского рудного узла, составленная авторами по материалам листов ГК О-49 и О-49-ХІІ (Митрофанова и др., 2012): 1 – верхнерифейские отложения чехла (RF₁nk); 2 – среднерифейские отложения чехла (RF₂hv); 3 – субвулканические образования медвежьего комплекса (vβF₂m); 4 – медвежья свита (RF₂md); 5 – пурпольская свита (RF₁pp); 6 – конкудерская толща (KR₂kn); 7 – маломиньский динамо-метаморфический комплекс (ktKR₂mm); 8 – согдиондонская толща (KR₂sg); 9 – чуйско-нечерский гранитоидный комплекс (γKR₂cn); 10 – витимская толща (KR₂vt); 11 – михайловская свита (KR₁mh); 12 – албазинская свита (KR₁al); 13 – чуйская толща (KR₁:AR₂cs); 14 – региональные гидротермально-метасоматические зоны; 15 – разрывные нарушения, вынесенные с геологической карты О-49-ХІІ; 16-18 – месторождения (а) и рудопроявления (б): 16 – U, 17 – Sn, 18 – Fe; 19-24 – рудопроявления: 19 – Au, 20 – Cu, 21 – Li, 22 – Ta и Nb, 23 – Ti, 24 – W; 25 – условные границы Тонодского гранитоидно-метаморфического поднятия; 26 – перспективный Туюканский участок. Номера обозначены месторождения: U – Туюканское (1), Sn – Находка (2), Fe – Чистое (3), Язовское (4), Гремучее (5), Сухое (6), Барчихинское (7).

сочленения платформы и складчатой области, наличие тектонических окон в районе Чуйского блока, с развитием многоярусных надвиговых чешуй и формированием мощных зон динамометаморфизма. Разрывные нарушения северо-западной ориентировки, несмотря на четкую выраженность в рельефе, изучены слабо и выявляются в основном по геофизическим и дистанционным данным.

Также предполагается, что разрывные нарушения северо-восточной ориентировки моложе разломов северо-западного простирания и неоднократно подновлялись (Митрофанова и др., 2012). В результате полевых работ и проведенного геологического картирования северо-западные разломы однозначно идентифицированы как левые сдвиги (Ковешников и др., 1989). Большая часть разрыв-

ных нарушений неоднократно подновлялась в течение длительной геологической истории развития территории, что привело к формированию мощных зон катаклаза, милонитизации и рассланцевания пород. Во многих случаях современная гидросеть наследует черты и определяется тектоникой, что позволяет использовать структурно-линеamentный анализ для достоверной реконструкции параметров каркаса разрывных нарушений. Нарушения субширотной ориентировки, по мнению исследователей, заложены в поздние этапы тектонической активизации (Шманкевич и др., 1983). На дневной поверхности эти нарушения проявлены крупными уступами и зонами интенсивного рассланцевания пород. По данным работ предшественников (Иванов и др., 1982), эти разрывные нарушения мезоглубинные, а время заложения большинства из них относят к раннему протерозою.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеamentный анализ территории проводился с помощью методики, основанной на построении и обработке цифровой модели рельефа (ЦМР). Данная методика предложена и верифицирована на реальных геологических объектах сотрудниками лаборатории геоинформатики ИГЕМ РАН (Устинов, Петров, 2016). Методика эффективна даже в областях со слабо расчлененным рельефом. ЦМР территории создана с использованием открытых данных радарной интерферометрической съемки поверхности земного шара SRTM (Shuttle radar topographic mission) с пространственным разрешением 30 метров на пиксель (Liping et al., 2011). Результаты съемки представляют собой растровые изображения со значениями высотных отметок рельефа для каждого пикселя в формате GeoTIFF, содержащем метаданные о географической привязке (рис. 2 а, б). Линеamentы на ЦМР выявлялись с помощью разработанного с участием отдельных авторов данной статьи программного обеспечения на основе нейросетевых технологий (Гришков и др., 2023). Данный подход, учитывая высокое пространственное разрешение используемой ЦМР, позволил выделить на территории множество непротяженных линеamentов (15 912 шт.), которые могут быть проинтерпретированы в качестве “мегагрещин”, опережающих протяженную разрывную структуру (Петров и др., 2010; Ребецкий и др., 2017). Чтобы разработанная нейронная сеть могла выделить протяженные линеamentы, необходимо искусственно снизить пространственное разрешение изображения ЦМР. При этом, учитывая небольшое количество наблюдаемых протяженных линеamentов (690 шт.), которые могут соответствовать крупным зонам разрывных нарушений, нами принято решение выделить их в ручном режиме.

До процедуры идентификации линеamentов с помощью созданной нейронной сети для наиболее точного выделения линеamentов на этапе предварительной подготовки ЦМР применялся метод нелинейной направленной фильтрации изображения. В данном исследовании направленная фильтрация использовалась для улучшения границ градиентного перехода между значениями пикселей, с целью выделения определенных характеристик изображения на основе их частоты, связанной со структурными особенностями территории. Направленная фильтрация изображения, в соответствии с общепризнанными методиками (Papilinski, 1998; Suzen, Toprak, 1998; Enoh et al., 2021), производилась по четырем основным направлениям: С–Ю (0°), СВ–ЮЗ (45°), В–З (90°), ЮВ–СЗ (135°), с построением соответствующих схем теневого рельефа, с целью подчеркнуть все возможные ориентировки выделяемых на изображении структур (рис. 2 в–е).

В зарубежной литературе, в соответствии с теорией разломообразования Е.М. Андерсона, выделяются три основных типа разломов: сбросы, сдвиги и надвиги (Anderson, 1905). Все перечисленные типы разломов относятся к чисто сдвиговым перемещениям бортов. Вместе с тем в механике разрушения существуют три основных механизма трещинообразования (моды разрушения): отрыв, продольный сдвиг и поперечный сдвиг (антиплоская деформация). То есть, по существу, имеют место два типа (механизма) разрушения: отрыв и сдвиг.

К настоящему времени сложилась ситуация, когда большинство специалистов в области разломной тектоники допускают отрывной характер разрушения горных пород, но для описания кинематики смещения по образованному разрыву используют в основном сдвиговое перемещение (с позиций механики). Раздвиговый тип перемещения в разломной зоне практически не рассматривается. Это во многом объяснимо тем, что основные методы, которыми изучают разломы (дистанционные, бурение, разведочная геофизика), намного легче и естественнее выявляют сдвиговые перемещения смежных блоков вдоль границ разрывных нарушений (Кузьмин, 2018).

При всей сложности таких объектов, как мощные протяженные разломные зоны, систематические исследования позволили выявить и общие ключевые черты строения их ядра, и определенные различия в зависимости от генезиса и истории деформирования. Получены детальные сведения о ширине основной зоны локализации сдвига (Chester et al., 1993; Sibson, 2003), структуре очага динамической подвижки по данным исследования жил псевдотехилита (Rowe et al., 2018), Р-Т-условиях (Faulkner et al., 2006; Ружич и др., 2018), гидромеханических свойствах разломных зон и распределении повреж-

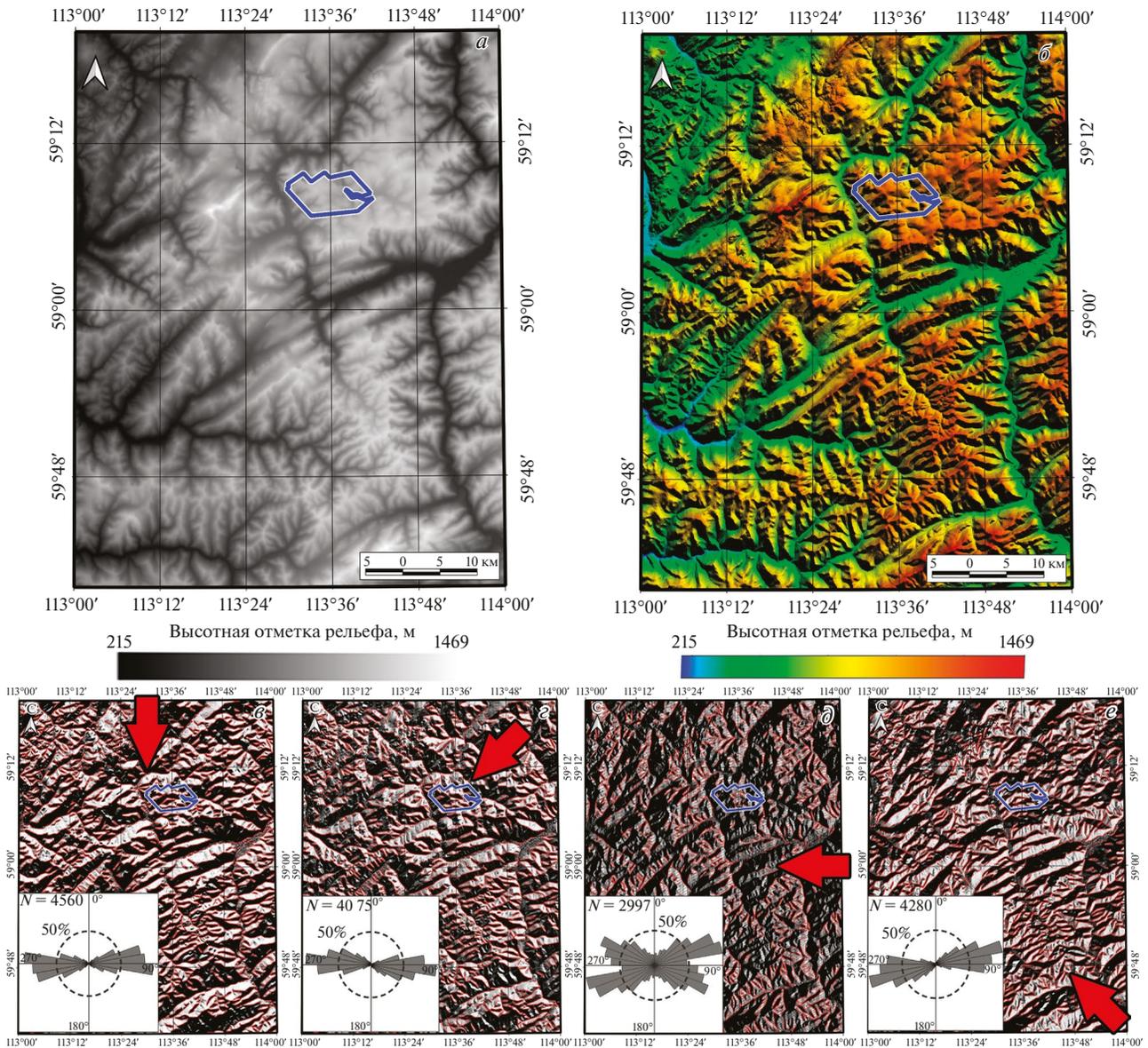


Рис. 2. Исходные данные цифровой модели рельефа SRTM в формате GeoTIFF (а) и их визуализация в ГИС-среде (б); в–г – результат фильтрации ЦМР с визуализацией результата в теневом рельефе по четырем основным направлениям (показаны красной стрелкой): С–Ю (в), СВ–ЮЗ (г), В–З (д), ЮВ–СЗ (е) с выделенными созданной нейросетью линияментами (красные линии) и розами-диаграммами их ориентировок. Синий контур – границы перспективного Туюканского участка.

дений вокруг разломов, которые определяют характеристики разрыва и пути миграции флюида (Evans et al., 1997; Faulkner et al., 2018).

В ходе экспериментов, проведенных под руководством К.Ж. Семинского (ИЗК СО РАН) выделено 4 стадии формирования разломной сдвиговой зоны: пликативная стадия (может выразиться в пластической деформации), ранняя дизъюнктивная стадия (формируются системы сколов), поздняя дизъюнктивная стадия и стадия полного разрушения (формирование магистрального разрыва)

(Семинский, 2003). На основе результатов моделирования установлено, что внутренняя разрывная структура разломов эволюционирует в рамках трех стадий однонаправленно, от многочисленных мелких разрывов, через избирательное разрастание одних и переход в пассивное состояние других при межстадийных перестройках, к единому магистральному шву (Борняков и др., 2014).

Локализованные участки сдвига окружены зонами поврежденного материала, которые обычно ассоциируются с зоной повышенной, по сравне-

нию с вмещающим массивом, плотности трещин, которая снижается по экспоненциальному закону по мере удаления от магистрального разрыва (Рац, Чернышев, 1970; Faulkner et al., 2011). Подобные зоны выделены и детально описаны в серии статей и в монографиях (Шерман и др., 1983; Шерман, 2014). Они названы зонами “динамического влияния разломов”. Зону влияния иногда дифференцируют на подзоны интенсивной и повышенной трещиноватости (Семинский, 2003). Ширина и свойства зон повреждения сильно различаются с глубиной из-за увеличивающихся среднего давления и температуры, а также по простиранию из-

за сложной геометрии разлома (Anders, Wiltschko, 1994; Wilson et al., 2003; Faulkner et al., 2018).

Для реконструкции параметров регионального поля напряжений-деформаций (ПНД), кинематики основных разломов и стадий формирования каркаса разрывных структур на основе интерпретации выделенных линейментов рассмотрены наиболее распространенные тектонофизические модели формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома (основного разрывного нарушения первого порядка в масштабе площади исследования) в зоне сдвига (рис. 3). Для зон сдвига (до образования в них магистрального разрыва)

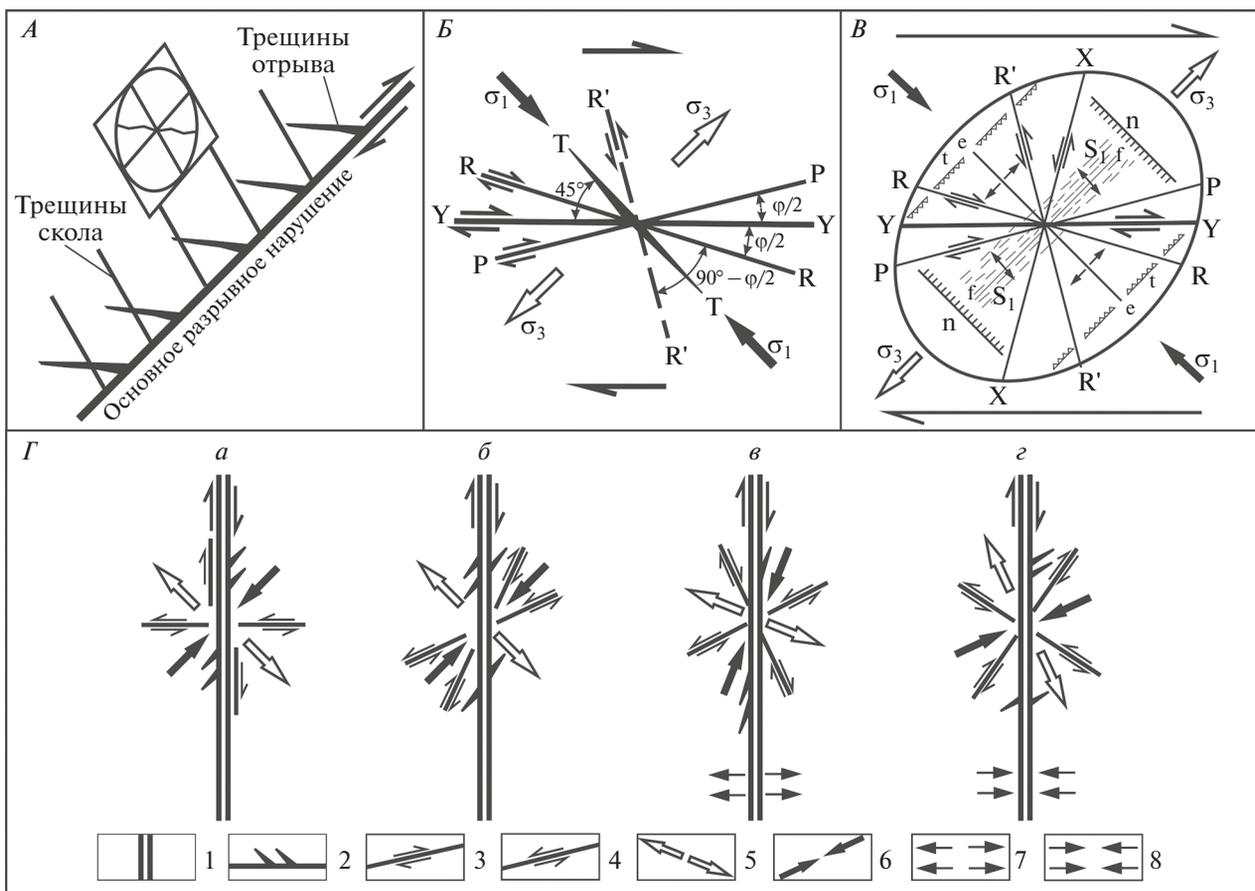


Рис. 3. Наиболее распространенные модели формирования парагенезиса оперяющих трещин магистрального разлома (основного разрывного нарушения) в зоне сдвига на примере правого сдвига. *А* – схема образования трещин оперения вблизи поверхности основного разрывного нарушения (Смирнов, 1976). *Б* – схема формирования вторичной трещиноватости по В. Риделю (Riedel, 1929): *Y* – магистральные сдвиги, *R* и *R'* – сопряженные сколы Риделя, *P* – вторичные сдвиги, *T* – отрывы, ϕ – угол внутреннего трения, σ_1 – ось максимального сжатия, σ_3 – ось максимального растяжения. *В* – системы эшелонированных структурных элементов, образующихся в сдвиговой разломной зоне при простом скалывании (Hancock, 1985): *Y* – магистральные сдвиги, *R* и *R'* – сопряженные сколы Риделя, *X*, *P* – вторичные сдвиги, *e* – отрывы, *n* – сбросы, *t* – взбросы, *f* – складки, *S₁* – кливаж, σ_1 – ось максимального сжатия, σ_3 – ось максимального растяжения. *Г* – парагенезис оперяющих трещин в зоне сдвига (Гзовский, 1975): варианты напряженного состояния при углах скалывания 45° (*а*), $<45^\circ$ (*б*), обстановки дополнительного растяжения (*в*) и сжатия (*г*); 1 – разлом; 2 – трещины отрыва; 3, 4 – сколы с правой (3) и левой (4) сдвиговой кинематикой; 5, 6 – ориентация осей растяжения (5) и сжатия (6) в горизонтальной плоскости; 7, 8 – дополнительные обстановки растяжения (7) и сжатия (8).

природные картины нарушений второго порядка установлены и объяснены с позиций механики (Семи́нский, 2003; Ребецкий и др., 2017). На начальном этапе в относительно однородном для определенной территории ПНД возникают кулисообразные системы трещин отрыва (одна система) и скола (две сопряженные системы). В зонах сдвига ориентировка трещин данных систем отвечает напряженному состоянию чистого сдвига (Гзовский, 1975). В случае, если на чистый сдвиг накладывается небольшое сжатие или растяжение вкрест оси зоны, напряженно-деформированное состояние может остаться близким к чистому сдвигу, но ориентировка осей сжатия и растяжения, а также связанная с ними ориентировка трещин закономерно изменяются (рис. 3 Г) (Гзовский, 1975; Семи́нский, 2003). Это исходное ПНД зон сдвига и трещины, возникшие в результате его действия, можно считать отвечающими 1-му этапу развития магистрального разрыва – этапу его подготовки.

Существуют различные объяснения формирования нарушений второго порядка вокруг уже активных разломов с позиций механики (Hancock, 1985; Семи́нский, 2003). Многие авторы сходятся во мнении, что после формирования в зоне скалывания магистрального разрыва около него возникнет новое локальное поле напряжений, создающее новые трещины (2-й этап). При этом возникшие ранее трещины становятся частью оперения разрыва. Также существует представление, что первично сформировавшиеся трещины 2-го порядка возникают либо в зоне сдвига после смещения бортов разрыва (Смирнов, 1976; Riedel, 1929), либо вызваны смещением его бортов, но без явной связи с зоной сдвига (Николя, 1992). В данных представлениях совмещены трещины 1-го этапа и сам разрыв (2-й этап) (рис. 3 А, Б). В итоге геометрия вторичных нарушений, возникших в зоне скалывания (на 1-м этапе) дается верно, но неверно объяснен их генезис, а вторичные нарушения 2-го этапа не показаны.

Более широкий подход при моделировании зон сдвига и близких к ним зон скалывания и отрыва до возникновения в них основного разрыва отражены в работах М.В. Гзовского (Гзовский, 1975). Автор отмечает, что изучаются зоны деформирования в условиях простого сдвига, а разрыв вдоль оси зоны показан условно для демонстрации его положения в будущем (рис. 3 Г). П.Л. Хэнкок приводит наиболее полную сводную схему рядов вторичных структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования в них магистрального разрыва и после его формирования (Hancock, 1985) (рис. 3 В).

Приведенные модели М.В. Гзовского и П.Л. Хэнкока, как наиболее комплексные, могут использоваться для интерпретации пространственного положения выявленных линеаментов с целью ре-

конструкции ориентировки осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, определения направлений сдвигового перемещения по разломам (правый или левый) и воссоздания геодинамической обстановки формирования разлома (сжатия или растяжения). На модели М.В. Гзовского основывается структурно-геоморфологический (СГ) метод, предложенный д.г.-м.н. Л.А. Сим (ИФЗ РАН), который эффективно применяется для реконструкции тектонических особенностей областей с различными геологическими обстановками (Сим, 1991; Сим и др., 2007; Петров и др., 2010; Ребецкий и др., 2017). Для автоматизации реализации данного метода создана программа SimSGM (Гордеев, Молчанов, 2019). Специально для решения задач представляемого исследования написано программное обеспечение (ПО) “Lineament Stress Calculator” (автор А.Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН) для интерпретации ориентировок выделенных линеаментов применительно к представленным моделям и, в частности, модели П.Л. Хэнкока.

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

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

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

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

где S_1 – значение напряжений по оси максимального сжатия, S_3 – значение напряжений по оси наименьшего сжатия, P_f – флюидное давление, ϕ – угол между нормалью к плоскости разрывного нарушения и осью действия напряжения S_1 (рис. 4).

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

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

При этом наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур обладают $\mu \approx 0,6$ (Jaeger, Cook, 1979; Fuchs, Müller, 2001).

Данные подходы использованы в работе для реконструкции каркаса разрывных нарушений по структурно-геоморфологическим признакам, пара-

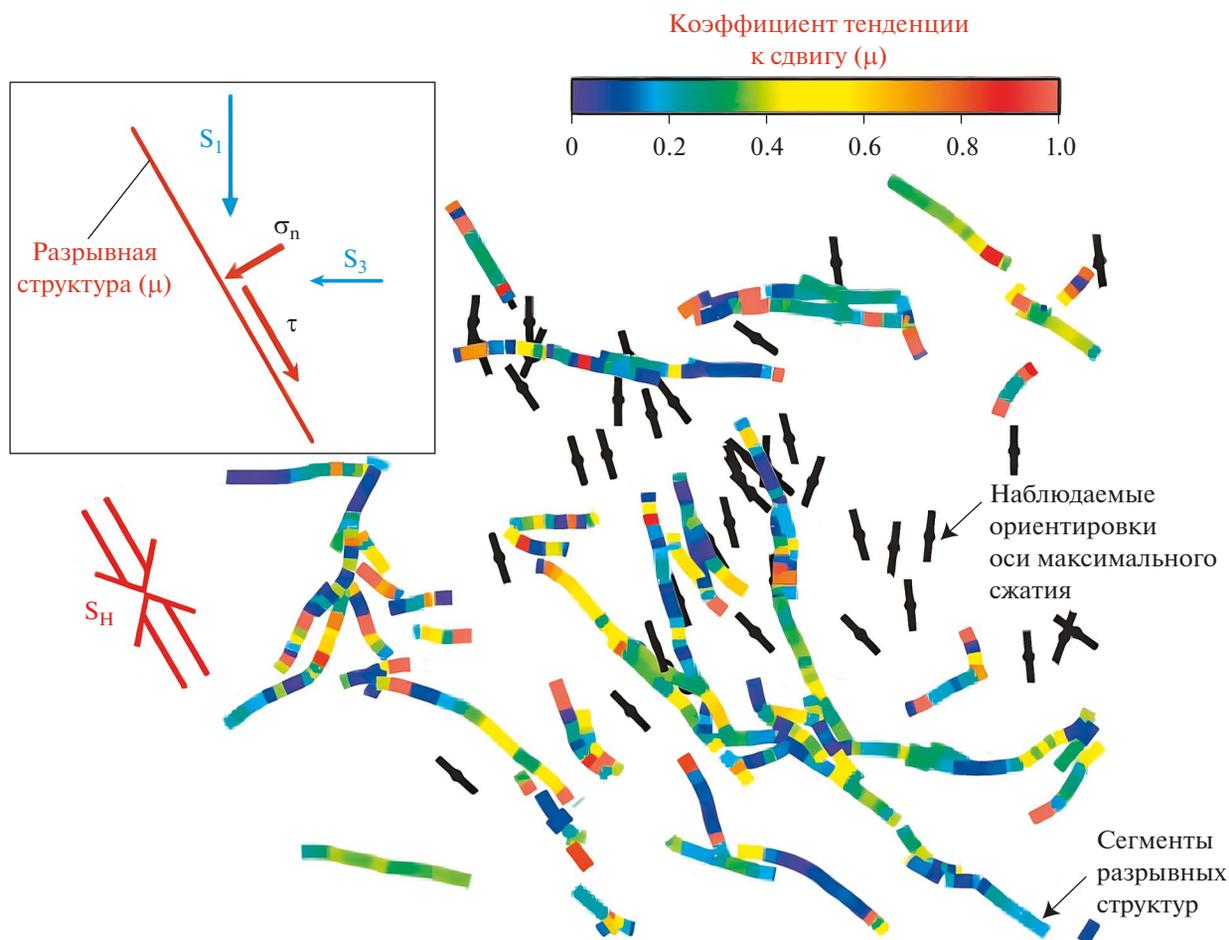


Рис. 4. Общая схема определения тенденции к сдвигу (μ) на основе комбинации ориентировок региональных анизотропных напряжений (черные символы – ориентировка оси максимального сжатия) с ориентировками сегментов разрывных структур с расчетом отношения сдвигового (τ) к нормальному напряжению (σ_n) для сегментов разломов: S_1 – ориентировка оси максимального сжатия, S_2 – ось минимального сжатия, S_H – региональная ориентировка оси максимального сжатия. Желтым и оранжевым цветами указаны сегменты, демонстрирующие наибольшую степень гидравлической активности (Fuchs, Müller, 2001).

метров ПНД, установления кинематики основных выявленных разломных зон, определения наиболее гидравлически активных сегментов разломов, восстановления стадийности формирования структур.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ роз-диаграмм простираний региональных разрывных нарушений и неотектонических активных разломов по данным ГГК О-49, масштабом 1:1 000 000, позволяет сделать вывод о том, что северо-восточная ориентировка всех типов разновозрастных структур превалирует (рис. 5). Большинство разломов данной ориентировки максимально развиты в пределах Саяно-Байкальской складчатой области и субпараллельны ее границе с Сибирской платформой. Розы-диаграммы древ-

них разломов и неотектонических нарушений практически совпадают, что может свидетельствовать о постоянной подновляемости (активизации) структур данных ориентировок, и их унаследованности в современном рельефе. Как было показано в результате ранних исследований (Митрофанова и др., 2012), данные структуры по масштабу проявления являются надрегиональными, заложены в раннепротерозойское время и подновлялись в периоды тектономагматической активизации. Многие исследователи отмечают факт наследования черт тектонического строения района современной гидросетью (Шманкевич и др., 1983). Вышесказанное позволяет в рамках рассматриваемой площади использовать морфологические особенности рельефа и результаты линеamentного анализа для достоверной реконструкции особенностей каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нару-

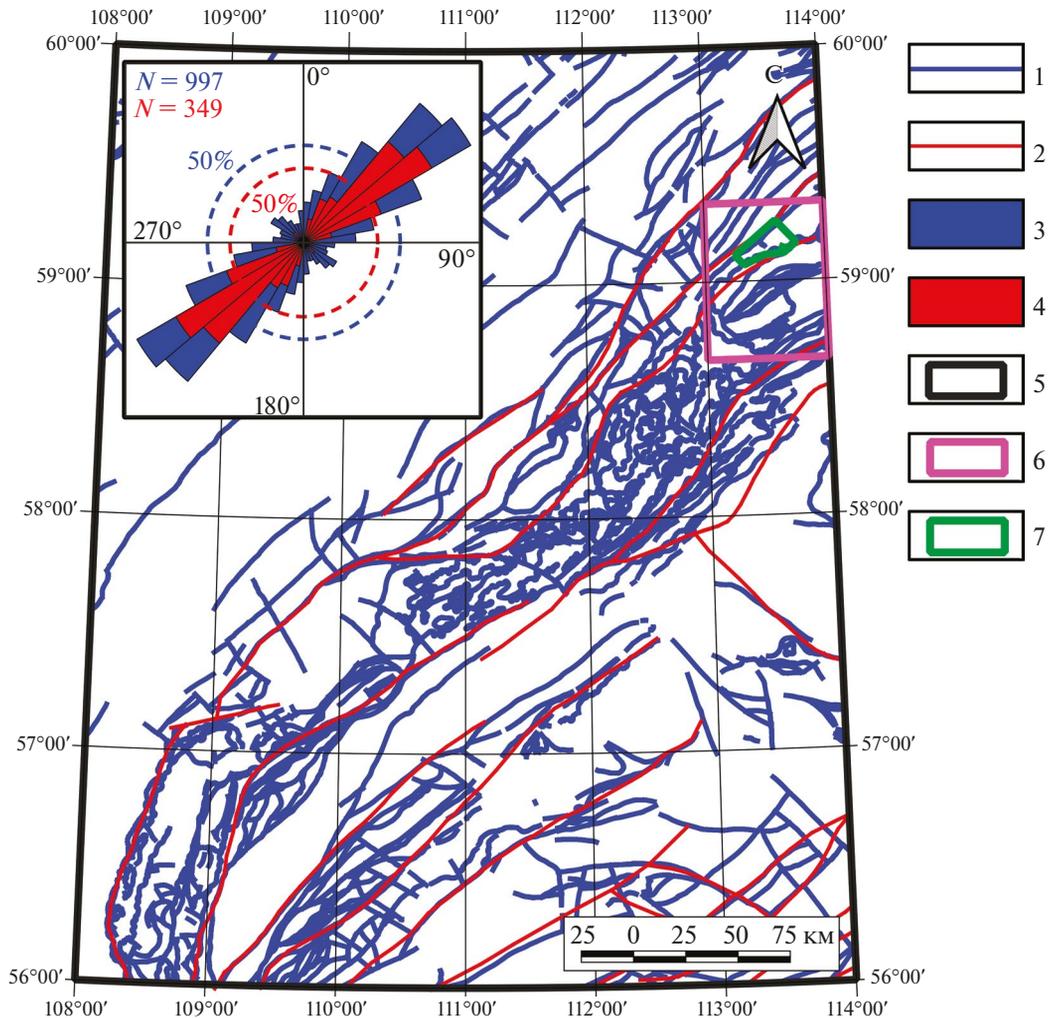


Рис. 5. Схема пространственного распределения разрывных нарушений древнего заложения и неотектонических структур на территории листа ГГК О-49, масштабом 1:1 000 000, и розы-диаграммы их ориентировок: 1, 2 – разрывные нарушения региональные (1) и неотектонические (2); 3, 4 – розы-диаграммы разрывных нарушений древнего заложения (3) и неотектонических зон (4); 5–7 – границы листа ГГК О-49 (5), изучаемой территории (6), перспективного участка Туюкан (7).

шений, участвовавших в процессе миграции рудоносных флюидов, восстановления кинематики перемещений в зонах основных разломов, как на этапе заложения, так и в результате последующих активизаций, параметров и стадийности смены ПНД.

Для всех выявленных и известных линейных объектов (линеаменты, выделенные нейронной сетью; линеаменты, выделенные оператором; откартированные разломы) построены розы-диаграммы и схемы относительных удельных плотностей их распределения (рис. 6). При создании роз-диаграмм учитывалось не только количество линейных объектов с разными ориентировками, но и их общая протяженность, что позволило отобразить длины лучей роз-диаграмм пропорциональными сумме длин линейных объектов рассматриваемых

интервалов простираций. Эта важная деталь анализа позволяет оценить выраженность и значимость на площади определенных генераций структур, косвенно сравнить величины проявления различных этапов деформаций.

Под плотностью линеаментов подразумевается относительная удельная плотность – количество структур (объектов) на единицу площади. При этом эмпирически установлены оптимальные расчетные параметры выходных растров плотности в соответствии с масштабом объекта (площади) исследования и протяженностью выявляемых и ранее откартированных линейных объектов. Для линеаментов, выявленных нейронной сетью, учитывая их высокую плотность, использованы радиус поиска 1000 м и размер пикселя – 100 м. Для линеаментов, выде-

ленных оператором, и закартированных разрывных структур радиус поиска определен в 2000 м и размер пиксела – 100 м.

Максимумы плотности линеаментов, выделенных нейронной сетью и, вероятно, маркирующих оперяющие трещины в зоне протяженного разлома, а также отражающих структуры высоких порядков, развиты повсеместно в пределах исследуемой площади (рис. 6 А). При проведении дистанционных структурно-геоморфологических исследований считается, что максимумы плотности линеаментов соответствуют наиболее тектонически ослабленным участкам по простиранию крупных разрывных структур. Даже без привязки к протяженным разломам, максимумы предполагаемой трещиноватости часто рассматриваются в качестве потенциально структурно проницаемых областей. На основе этого параметра и оценки фрактальной размерности линеаментов некоторые исследователи выделяют структурно проницаемые кластеры (Шевырев, 2015). Данный подход не совсем верный, так как мегатрещины разных генетических типов в зоне динамического влияния протяженного разлома, марки-

руемые линеаментами, формируются в зависимости от параметров действовавшего при заложении основной (магистральной) структуры ПНД и могут находиться в различных геодинамических обстановках от сжатия до растяжения, значительно влияющих на условия протекания флюидов. Соответственно, чтобы данные обстановки восстановить, важно выявить тип каждой оперяющей структуры. Это возможно сделать только с учетом тектонофизических моделей формирования разломной зоны (см. рис. 3). Как видно из схемы относительной удельной плотности линеаментов, выделенных нейронной сетью, далеко не все месторождения и рудопроявления попадают на максимумы плотности. Но при этом урановое месторождение Туюкан локализовано в пределах области с высоким значением плотности линеаментов (см. рис. 6 а).

При сравнении максимумов плотности линеаментов с положением известных закартированных разломов (рис. 6 а, в) установлено, что максимумы плотности тяготеют к сближенным друг с другом разрывным нарушениям и их пересечениям, а также формируют отдельные участки вдоль протяжен-

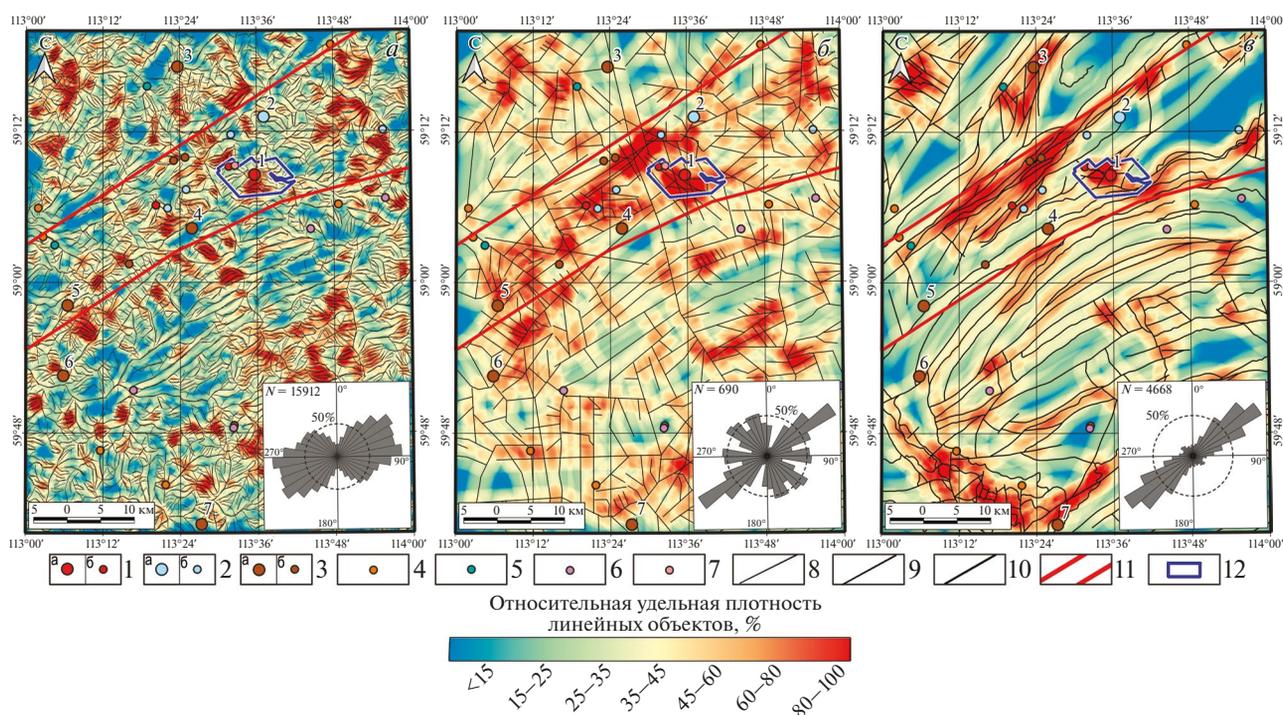


Рис. 6. Схемы относительной удельной плотности линеаментов, выявленных с помощью нейронной сети (а), выделенных оператором (б), региональных разрывных нарушений по ГК О-49-ХП (в) с розами-диаграммами ориентировки соответствующих структур. 1–3 – месторождения (а) и рудопроявления (б): U (1), Sn (2), Fe (3); 4–7 – рудопроявления: Au (4), Cu (5), Ti (6), W (7); 8, 9 – линеаменты, выделенные нейронной сетью (8), выделенные оператором (9), 10 – региональные разрывные нарушения по ГК О-49-ХП; 11 – условные границы Тонодского гранитоидно-метаморфического поднятия; 12 – границы перспективного Туюканского участка. Номера обозначены месторождения: U – Туюканское (1), Sn – Находка (2), Fe – Чистое (3), Язовское (4), Гремучее (5), Сухое (6), Барчихинское (7). N – количество прямолинейных сегментов линеаментов и разломов, использованных для построения розы-диаграммы.

ного разлома с определенным структурным шагом, с чередованием минимумов и максимумов плотности, что подтверждает модель формирования разрывной структуры на этапе полного разрушения (Семинский, 2003). Непротяженные линеаменты, в соответствии с розой-диаграммой, формируют две наиболее проявленные системы северо-восточной и субширотной ориентировок. Но при этом также наблюдается ярко выраженный разброс углов простираний предполагаемых структур от 40° до 130° , который может отражать формирование отдельных нескольких систем мегатрещин, нуждающихся в интерпретации и дальнейшей заверке.

Протяженные линеаменты, выделенные вручную оператором, могут маркировать структуры более низких порядков. Максимумы плотности данных линеаментов в основном сосредоточены в пределах Тонодского поднятия, протягивающегося с юго-запада на северо-восток, а также более разреженно локализованы в северо-западной и юго-восточной частях исследуемой площади (рис. 6 б). Месторождение Туюкан и выделенный ранними геологоразведочными работами одноименный перспективный участок локализованы в пределах крупного максимума плотности линейных объектов. На розе-диаграмме в качестве главной, наиболее проявленной системы, выделяются линеаменты северо-восточной ориентировки, вероятно, маркирующие положение надрегиональных структур, субпараллельных границе с Сибирской платформой. Менее проявленными, но ярко выраженными являются системы север-северо-западного, северо-западного и субширотного простираний. Также, менее всех проявлена, но может быть выделена система субмеридиональной ориентировки.

На схеме относительной удельной плотности известных зартированных разломов по данным ГГК О-49-ХП максимумы плотности соответствуют участкам сближения и максимального количества пересечений данных структур (рис. 6 в). При этом созданная схема и используемый для ее построения каркас разрывных нарушений полностью зависят от детальности проведенных ранее геологоразведочных и картировочных работ. На площадях, где осуществлены поисковые работы на определенных типах полезных ископаемых в пределах перспективных участков, положение разрывных нарушений уточнено более детально за счет применения дополнительных методов (геофизика, бурение), а в областях, где проводились исключительно картировочные работы, показаны только самые протяженные региональные разломы. Например, в пределах перспективного участка Туюкан в результате детальных работ откартированы разноориентированные зоны разломов, сближение и пересечение которых,

естественно, демонстрирует область максимума на созданной схеме плотности. Как можно видеть из построенной розы-диаграммы (см. рис. 6 в), структуры, отображенные на геологической карте, характеризуются преимущественно северо-восточной ориентировкой разрывных нарушений. При этом в отчетах о проведенных поисковых работах на различные типы полезных ископаемых дается упоминание о протяженных зонах северо-западных и субширотных разломов (Иванов и др., 1982; Шманкевич и др., 1983; Ковешников и др., 1989). При этом, данная информация не нашла отражения при создании итоговой геологической карты изучаемой территории. Сравнение ориентировок протяженных линеаментов, выделенных оператором (см. рис. 6 б), вероятно, маркирующих крупные зоны разрывов, и откартированных разрывных структур (см. рис. 6 в), как одноранговых объектов, уже на данном этапе позволяет сделать заключение о значительной недоизученности каркаса разрывных нарушений в пределах рассматриваемой площади.

Для выделения и заверки крупных разрывных зон на основе анализа пространственного положения и создания схем плотности непротяженных линеаментов, выделяемых автоматически различными программными средствами, Д.В. Сивковым с соавторами предложена методика, которая также применялась в данном исследовании (Сивков и др., 2020). Для каждого линейного сегмента выделенных с помощью нейронной сети линеаментов рассчитан и присвоен в виде атрибута истинный азимут его простирания. На основе этого атрибута проведено ранжирование линеаментов по классам и построены восемь схем относительных удельных плотностей линейных объектов с шагом в $22.5 \pm 11.25^\circ$ (рис. 7 а-з). На всех схемах наблюдаются локальные максимумы относительной удельной плотности линеаментов, которые выстраиваются в линейные “цепочки” и формируют некоторые тренды, образующие множество сближенных сонаправленных линеаментов. Соответственно, выстраивающиеся в линию максимумы относительной удельной плотности, совпадающие по азимуту с линеаменами определенных ориентировок, будут маркировать крупные линейные геологические объекты, наиболее вероятно, зоны протяженных разломов.

Далее, с целью подтверждения выделенных ранее в результате геологического изучения территории разрывных нарушений и выявления неопознанных на геологической карте, но значимых с точки зрения размещения полезных ископаемых, структур, нами построена обобщенная схема относительной удельной плотности всех трендов, выявленных на основе восьми схем относительных удельных плотностей линеаментов разных интервалов ориентировок (рис. 7 и). Черным пунктиром

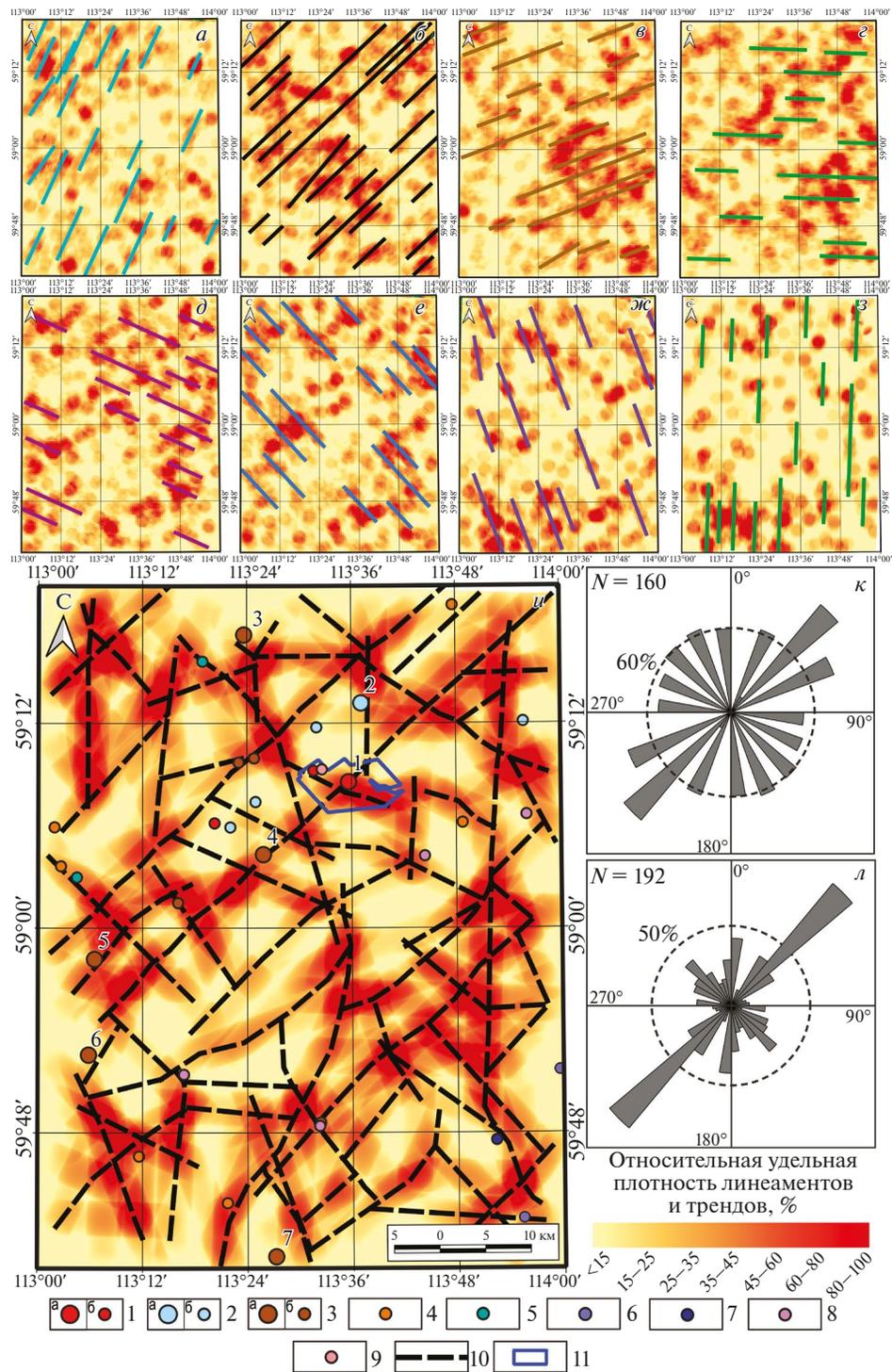


Рис. 7. *a–з* – схемы относительных удельных плотностей линейментов по интервалам ориентировок с выявленными трендами (показаны жирными линиями разных цветов) по методике (Сивков и др., 2020): *a* – $11^{\circ}-34^{\circ}$; *б* – $33,5^{\circ}-56,5^{\circ}$; *в* – $56^{\circ}-79^{\circ}$; *г* – $78,5^{\circ}-101,5^{\circ}$; *д* – $101^{\circ}-124^{\circ}$; *е* – $123,5^{\circ}-146,5^{\circ}$; *ж* – $146^{\circ}-169^{\circ}$; *з* – $168,5^{\circ}-11,5^{\circ}$; *и* – схема относительной плотности всех выделенных трендов и ее интерпретация с выявлением крупных зон разрывов; *к* – роза-диаграмма ориентировки трендов линейментов; *л* – роза-диаграмма ориентировки выявленных в результате интерпретации трендов линейментов разломных зон. 1–3 – месторождения (*a*) и рудопоявления (*б*): 1 – U, 2 – Sn, 3 – Fe; 4–9 – рудопоявления: 4 – Au, 5 – Cu, 6 – Li, 7 – Ta и Nb, 8 – Ti, 9 – W; 10 – выявленные в результате интерпретации трендов линейментов разломные зоны; 11 – перспективный Туюканский участок. Номерами обозначены месторождения: U – Туюканское (1), Sn – Находка (2), Fe – Чистое (3), Язовское (4), Гремучее (5), Сухое (6), Барчихинское (7). N – количество объектов (трендов и сегментов предполагаемых разломов), использованных для построения розы-диаграммы.

на схеме показаны интерпретируемые по плотности трендов протяженные линейные разрывные зоны. Структуры северо-восточного простирания наиболее проявлены и совпадают с подтвержденными региональными зонами разломов, отраженными на ГГК О-49-ХП (рис. 7 к, л). Также, менее проявлены, но отчетливо выделяются линейные структуры северо-западного и субмеридионального простираний (см. рис. 7 л). Эти структуры могут быть выделены и в результате визуального анализа и дешифрирования созданной ЦМР (см. рис. 2 б, 6 б). Наличие подобных предполагаемых, но не отраженных на геологической карте, структур нуждается в верификации в рамках геологического доизучения площади, их роль в локализации полезных ископаемых должна быть установлена и учтена при составлении металлогенического очерка и прогноза.

На схеме относительной удельной плотности всех выявленных трендов и интерпретируемых разломных зон видно, что преобладающее большинство месторождений и рудопроявлений, известных в пределах площади, либо приурочены к выявленным разрывным структурам, либо находятся в непосредственной близости от них (см. рис. 7 и). Во втором случае необходимо оценить ширину зоны динамического влияния каждой выделенной структуры и, наиболее вероятно, рудный объект окажется пространственно связан с опережающими рассматриваемую структуру мегатрещинами, развитыми в данной зоне. Кроме того, анализ полученной схемы позволяет сделать вывод о том, что решающее значение в локализации оруденения играют структурные узлы, формируемые на пересечении северо-восточных и северо-западных разломов. В пределах юго-западной части Тонодского поднятия можно предположить региональный структурный шаг в 5,5–7 км, выражающийся в пересечениях северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений и, вероятно, влиявший на размещение оруденения.

На основе проведенного выявления трендов линеаментов и положения предполагаемых разломных зон осуществлена попытка реконструкции параметров регионального ПНД и кинематики выявленных разрывных нарушений. Так как линейные структуры северо-восточной системы маркируют переходную зону от границы Сибирской платформы к Саяно-Байкальской складчатой области, протягиваются не только на исследуемой площади, но и далеко за ее пределы и являются, как это упоминалось выше, надрегиональными, то разломы, относящиеся к данной системе, рассмотрены в качестве магистральных (1-го порядка). По сути данные разломы, по результатам изучения нескольких листов ГГК, масштабом 1:1 000 000, могут отражать единую сдвиговую область северо-восточного про-

стирания с широкой зоной деформаций (до 100 км), в пределах которой могли развиваться магистральные, первичные и вторичные опережающие структуры (см. рис. 5). Это также подтверждается тем, что все другие системы разломов менее проявлены и потому отнесены нами к структурам 2-го порядка. С помощью разработанного ПО “Lineament Stress Calculator” возможно проинтерпретировать рассмотренные структуры с позиций модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985). Как оказалось, в этом случае все крупные разломные зоны, формирующие каркас разрывных нарушений площади, однозначно интерпретируются в едином ПНД (рис. 8).

Установлено, что ось регионального максимального сжатия имела субширотную ориентировку ($\approx 90^\circ$), а ось регионального максимального растяжения характеризовалась субмеридиональным направлением ($\approx 0^\circ$). При этом магистральные разломы (Y) северо-восточного простирания однозначно интерпретируются как правые сдвиги. Разломы северо-западной ориентировки, которые имеют значимое распространение на территории, после основных разломов, являются антитетическими (R') и, соответственно, характеризуются противоположной (левые сдвиги) кинематикой относительно магистральных структур. Данный факт также согласуется с результатами проведенных ранее полевых исследований (Ковешников и др., 1989). Помимо прочего, ярко выраженными структурами на территории являются системы разломов субмеридиональной ориентировки. Их формирование согласуется с примененной нами моделью, где они представляют взбросы (t). Наличие протяженных субмеридиональных взбросов в рассматриваемом регионе также отмечалось исследователями (Иванов и др., 1982). Другие системы разрывных структур менее проявлены на площади, но, тем не менее, могут быть выделены. В частности, выделяются синтетические (R) правые сдвиги северо-восточного простирания, сопряженные с системой магистральных разломов. Также с магистральными разломами сопряжены вторичные сколы (P) с той же кинематикой. Выделяются и вторичные сколы (X) с левосдвиговой кинематикой, имеющие север-северо-западное простирание. Структуры отрыва (T) субпараллельны оси максимального сжатия и ориентированы субширотно (см. рис. 8).

На основе результатов реконструкции ориентировки главных региональных осей сжатия и растяжения, расчета коэффициента тенденции к сдвигу (μ), возможно визуализировать сегменты установленных и предполагаемых (линеаменты) разрывных структур, в различной степени предрасположенных к сдвигу (сколу). Расчеты проводились для интерпретированных по трендам линеаментов разломов, протяженным линеаментам, выделен-

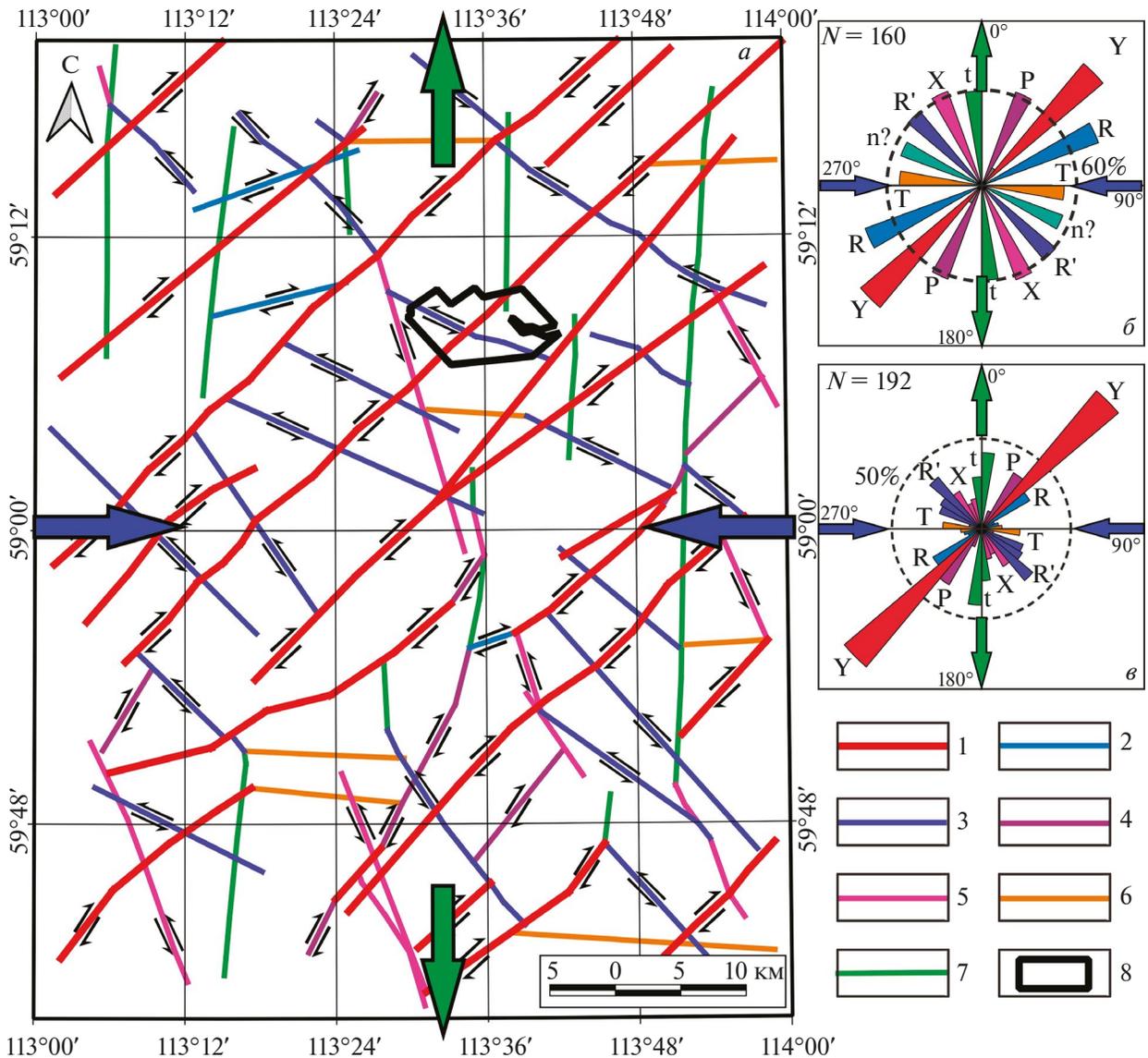


Рис. 8. Интерпретация каркаса выявленных разрывных нарушений листа ГК О-49-ХП на основе модели П.Л. Хэнкока (Hancock, 1985) с помощью ПО “Lineament Stress Calculator”. *a* – схема проведенной реконструкции ориентировок региональных осей максимального сжатия и растяжения, а также кинематики разрывных структур: 1 – магистральные сдвиги (Y); 2 – синтетические сколы (R); 3 – антитетические сколы (R’); 4 – вторичные сдвиги, совпадающие по кинематике с магистральными сдвигами (P); 5 – вторичные сдвиги с обратной кинематикой относительно магистральных сдвигов (X); 6 – отрывы (T); 7 – взбросы (t); 8 – границы перспективного Туюканского участка. *б* – интерпретация розы-диаграммы ориентировки выявленных трендов линеаментов. *в* – интерпретация розы-диаграммы ориентировки выявленных по трендам линеаментов разломных зон. Синие стрелки – ориентировка оси максимального сжатия; зеленые стрелки – ориентировка оси максимального растяжения.

ным оператором, и откартированным разрывным нарушениям, как сомасштабным объектам (рис. 9). В результате визуализации сегментов, характеризующихся определенными значениями тенденции к сдвигу при субширотной ориентировке оси сжатия, установлено, что наиболее гидравлически активные сегменты имеют северо-восточные и северо-западные ориентировки. То есть в терминах модели развития трещиноватости в зоне сдвига,

предложенной П.Л. Хэнкоком, наиболее деформированные зоны развиваются по магистральным разломам (северо-восточное простирание, правые сдвиги) и антитетическим оперяющим разломам (северо-западное простирание, левые сдвиги), характеризующимся обратной кинематикой. В этой обстановке субмеридиональные разломы, выявленные в результате интерпретации трендов линеаментов, находятся в обстановке сжатия и ха-

рактируются слабой проницаемостью (рис. 9 а). На площади выделяется много протяженных линейментов обозначенных ориентировок с повышенными значениями тенденции к сдвигу, которые могли играть роль рудоподводящих структур в период заложения мощной правосдвиговой зоны в пределах Саяно-Байкальской складчатой области (рис. 9 б). Так как большинство закартированных сегментов разломных зон также имеют преимущественно северо-восточную ориентировку, то почти все они оценены как гидравлически активные (рис. 9 в).

Необходимо еще раз отметить, что при показанном выше подходе с помощью тектонофизического анализа линейментов реконструированы ориентировки регионального ПНД. Это возможно только в том случае, если на территории выделяются крупные надрегиональные структуры главного ранга, которые возможно интерпретировать как магистральные разломы. Остальные сформированные в пределах площади разрывы должны значительно уступать обозначенным структурам по протяженности и относиться к более высоким рангам. Только тогда их можно рассмотреть в качестве оперяющих главную структуру разрывов. Не всегда предполагаемые магистральные разломы и оперяющие разры-

вы показывают хорошую сопоставимость с используемой тектонофизической моделью. Это означает, что данные разрывные структуры могли формироваться в различные временные этапы под действием абсолютно отличных по параметрам и масштабу проявления ПНД. Кроме того, на площади могут быть развиты несколько разноориентированных сомасштабных систем надрегиональных разломов, что также свидетельствует о разновременном заложении данных структур при действии различных ПНД, с формированием собственных систем оперяющих разрывов.

Важно отметить, в соответствии с рассмотренными тектонофизическими моделями формирования вторичных структур, не наблюдается единовременного заложения магистрального разлома. На начальном этапе происходит его подготовка за счет формирования двух систем трещин скола (R и R') и одной системы трещин отрыва (Т). Далее происходит заложение магистрального разлома (Y). В результате активных подвижек по нему могут быть сформированы вторичные системы сколов (Р и X). Вокруг каждой из образованных сдвиговых структур, в зоне динамического влияния, в результате подвижек формируется локальное ПНД, параме-

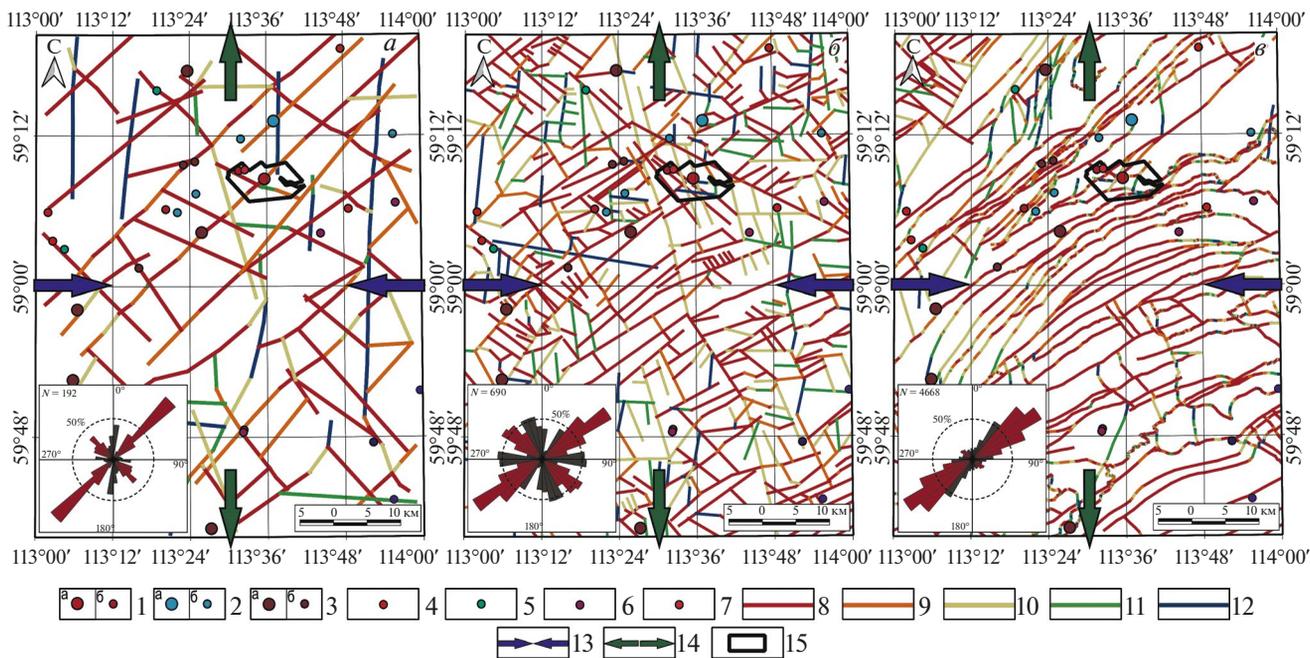


Рис. 9. Результаты расчета тенденции к сдвигу (μ) для сегментов предполагаемых и известных разрывных структур относительно реконструированных ориентировок региональных анизотропных напряжений для: а – предполагаемых разломов, выявленных на основе интерпретации трендов линейментов; б – протяженных линейментов, выделенных оператором; в – закартированных разрывных структур. На розах-диаграммах красным цветом показаны ориентировки сегментов структур повышенной проницаемости. 1–3 – месторождения (а) и рудопоявления (б): 1 – U, 2 – Sn, 3 – Fe; 4–7 – рудопоявления: 4 – Au, 5 – Cu, 6 – Ti, 7 – W; 8 – сегменты повышенной проницаемости; 9 – проницаемые сегменты; 10 – сегменты средней проницаемости; 11 – слабопроницаемые сегменты; 12 – непроницаемые сегменты; 13 – ориентировка региональной оси максимального сжатия; 14 – ориентировка региональной оси максимального растяжения; 15 – границы перспективного Туюканского участка.

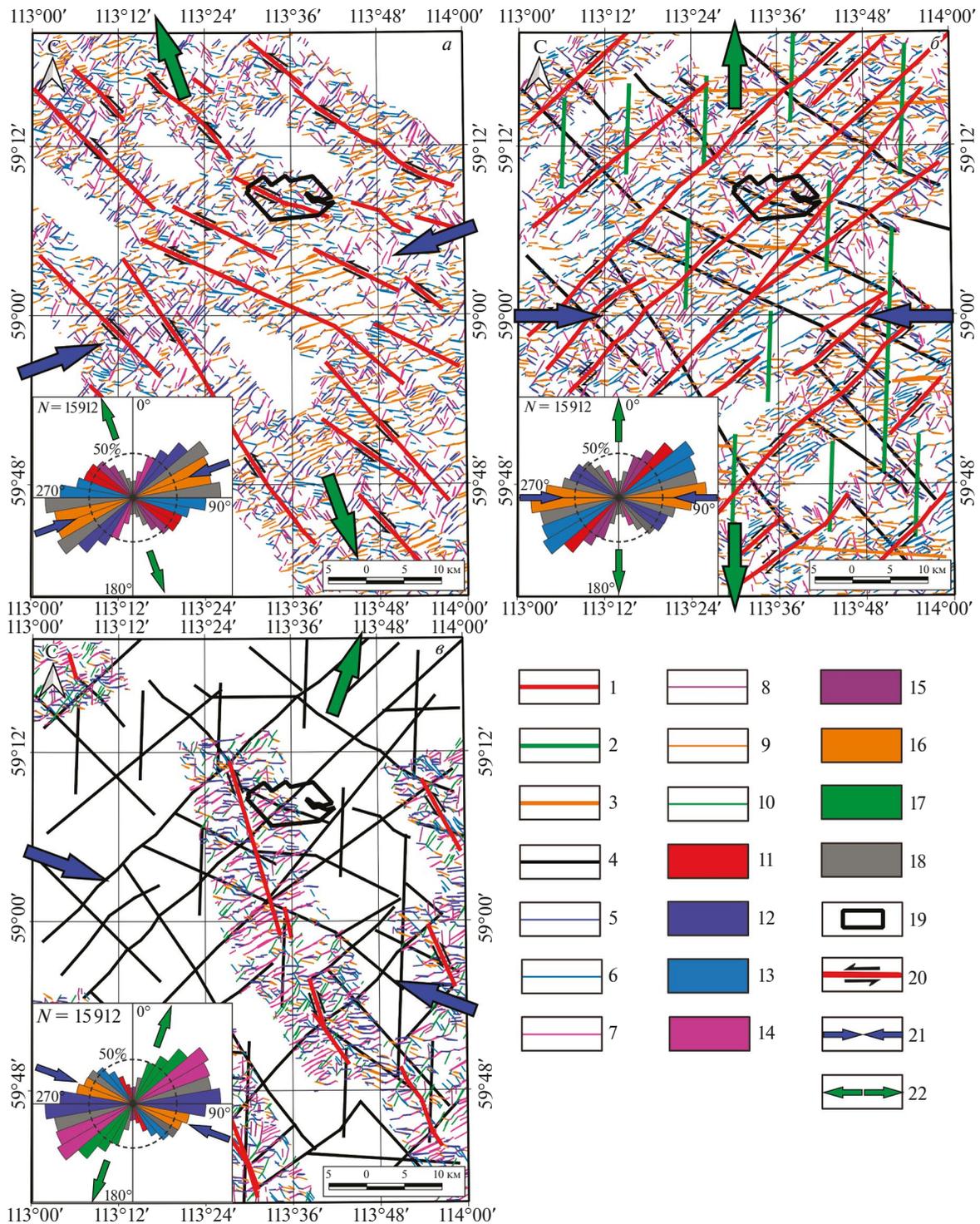


Рис. 10. Реконструкция параметров локальных полей напряжений-деформаций и стадийности формирования каркаса разрывных нарушений района Туяканского рудного узла. *а* – первая стадия, *б* – вторая стадия, *в* – третья стадия. 1 – формируемые на определенной стадии региональные сдвиговые структуры; 2 – региональные взбросы; 3 – региональные отрывы; 4 – сформированные на предыдущих стадиях разрывные структуры; 5 – синтетические сколовые мегатрещины (R'); 6 – антитетические сколовые мегатрещины (R); 7 – вторичные локальные сколы (X); 8 – вторичные локальные сколы (P); 9 – локальные отрывы; 10 – локальные взбросы; 11–18 – ориентировки структур и мегатрещин на розах-диаграммах: магистральные разломы (11), антитетические сколы (12), синтетические сколы (13), вторичные сколы X (14), вторичные сколы P (15), отрывы (16), взбросы (17), структуры других стадий (18); 19 – границы перспективного участка Туякан; 20 – сдвиговая кинематика структур; 21 – ориентировка оси максимального сжатия; 22 – ориентировка оси максимального растяжения.

тры которого могут отличаться от регионального. Параметры локальных ПНД возможно установить за счет анализа непротяженных линеаментов непосредственно вблизи сформированной структуры или ее сегментов. Такой подход позволяет детализировать кинематику разрывных структур и наметить стадийность их формирования.

Для решения данной задачи в пределах исследуемой площади для каждого из выявленных разрывных нарушений рассматривалось и на основе модели П.Л. Хэнкока интерпретировалось положение непротяженных линеаментов, выделенных нейронной сетью, в предполагаемой зоне динамического влияния структуры. Установлено, что северо-западные разломы сформировались в первую очередь и в локальном ПНД, как и в региональном, представлены левыми сдвигами. Раннее заложение северо-западных структур по отношению к другим разломам подтверждается и натурными исследованиями (Митрофанова и др., 2012). При этом ориентировки оси максимального сжатия и растяжения составляли 70° и 160° , соответственно. Это отражено и в определенном наборе систем оперяющих мегатрещин, маркирующихся линеаментами (рис. 10 а).

На второй стадии происходит заложение магистральных разломов северо-восточного простирания, представленных правыми сдвигами. Локальное ПНД, создаваемое в зоне динамического влияния данных структур, идентично региональному ПНД. Ось максимального сжатия имеет субширотную ориентировку, а ось максимального растяжения – субмеридиональную. Происходит поворот главных осей по часовой стрелке на 20° . Помимо магистральных разломов, на данной стадии, вероятно, происходило формирование субширотных структур, соответствующих условиям отрыва, а также субмеридиональных региональных взбросов (рис. 10 б).

На заключительной стадии наблюдается заложение север-северо-западных структур, отвечающих вторичным левосторонним сдвигам (рис. 10 в). Данные структуры проявлены на площади в меньшей степени по сравнению с остальными разломами и действующее вокруг них ПНД характеризуется дальнейшим поворотом главных осей по часовой стрелке с ориентировками 110° (сжатие) и 20° (растяжение).

Необходимо отметить, что сопряженные с магистральным разломом правосторонние синтетические сколы и система правосторонних вторичных сколов практически не получили значимого развития в региональном ПНД в пределах рассматриваемой площади и представлены только непротяженными мегатрещинами в зонах динамического влияния рассмотренных выше структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для района Туюканского рудного узла на основе различных подходов, в том числе авторских, к выделению линеаментов с использованием цифровой модели рельефа, включая ее разнонаправленную фильтрацию, и применением геоинформационных технологий проведен комплексный анализ на основе сочетания структурно-геоморфологического, пространственно-геометрического и тектонофизического методов. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. На основе сравнения ориентировок региональных разрывных нарушений древнего заложения и неотектонических разрывных структур установлена их унаследованность. Это позволяет использовать морфологические особенности рельефа исследуемой территории для достоверной реконструкции каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нарушений, участвовавших в процессе миграции рудоносных флюидов, восстановления кинематики перемещений в зонах основных разломов как на этапе заложения, так и в результате последующих активизаций, параметров и стадийности смены ПНД.

2. С помощью построения схем относительных удельных плотностей линеаментов определенных ориентировок выявлены их протяженные тренды и реконструированы предполагаемые крупные разломные зоны, к которым приурочено большинство известных в пределах площади месторождений. Установлено, что решающее значение в локализации оруденения играют зоны динамического влияния северо-восточных и северо-западных разломов. В пределах юго-западной части Тонодского поднятия выявлен региональный структурный шаг в 5,5–7 км, выражающийся в пересечении северо-восточных и северо-западных разрывных нарушений, повлиявший на размещение оруденения. Сравнение выявленных структур и известных разрывных нарушений позволяет сделать вывод о том, что представленный на геологической карте О-49-ХII каркас разрывных нарушений в значительной степени недоизучен.

3. На основе модели развития вторичных структур в зоне скола П.Л. Хэнкока и установленных разрывных нарушений реконструированы параметры (ориентировки главных осей) регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов разрывов. Магистральные разломы северо-восточной ориентировки, субпараллельные границе Сибирской платформы и Саяно-Байкальской складчатой области, характеризуются как правые сдвиги при ориентировке оси сжатия 90° . Разломы северо-западной ориентировки являются левыми сдвигами. Системы разломов субмери-

дионального простираения представляют взбросы. Структуры отрыва субпараллельны оси максимального сжатия и ориентированы субширотно. Другие системы разрывных структур менее проявлены на площади.

4. Расчет тенденции к сдвигу (μ) с учетом установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур, которые характеризуются преимущественно северо-восточной и северо-западной ориентировками.

5. В пределах зон динамического влияния выявлены разрывы реконструированы параметры локальных полей напряжений-деформаций, а также стадийность формирования данных структур. Северо-западные разломы сформировались на первой стадии как левые сдвиги при восток-северо-восточной ориентировке оси максимального сжатия. Вторая стадия отражает заложение магистральных разломов северо-восточного простираения правосторонней кинематики, субширотных отрывов и субмеридиональных взбросов при субширотной ориентировке оси максимального сжатия. Третья стадия связана с формированием север-северо-западных левых сдвигов при северо-западной ориентировке оси максимального сжатия локального поля напряжений-деформаций.

6. Для более точного прогноза размещения полезных ископаемых дальнейшие работы необходимо сосредоточить на тектонофизическом анализе мегатрещин, развитых преимущественно в зонах динамического влияния установленных наиболее гидравлически активных (структурно проницаемых) разломов – северо-восточного и северо-западного простираения. Данные надрегиональные и региональные структуры могли выступать в качестве рудоподводящих, а структуры более высокого ранга – рудоконтролирующих.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00218, <https://rscf.ru/project/24-27-00218/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования)// Геодинамика и тектонофизика. 2014. № 5(4). С. 823–861.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.

Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Мишаев В.А. Разработка методики автоматического выделения линейментов на основе нейросетевого подхода // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86–97.

Иванов А.И., Рожок С.Н., Страхова Т.М., Яковлев В.П. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья нижнего течения Витима и Бол. Патома (Отчет Туюканской партии по групповой геологической съемке масштаба 1:50 000 за 1978–1980 гг.) в 3 томах. Иркутск, 1982. Инв. № 14-78-31/24.

Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линейментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.

Ковешников А.М., Подшивалов А.Н., Пимнев Ю.К. и др. Перспективное районирование на уран территории Тонодского поднятия с выбором площадей и объектов под детальные поисковые и оценочные работы на основе структурно-геологических, радиогеохимических, минералого-петрографических исследований, дешифрирования космо и аэрофотоматериалов и ревизии известных проявлений урана с составлением схемы перспективного районирования масштаба 1:200 000 на площади 7,5 тыс кв. км. По геологическому заданию 5-1 за 1985–1989 гг. Иркутск 1989 г. РГФ № 2698.

Кузьмин Ю.О. Современные аномальные деформации земной поверхности в зонах разломов: сдвиг или раздвиг? // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 967–987.

Макарьев Л.Б., Ефремова У.С., Крымский Р.Ш., Сергеев С.А. Возраст и стадийность уранового оруденения Туюканского рудного узла (Тонодский район, Северное Забайкалье) // Регион. геология и металлогения. 2019. № 77. С. 67–74.

Макарьев Л.Б., Миронов Ю.Б. Особенности металлогении и перспективы промышленной ураноносности Чуйско-Тонодской минерогенетической зоны северного Забайкалья (по материалам ГК-1000/3 и ГДП-200/2) // Региональная геология и металлогения. 2014. № 57. С. 87–94.

Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 – Киренск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 607 с.

Никольский Ф.В. Морфология и генезис складок северной окраины Байкало-Патомского нагорья и Приленского плато. Автореф. канд. дис. Иркутск, 1975. 22 с.

Николя А. Основы деформации горных пород. М.: Мир. 1992. 167 с.

Петров В.А., Сим Л.А., Насимов Р.М., Шужин С.И. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельховской кальдеры // Геология рудных месторождений. 2010. Том 52. № 4. С. 310–320.

Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 160 с.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 235 с.

- Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Травин А.В., Савельева В.Б., Остапчук А.А., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Юдин Д.С.* Определение Р-Т-условий при формировании сейсмогенных подвижек по глубинному сегменту краевого шва сибирского кратона // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 4. С. 434–437.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал “ГЕО”, 2003. 243 с.
- Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л.* Применение линейного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 3–19.
- Сизых В.И.* Шарьяжно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. Новосибирск, 2001. 154 с.
- Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22.
- Сим Л.А., Михайлова А.В., Войтенко В.Н.* Сдвиговая тектоника платформ (по данным моделирования и реконструкции неотектонических напряжений) // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2007. Т. 2. С. 147–151.
- Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. М.: Недра. 1976. 688 с.
- Тарасевич Ю.Ю.* Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: Учебное пособие. М.: Едиториал УРСС, 2002. 112 с.
- Устинов С.А., Петров В.А.* Использование детальных цифровых моделей рельефа для структурно-линеamentного анализа (на примере Уртуйского гранитного массива, ЮВ Забайкалье). // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 51–60.
- Шевырев С.Л.* О новых возможностях крупномасштабной прогнозной оценки паттернов дистанционного изображения на примере Нижнетаежного рудного узла, Приморье // Руды и металлы. 2015. № 2. С. 56–66.
- Шевырев С.Л., Хомич В.Г.* Выявление инфраструктурных элементов рудно-магматических систем Приморья по материалам космического зондирования // Вестник ВГУ. 2013. № 2. С. 118–128.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1983. 110 с.
- Шерман С.И.* Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Гео, 2014. 359 с.
- Шманкевич А.Ю., Мельников И.Д.* Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ в западной части Тондского антиклинория (Северная часть Мегетской экспедиции, 1980–83 гг.). 1983. РФФ № 404197.
- Anders M.H., Wiltshko D.V.* Microfracturing, paleostress and the growth of faults // J. Struct. Geol. 1994. V. 16. № 6. P. 795–815.
- Anderson E.M.* The dynamics of faulting // Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. 1905. P. 387–402.
- Chester F.M., Evans J.P., Biegel R.L.* Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1993. V. 98. № B1. P. 771–786.
- Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C.* Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Ugwueme, South-Eastern Nigeria. Geod. Cartogr. 2021. 47. P. 34–44.
- Evans J.P., Forster C.B., Goddard J.V.* Permeability of fault related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones // J. Struct. Geol. 1997. V. 19. № 11. P. 1393–1404.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Healy D., Heap M.J.* Slip on weak faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone // Nature. 2006. V. 444. № 7121. P. 922–925.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Jensen E., Cembrano J.* Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes. // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2011. V. 116. № 5. P. 1–11.
- Faulkner D.R., Sanchez-Roa C., Boulton C., den Hartog, S.A.M.* Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature. // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2018. V. 123. № 1. P. 226–241.
- Fuchs K., Müller B.* World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. № 88. P. 357–371.
- Gloaguen R., Marpu P.R., Niemeier I.* Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. Nonlinear Process. Geophys. 2007. 14. P. 131–138.
- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.
- Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. 1904. V. 15. P. 483–506.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W.* Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edit. 1979. 593 p.
- Liping Y., Xingimin M. and Xiaoqiang Z.* SRTM DEM and its application advances // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32. № 14. P. 3875–3896.
- Papilinski A.* Directional filtering in edge detection. IEEE Trans. Image Processing 1998. 7. P. 611–615.
- Riedel W.* Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen // Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol., Abt. B. 1929. P. 354–368.
- Rowe C.D., Ross C., Swanson M.T., Pollock S., Backeberg N.R., Barshi N.A.* Geometric complexity of earthquake rupture surfaces preserved in pseudotachylyte networks // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2018. № 123. P. 7998–8015.
- Sibson R.H.* Thickness of the seismic slip zone // BSSA. 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.
- Suzen M.L., Toprak V.* Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. Int. J. Remote Sens. 1998. 19. P. 1101–1114.
- Wilson J.E., Chester J.S., Chester F.M.* Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas System, California. // J. Struct. Geol. 2003. № 25. P. 1855–1873.
- Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L.* Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // AusIMM Publication Series. № 4/94. 1994. P. 109–115.

Structural-Tectonophysical Approach to Interpretation of Lineament Analysis Results for Prediction of Ore-Forming Mineral Systems on the Example of the Tuyukansky Ore Cluster Area

S. A. Ustinov¹, A. M. Chepchugov^{1,2}, M. A. Tomasovskaya³, V. A. Petrov¹,
A. D. Svecherevsky¹, E. V. Yarovaya¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*All-Russian Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russia*

³*Vostok GeoService Partner LLC, Chita, Russia*

For the Tuukansky ore cluster area, located in Russia in the Mamsko-Chuysky district of the Irkutsk region and identified as promising for the discovery of new uranium, gold, and iron ore objects, an original approach was applied based on geoinformation technologies and processing of Earth remote sensing data, including structural-geomorphological, spatial-geometric, spatial-density, and tectonophysical methods for identifying specific stages of development of the fault framework defining the location of ore mineralization. The possibility of using the morphological features of the terrain for reliable reconstruction of both neotectonic and ancient fault networks using a special lineament analysis technique based on analysis of a digital elevation model created using SRTM data has been proven. It has been shown that zones of the dynamic influence of northeast and northwest faults act a crucial role in mineral localization. Based on the tectonophysical approach, the orientations of the main axes of compression and tension in the regional stress-strain field, as well as the kinematics of the major types of formed faults, have been reconstructed. Taking into account the established orientation of the main axes of the regional stress field when calculating the shear trend made it possible to identify the most hydraulically active segments of fault structures. Within the zones of dynamic influence of identified faults, the parameters of local stress-strain fields, as well as the formation stages of these structures, have been reconstructed. The obtained information should be taken into account when compiling a metallogenic essay and predicting minerals in the area.

Keywords: digital elevation model, SRTM, Earth remote sensing, geoinformation systems, lineament analysis, structural-geomorphological method, tectonophysics, stress-strain field, ore field and deposit structures, faults, ore deposit prediction, uranium, Patom Highland, Tonodskoe Uplift, Tuukansky Ore Cluster

REFERENCES

- Anders M.H., Wiltschko D.V. Microfracturing, paleostress and the growth of faults // *J. Struct. Geol.* 1994. V. 16. № 6. P. 795–815.
- Anderson E.M. The dynamics of faulting // *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8. 1905. P. 387–402.
- Borynyakov S.A., Seminsky K.Zh., Buddo V.Yu., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., Tarasova A.A. The main patterns of fault formation in the lithosphere and their applied consequences (based on the results of physical modeling) // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2014. No. 5(4). P. 823–861 (In Russian).
- Chester F.M., Evans J.P., Biegel R.L. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1993. V. 98. № B1. P. 771–786.
- Enoh M.A., Okeke F.I., Okeke U.C. Automatic lineaments mapping and extraction in relationship to natural hydrocarbon seepage in Uguweme, South-Eastern Nigeria. *Geod. Cartogr.* 2021. 47. P. 34–44.
- Evans J.P., Forster C.B., Goddard J.V. Permeability of fault related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones // *J. Struct. Geol.* 1997. V. 19. № 11. P. 1393–1404.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Healy D., Heap M.J. Slip on weak faults by the rotation of regional stress in the fracture damage zone // *Nature*. 2006. V. 444. № 7121. P. 922–925.
- Faulkner D.R., Mitchell T.M., Jensen E., Cembrano J. Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes. // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2011. V. 116. № 5. P. 1–11.
- Faulkner D.R., Sanchez-Roa C., Boulton C., den Hartog, S.A.M. Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature. // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2018. V. 123. № 1. P. 226–241.
- Fuchs K., Müller B. World Stress Map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // *Naturwissenschaften*. 2001. № 88. P. 357–371.
- Gloaguen R., Marpu P.R., Niemeier I. Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. *Nonlinear Process. Geophys.* 2007. 14. P. 131–138.
- Gordeev N.A., Molchanov A.B. Automation of structural-geomorphological method for reconstruction of shear tectonic stresses L.A. Sim // *Geoinformatics*. 2019. No. 2. P. 25–33 (In Russian).
- Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A. Development of a technique for automatic identification of lineaments based on a neural network approach // *Exploration of the Earth from Space*. 2023. No. 6. P. 86–97 (In Russian).
- Gzovsky M.V. Fundamentals of tectonophysics. M.: Nauka, 1975. 536 p. (In Russian).

- Hancock P.L.* Brittle microtectonics: principles and practice // *J. of Struct. Geol.* 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.
- Hobbs W.H.* Lineaments of the Atlantic Border Region // *Geological Society. American Bulletin.* 1904. V. 15. P. 483–506.
- Ivanov A.I., Rozhok S.N., Strakhova T.M., Yakovlev V.P.* and others. Geological structure and minerals of the interfluvium of the lower reaches of Vitim and Bol. Patoma (Report of the Tuyukan Party on a group geological survey at a scale of 1:50,000 for 1978–1980) in 3 volumes. Irkutsk, 1982. Inv. No. 14-78-31/24 (In Russian).
- Jaeger J.C., Cook N.G.W.* Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edit. 1979. 593 p.
- Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F.* Fundamentals of lineament tectonics. M.: Nedra, 1986. 144 p. (In Russian).
- Koveshnikov A.M., Podshivalov A.N., Pimnev Yu.K.* and others. Prospective uranium zoning of the territory of the Tonoda uplift with the selection of areas and objects for detailed prospecting and assessment work based on structural-geological, radiogeochemical, mineralogical and petrographic studies, interpretation of space and aerial photographs and revision of known uranium occurrences with the drawing up of a scale prospective zoning scheme 1:200,000 on an area of 7.5 thousand square meters. According to geological assignment 5-1 for 1985–1989. Irkutsk 1989. RGF No. 2698 (In Russian).
- Kuzmin Yu.O.* Modern anomalous deformations of the earth's surface in fault zones: shear or expansion? // *Geodynamics and tectonophysics.* 2018. Vol. 9. No. 3. P. 967–987 (In Russian).
- Liping Y., Xingimin M. and Xiaoqiang Z.* SRTM DEM and its application advances // *International Journal of Remote Sensing.* 2011. Vol. 32. №. 14. P. 3875–3896.
- Makariev L.B., Efremova U.S., Krymsky R.Sh., Sergeev S.A.* Age and stages of uranium mineralization of the Tuyukan ore cluster (Tonodsky district, Northern Transbaikalia) // *Region. geology and metallogeny.* 2019. No. 77. P. 67–74 (In Russian).
- Makariev L.B., Mironov Yu.B.* Features of metallogeny and prospects for industrial uranium bearing capacity of the Chuya-Tonod mineragenic zone of northern Transbaikalia (based on materials from GK-1000/3 and GDP-200/2) // *Regional Geology and Metallogeny.* 2014. No. 57. P. 87–94 (In Russian).
- Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin M.V., Shchetochkin V.N.* Uranium from Russian subsoil. M.: VIMS, 2010. 850 p. (In Russian).
- Mitrofanova N.N., Boldyrev V.I., Korobeinikov N.K., Mitrofanov G.L.* and others. State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (third generation). Aldano-Zabai-kalskaya series. Sheet O-49 – Kirensk. Explanatory letter. St. Petersburg: Kartfabrika VSEGEI, 2012. 607 p. (In Russian).
- Nicolas A.* Fundamentals of rock deformation. M.: Mir. 1992. 167 p. (In Russian).
- Nikolsky F.V.* Morphology and genesis of folds of the northern margin of the Baikal-Patom Highlands and the Prilensky Plateau. Author's abstract. Ph.D. dis. Irkutsk, 1975. 22 p. (In Russian).
- Paplinski A.* Directional filtering in edge detection. *IEEE Trans. Image Processing* 1998. 7. P. 611–615.
- Petrov V.A., Sim L.A., Nasimov R.M., Shchukin S.I.* Fault tectonics, neotectonic stresses and hidden uranium mineralization in the Streltsovskaya caldera area // *Geology of ore deposits.* 2010. Volume 52. No. 4. P. 310–320 (In Russian).
- Rats M.V., Chernyshev S.N.* Fractures and properties of fractured rocks. M.: Nedra, 1970. 160 p. (In Russian).
- Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V.* From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms. M.: GEOS, 2017. 235 p. (In Russian).
- Riedel W.* Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // *Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol., Abt. B.* 1929. P. 354–368.
- Rowe C.D., Ross C., Swanson M.T., Pollock S., Backeberg N.R., Barshi N.A.* Geometric complexity of earthquake rupture surfaces preserved in pseudotachylyte networks // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2018. № 123. P. 7998–8015.
- Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Travin A.V., Savelyeva V.B., Ostapchuk A.A., Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Yudin D.S.* Determination of P-T conditions during the formation of seismogenic movements along the deep segment of the marginal suture of the Siberian craton // *Dokl. RAS.* 2018. T. 481. No. 4. P. 434–437 (In Russian).
- Seminsky K.Zh.* Internal structure of continental fault zones: tectonophysical aspect. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, Branch “GEO”, 2003. 243 p. (In Russian).
- Sherman S.I.* Seismic process and earthquake forecast: tectonophysical concept. Novosibirsk: Geo, 2014. 359 p. (In Russian).
- Sherman S.I., Borneyakov S.A., Buddo V.Yu.* Areas of dynamic influence of faults (modeling results). Novosibirsk: Science. SO AN USSR, 1983. 110 p. (In Russian).
- Shevyrev S.L.* On new possibilities for large-scale predictive assessment of remote sensing image patterns using the example of the Lower Taiga ore cluster, Primorye // *Ores and Metals.* 2015. No. 2. P. 56–66 (In Russian).
- Shevyrev S.L., Khomich V.G.* Identification of infrastructural elements of ore-magmatic systems of Primorye based on space sensing materials // *Vestnik VSU.* 2013. No. 2. P. 118–128 (In Russian).
- Shmankevich A.Yu., Melnikov I.D.* Report on the results of prospecting geological and geophysical work in the western part of the Tonoda anticlinorium (Northern party of the Meget expedition, 1980–83). 1983. RGF No. 404197 (In Russian).
- Sibson R.H.* Thickness of the seismic slip zone // *BSSA.* 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.
- Sim L.A.* Study of tectonic stresses using geological indicators (methods, results, recommendations) // *Izv. Universities. Geology and exploration.* 1991. No. 10. P. 3–22 (In Russian).
- Sim L.A., Mikhailova A.V., Voitenko V.N.* Strike-slip tectonics of platforms (according to modeling and reconstruction of neotectonic stresses) // *Problems of modern seismology and geodynamics of Central and East Asia.* Irkutsk: Publishing house IZK SB RAS, 2007. T. 2. P. 147–151 (In Russian).
- Sivkov D.V., Chitalin A.F., Dergachev A.L.* Application of lineament analysis to identify patterns of localization of gold mineralization on the territory of the Taryn ore field in the Republic of Sakha (Yakutia) // *Research of the Earth from Space.* 2020. No. 1. P. 3–19 (In Russian).
- Sizykh V.I.* Thrust-thrust tectonics of the margins of ancient platforms. Novosibirsk, 2001. 154 p. (In Russian).

- Smirnov V.I.* Geology of minerals. M.: Nedra. 1976. 688 p. (In Russian).
- Suzen M.L., Toprak V.* Filtering of Satellite Images in Geological Lineament Analyses: An Application to a Fault Zone in Central Turkey. *Int. J. Remote Sens.* 1998. 19. P. 1101–1114.
- Tarasevich Yu.Yu.* Percolation: theory, applications, algorithms: Textbook. M.: Editorial URSS, 2002. 112 p. (In Russian).
- Ustinov S.A., Petrov V.A.* Use of detailed digital relief models for structural-lineament analysis (using the example of the Urtui granite massif, SE Transbaikalia). // *Geoinformatics*. 2016. No. 2. P. 51–60 (In Russian).
- Wilson J.E., Chester J.S., Chester F.M.* Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas System, California. // *J. Struct. Geol.* 2003. №. 25. P. 1855–1873.
- Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L.* Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // *AusIMM Publication Series*. № 4/94. 1994. P. 109–115.