

На правах рукописи



Афонькин Андрей Максимович

**СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ В МАЛО-
БОТУОБИНСКОМ РАЙОНЕ: ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

Специальность 25.00.11 – «Геология, поиски и
разведка твердых полезных ископаемых, минерагения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Красноярск, 2018

Работа выполнена в лаборатории тектонофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЗК СО РАН)

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук,
Гладков Андрей Станиславович

Официальные оппоненты: *Кочнев Анатолий Петрович*
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский
национальный исследовательский технический
университет», кафедра прикладной геологии,
геофизики и информационных систем, профессор

Томшин Михаил Дмитриевич
кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН
Институт геологии алмаза и благородных
металлов СО РАН, лаборатория «Геологический
музей», заведующий

Ведущая организация: Научно-исследовательское геологоразведочное
предприятие (НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный

Защита диссертации состоится «17» апреля 2018 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.099.23 ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте университета: www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан «__» февраля 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бондина Светлана Сергеевна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время перспективы наращивания минерально-сырьевой базы алмазодобывающего комплекса связываются, во-первых, с новыми перспективными районами со сложными условиями поисков, т.е. территориями, где кимберлитовые тела перекрыты более поздними образованиями, а во-вторых, с вероятностью обнаружения в известных кимберлитовых полях рудных тел, обладающих неконтрастными индикаторными характеристиками. В этих условиях резко возрастает значение структурных признаков для прогноза и поиска коренных месторождений алмазов в Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). Несмотря на то, что связь кимберлитового магматизма с зонами глубинных разломов в ЯАП признается практически всеми исследователями, до сих пор остаются неясными основные критерии, определяющие структурный контроль разломной тектоникой кимберлитовых тел на средне- и крупномасштабных уровнях. Причиной подобного положения дел является недостаточная изученность кимберлитоконтролирующих структур – разломов и разломных узлов.

Идеальными объектами для решения многих задач и построения моделей локального структурного контроля являются участки разведанных и разрабатываемых месторождений, вскрытые горными выработками. В их пределах доступными для наблюдений являются не только вмещающие и перекрывающие породы, но и собственно кимберлитовые тела. Специализированные геолого-структурные исследования на таких объектах позволяют охарактеризовать разломные структуры, вмещающие кимберлитовые тела, их внутреннее строение, этапность формирования и активизации, а также получить представление о том, с какими элементами внутренней структуры связаны кимберлитовые тела. Это необходимо, чтобы сформировать образ структурных элементов, потенциально благоприятных для локализации кимберлитовых тел, а также сформулировать поисковые признаки и критерии их выделения.

Цель работы – создание трехмерной схемы разломно-блоковой структуры на участке локализации кимберлитовой трубки «Мир» и изучение условий ее активизации для определения поисковых структурных критериев. На основе выделенных поисковых структурных критериев на территории Мало-Ботуобинского района наметить перспективные участки для локализации кимберлитовых тел.

Задачи исследования:

1. Провести геолого-структурное изучение эталонного месторождения трубка «Мир». Охарактеризовать строение и этапы активизации разломной сети на участке локализации кимберлитового тела.
2. Провести оптическое моделирование активизации разломов на этапе внедрения кимберлитового тела.

3. На основе результатов геолого-структурных работ и оптического моделирования предложить модель строения разломного узла, вмещающего трубку «Мир», как структурного поискового критерия.

4. Провести анализ известных данных о строении разломной сети Мало-Ботуобинского района и на основе предложенного структурного критерия выделить перспективные для локализации кимберлитовых тел разломные узлы.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу диссертационной работы положены материалы, полученные лично автором при проведении в 2013–2014 гг. геолого-структурных работ на коренном месторождении алмазов – трубке «Мир». Для построения схемы разломно-блоковой структуры в пределах трубки было создано и проанализировано 83 точки наблюдений, выполненных автором и сотрудниками лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. Также анализировались результаты документации трещин при проходке горных выработок в окрестностях рудного тела, выполненные геологическим отделом рудника «Мир».

Для экспериментальной проверки геолого-структурных построений автором лично проведены и проанализированы результаты по четырем сериям экспериментов (более 30) на оптически активных материалах, в которых воспроизводилось изменение напряженно-деформированного состояния в пределах модельных аналогов разрывных сетей месторождения трубка «Мир» и Мало-Ботуобинского района.

Для характеристики разломной сети и выделения перспективных объектов на площади Мало-Ботуобинского района автор использовал данные, полученные сотрудниками лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН, геофизического отдела НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), а также опубликованные данные и фондовые отчеты.

Защищаемые положения:

1. Структурой, вмещающей трубку «Мир», является разломный узел, строение которого определяют серии сближенных разрывных нарушений субмеридиональной, северо-западной, северо-восточной и субширотной ориентировки. Дизъюнктивы первых двух направлений играют определяющую роль в локализации рудного тела.

2. На основе геолого-структурных данных и результатов поляризационно-оптического метода моделирования установлено, что формирование структуры, вмещающей кимберлитовую трубку «Мир», происходило в результате активизации в разломном узле сегментов нарушений субмеридионального, северо-западного и северо-восточного направлений под действием поля тектонических напряжений, характеризующегося северо-западным направлением оси сжатия и северо-восточным – растяжения.

3. Использование установленных закономерностей строения разломного узла, вмещающего трубку «Мир», в качестве геолого-структурного критерия и результатов оптического моделирования разломной сети Мало-Ботуобинского района дает основание выделить два участка, наиболее перспективных на обнаружение кимберлитовых тел.

Научная новизна. С помощью методов геолого-структурного анализа на кимберлитовой трубке «Мир» охарактеризовано строение разломного узла, вмещающего рудное тело. Создана трехмерная схема разломно-блокового строения участка локализации трубки «Мир», приуроченная к серии сближенных разрывных нарушений субмеридионального, северо-западного, северо-восточного и субширотного направлений, а также реконструированы поля тектонических напряжений и предложена модель активизации рудовмещающих структур на этапе внедрения кимберлитовой трубки.

Практическая значимость. Построенная объемная схема разрывной сети участка локализации кимберлитовой трубки «Мир» используется компанией АК «АЛРОСА» (ПАО) для проектирования и развития сети горных выработок рудника «Мир», а также для разработки мероприятий по обеспечению безопасного проведения горных работ.

На основе выполненных построений подготовлены практические рекомендации для Ботуобинской геологоразведочной экспедиции АК «АЛРОСА» (ПАО) по использованию структурного критерия в практике геолого-поисковых и геолого-разведочных работ. На основе полевых данных и результатов поляризационно-оптического моделирования выделены участки, перспективные на обнаружение кимберлитовых тел, рекомендуемые для первоочередного опоскования.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы были представлены в виде докладов на XXV Всероссийской молодежной конференции «**Строение литосферы и геодинамика**», посвященной 110-летию со дня рождения А.А. Трескова (2013 г., г. Иркутск), на IV Всероссийской научно-практической конференции «**Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии**», посвященной 40-летию Геологического института СО РАН (2013 г., г. Улан-Удэ), на XXVI Всероссийской молодежной конференции «**Строение литосферы и геодинамика**», посвященной 85-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева (2015 г., г. Иркутск).

Основные положения диссертационной работы представлены в 5 публикациях, из них 2 – в журналах, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы – 108 страниц, включающих 50 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 85 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю кандидату геолого-минералогических наук, старшему научному сотруднику ИЗК СО РАН А.С. Гладкову за постановку темы, за проведение полевых исследований и предоставление полевых материалов, за проявление постоянного внимания и поддержку на всех этапах подготовки диссертационной работы. Искреннюю признательность автор выражает канд. геол.-мин. наук А.В. Черемных и канд. геол.-мин. наук А.И. Мирошниченко за помощь в освоении поляризационно-оптического метода и обсуждение полученных результатов.

Также автор признателен всем сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН за поддержку, советы и консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Теоретический анализ данных предыдущих исследователей

В данной главе приводится краткая история исследования Якутской алмазоносной провинции в целом и расположенного в ее пределах Мало-Ботуобинского района, начиная со второй половины XX века. Отмечено, что с момента обнаружения первых алмазов на Сибирской платформе на протяжении нескольких десятков лет проводятся непрерывные геологические и геофизические работы, в результате которых открыты несколько десятков месторождений алмазов. По геолого-тектоническому строению площади накоплен огромный фактический материал. Однако до сих пор нет однозначного ответа на вопрос о роли разломов в локализации кимберлитовых тел, что не позволяет в полной мере решить задачу по выявлению факторов структурного контроля.

Рассматриваются мнения различных авторов относительно закономерностей размещения кимберлитовых трубок и их связи с тектоническими структурами [Арсеньев, 1961, 1963; Милашев, 1984, 1997; Дукарт, Борис, 2000; Сарсадских, 1973; Серокуров, 1995, 2001; Биланенко и др., 1976; Ваганов, 2000; Брахфогель, 1984; Гусев, 1982; Владимиров и др., 1989; Мокшанцев и др., 1974, 1976; Харьков и др., 1998; Гладков и др., 2008; Биезайс и др., 2001; Борис, Францессон, 1992].

Большинство из перечисленных авторов разделяют представления о том, что разрывные нарушения играют определяющую роль в локализации магматогенных месторождений полезных ископаемых [Белоусов, 1952; Крейтер, 1961; Вольфсон, Яковлев, 1975] и, в том числе, контролируют размещение кимберлитовых тел. Однако относительно пространственного положения, ориентировок и строения кимберлитоконтролирующих разломов на Сибирской платформе, а также времени их заложения и развития единого мнения не существует.

Также отмечено, что ряд исследователей [Милашев, 1979, 1984, 1997] считают, что кимберлитовые поля связаны с блоками повышенной проницаемости земной коры, которые маркируются на дневной поверхности участками изотропной трещиноватости. Другие к структурным факторам локализации кимберлитовых полей относят элементы пликативной тектоники [Мокшанцев и др., 1974, 1976], которые контролируются глубинными разломами, что и определяет закономерности пространственного размещения кимберлитовых полей. Также существует точка зрения о том, что кимберлитовые поля приурочены к авлакогенам и палеорифтам [Сарсадских, 1973; Масайтис и др., 1975; Францессон, 1986; Малич и др., 1989; Горев, 1998; Эринчек и др., 1998; Дукарт, 2000; Зинчук и др., 2004]. Некоторые авторы связывают проявления кимберлитового магматизма с кольцевыми структурами [Серокуров, Калмыков, Зуев, 2001; Серокуров, 1995]. И наконец, по мнению Арсеньева [1961, 1963], кимберлитовые поля приурочены к северо-восточным разломным зонам, а также участкам их пересечения с зонами северо-западного направления.

По поводу структурного контроля кимберлитовых тел на территории Мало-Ботуобинского района также имеется ряд мнений, подчас диаметрально противоположных. Одни исследователи [Шукин и др., 1972; Молчанов, Саврасов, 1985; Варламов, 1989] утверждают, что глубинные разломы Вилуйско-Мархинской зоны субмеридионального простирания являются магмоподводящими, а роль вмещающих структур принадлежит оперяющим трещинам северо-западного простирания. Другая группа авторов [Бабаян и др., 1976] считает рудовмещающими структурами узлы пересечения субмеридиональных разломов Вилуйско-Мархинской зоны с субширотной Джункун-Хампинской (Мирнинской) зоной или с Угукутской рифтоподобной структурой северо-восточного простирания. Третьи [Биезайс, 2002] полагают, что структурный контроль определяется наличием глубинных разломов северо-западного простирания, в узлах пересечения которых с разломами Вилуйско-Мархинской зоны локализована большая часть известных кимберлитовых тел.

Согласно проанализированным литературным [Владимиров и др., 1981; Харьков и др., 1998] и фондовым [Сафьянников, Судаков, 1981; Борис и др., 1985; Тирский и др., 1989, 1990, 1993; Ивашин и др., 1993] материалам, основным элементом разломной структуры, контролирующей трубку «Мир», является Параллельный разлом субмеридионального простирания. Данный разлом является элементом крупной Вилуйско-Мархинской зоне, представленной серией сближенных субпараллельных разломов.

Тектоническое строение участка локализации трубки «Мир» определяют разрывные нарушения север-северо-восточного (аз. прост. 10–30°) и северо-западного (аз. прост. 310–320°) направлений. Однако относительно других элементов разрывной сети месторождения существуют различные мнения. Ряд исследователей предполагают наличие субвертикальных разрывов субширотного (аз. прост. 75–85°) [Ивашин и др., 1993; Тирский и др., 1993] простирания; другие [Шеремеев, 1993; Борис, Францессон, 1992] – наличие северо-восточных (аз. прост. 50–60°) нарушений. И, наконец, третьи [Владимиров и др., 1981] дополняют структурный план дизъюнктивами запад-северо-западного (аз. прост. 280°) направления.

Неоднозначная трактовка разрывной сети месторождения привела к тому, что разработанные модели структурного контроля кимберлитовой трубки также существенно различаются. Ряд авторов связывает становление кимберлитовой трубки с общим проявлением процессов растяжения в направлении, перпендикулярном к зоне Параллельного разлома, и их усилением на участках пересечения субмеридиональных и северо-западных нарушений [Борис, Францессон, 1992; Ивашин, 1993; Харьков, Зинчук, Крючков, 1998 и др.]. Другие [Тирский и др., 1993; Гладков и др., 2008 и др.] предполагают, что внедрение кимберлитовой трубки приурочено к локальным структурам растяжения, возникающим в результате сдвиговых перемещений по сместителям Параллельного разлома.

В целом, можно констатировать, что имеющаяся информация базируется главным образом на геофизических и геоморфологических данных и не позволяет судить об особенностях строения разломных зон в верхних частях платформенного чехла, динамике их развития и активизации на различных этапах (включая этап становления кимберлитовых тел) эволюции земной коры. В связи с этим основной целью наших работ стало проведение комплекса тектонофизических исследований разломной тектоники для оценки структурных факторов локализации кимберлитовых тел в пределах Мало-Ботуобинского кимберлитового района Якутской алмазоносной провинции.

Глава 2. Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись полевые и экспериментальные тектонофизические методы, а также методы структурного дешифрирования топографических материалов. Первые из них представлены комплексом методических разработок и приемов, направленных на полевое изучение зон разломов, картирование основных элементов их внутреннего строения и восстановление полей тектонических напряжений. Вторая группа методов (экспериментальная) используется для изучения специфики перераспределения поля напряжения в окрестностях разрывов. И наконец, структурное дешифрирование было направлено на уточнение строения разломной сети путем выделения линеаментов, соответствующих разрывным нарушениям, которые в силу объективных причин неудовлетворительно картируются методами геофизики.

Полевые наблюдения проводились путем создания сети точек наблюдений, в пределах которых выполнялся комплекс однотипных тектонофизических и структурно-геологических измерений. Требования к организации сети точек и порядок проведения на них наблюдений изложены в монографиях [*Семинский и др., 2005; Гладков и др., 2008*]. Они включают в себя привязку точки на плане, определение основных систем трещин, измерение элементов их залегания и документацию взаимоотношения трещин друг с другом, а также изучение локальных разрывных нарушений, если таковые присутствовали в обнажении, и других структурных элементов, таких как складки, будины, линейность и т.д. В точках, где хорошо проявлена трещинная сеть и имеются условия для безопасного проведения работ, дополнительно производился массовый замер элементов залегания трещин, в процессе которого фиксировались их генетические разновидности (сколовая или отрывная). В зависимости от конкретной ситуации количество трещин в замере варьировалось от 30 до 100. При наличии поверхностей скольжения также фиксировалась ориентировка и, по возможности, направление следов перемещения (штрихи и борозды).

Особое внимание уделялось определению ряда количественных характеристик тектонической трещиноватости. Для этого выполнялся подсчет количества трещин на 1 м^2 , а также оценивалось среднее расстояние между разрывами соизмеримой длины для каждой из систем трещин, выделенных в точке наблюдения. В случае наличия трещин со смещениями фиксировались их

основные параметры (длина, зияние, амплитуда смещения и другие характеристики).

При последующем анализе собранных полевых данных, наряду с классическими методами восстановления полей тектонических напряжений, использовались элементы новейших методических разработок и, в частности, метод спецкартирования [Семинский, 2003], анализ хаотических трещинных сетей [Семинский и др., 2005], а также модифицированный метод поясов [Гладков, Семинский, 1999].

Экспериментальные исследования были выполнены поляризационно-оптическим методом, традиционно используемым для изучения особенностей перераспределения поля напряжений в окрестностях разрывов. Применение в качестве модельного материала упругого желатинового студня позволяет воспроизводить в моделях мгновенные поля напряжений и деформаций. Основной особенностью метода является специфика напряженного состояния, когда главные нормальные напряжения лежат в горизонтальной плоскости модели, что согласуется с доминирующим соотношением величин напряжений в районе исследования, где преобладает обстановка сдвига [Осокина, 1963].

Для выполнения экспериментов использовалась установка для моделирования, состоящая из полярископа-поляриметра ПКС-250 и деформационного стола, позволяющего прикладывать к моделям различные виды нагрузки. После изготовления и проведения градуировки на модель переносилась схема эксперимента, путем нарезания сети наиболее крупных разрывов, рассекающих всю толщу вмещающих пород. Все разрывы наносились в виде вертикальных прорезей на всю толщину модели со смазкой их поверхностей водой, что продиктовано особенностями метода. В ходе эксперимента картина распределения в моделях цветов (изохромы и изоклины), необходимая для изучения напряженного состояния, фиксировалась фотоаппаратом для последующей обработки полученных результатов. Метод имеет определенные ограничения, не позволяющие воспроизводить горизонтальные и/или наклонные разрывы в модели, так как реализовывалось плоское напряженное состояние [Александров, Ахмедзянов, 1973]. Но для изучения субвертикальных разрывных нарушений и выявления участков локальных структур растяжений его вполне достаточно.

Методы структурного дешифрирования представляют собой комплекс приемов, направленных на выявление и характеристику линеаментов земной коры, которые могут быть интерпретированы как разрывные нарушения. Исходными материалами для линеаментного анализа послужили топографические карты масштаба 1:100000 и 1:200000. На анализируемых материалах распознавались линейные ландшафтные особенности местности (линеаменты), которые интерпретировались как тектонические нарушения. Выделение линеаментов, соответствующих разрывам различного ранга, производилось на основе геоморфологических и комплексных признаков [Методическое руководство ..., 1978]. Полученные результаты не противоречат

мелкомасштабным данным дистанционного зондирования [Серокуров, 1995, 2001].

Глава 3. Результаты изучения структурного контроля месторождения трубки «Мир»

Обзор предшествующих работ показал, что в существующих представлениях о строении разрывной сети участка локализации кимберлитового тела больше вопросов, нежели ответов, в силу чего они малопригодны для решения задач, поставленных в настоящей работе. Необходимо изучение разрывных нарушений с помощью современных методик и создание объемной геолого-структурной схемы изучаемого участка. Для этого в 2013–2014 гг. были проведены работы по геолого-структурному картированию разрывных нарушений в пределах месторождения трубки «Мир».

В процессе полевых исследований в пределах нескольких горизонтов рудника «Мир» (в отметках от –210 до –310 абс. м.) было создано 83 точки специализированных геолого-структурных наблюдений, в которых было измерено и охарактеризовано более 1200 тектонических трещин и зон разрывных нарушений локального ранга. При этом условия наблюдений несколько различались в зависимости от состава изучаемых отложений. В отличие от терригенно-карбонатных отложений и долеритов, где фиксировались дизъюнктивы различных масштабов, в солевых толщах для наблюдений были доступны только наиболее крупные трещины и зоны тектонических нарушений мощностью от первых до десятков сантиметров, поскольку более мелкие разрывы в соли ввиду высокой пластичности и текучести материала быстро залечиваются и не видны. Отсутствие мелких трещин в соли, с одной стороны, не позволило реализовать отдельные методические приемы, основанные на данных о строении и параметрах трещинной сети в пределах горного массива, но с другой – дало возможность более полно охарактеризовать закономерности проявления локальных разрывных нарушений, которые являются элементами строения более крупных разломных зон.

В ходе дальнейшего анализа фактического материала были последовательно рассмотрены особенности строения сети разрывных нарушений, а также тектонической трещиноватости в горном массиве рудника «Мир». Установлено, что основную роль в тектоническом строении месторождения играют субвертикальные (углы падения 60° и более) и субгоризонтальные (углы падения менее 30°) тектонические трещины и разрывные нарушения различной мощности.

Среди субвертикальных нарушений (рис. 1, а) преобладают дизъюнктивы северо-западного (аз. прост. $320\text{--}340^\circ$ и $290\text{--}310^\circ$), субмеридионального (аз. прост. $350\text{--}20^\circ$) и северо-восточного (аз. прост. $30\text{--}60^\circ$) простирания. Нарушения восток-северо-восточной и широтной ориентировки (аз. прост. $70\text{--}90^\circ$) встречались реже. Анализ особенностей распределения выходов субвертикальных разрывных нарушений на разных горизонтах рудника позволили выделить нескольких фрагментов разломных зон. Это, прежде всего, разломы северо-

западного простирания, вдоль которых ориентирована длинная ось кимберлитового тела. Зоны северо-восточной ориентировки зафиксированы у северо-западного окончания трубки. И наконец, один из фрагментов субмеридиональных разломов, трассируется дайкой долеритов на западном фланге месторождения, а другой расположен на востоке у юго-восточного окончания рудного тела.

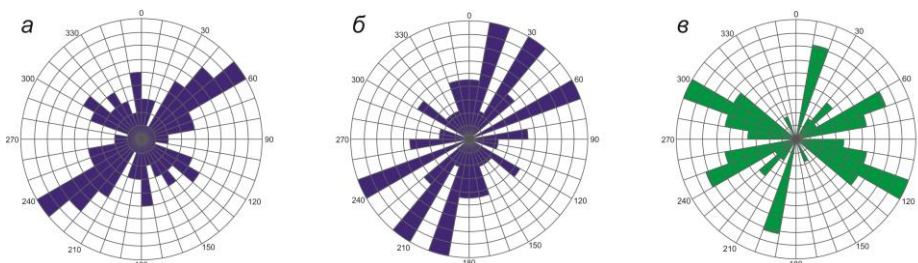


Рис. 1. Роза-диаграммы основных направлений распределения субвертикальных разрывных (а) нарушений и систем трещин с максимальными (б) и вторыми по величине значениями (в) густоты (количество трещин на 1 пог. м.) задокументированных в точках наблюдения на руднике «Мир».

Субгоризонтальные разрывные нарушения представлены преимущественно зонками расланцевания и межслоевого скольжения мощностью от первых сантиметров до первых десятков сантиметров. Реже их мощность достигает первых метров (как правило, на участках взаимодействия с субвертикальными разрывными нарушениями). Данные разрывы в моменты формирования и активизации разрывной сети месторождения обеспечивали при межслоевых смещениях переход смещений с одного уровня (горизонта) на другой [Семинский и др., 2005].

Для выделения сегментов разломных зон также использовались данные, полученные при изучении тектонической трещиноватости. При этом были использованы как наши собственные измерения (основных систем трещин и массовых замеров), так и результаты документации трещин в процессе проходки горных выработок геологами рудника «Мир».

При обработке массовых замеров использовалась методика анализа пространственного распределения в пределах изучаемой площади структурных парагенезисов, состоящих из трех примерно перпендикулярных друг другу систем тектонических трещин. Подобные парагенезисы, как известно, образуют основу трещинных сетей вблизи разломов разного типа и ранга [Семинский и др., 2005; Гладков и др., 2008]. Всего в подземных выработках изучаемого месторождения удалось сделать 16 массовых замеров. На каждой структурной диаграмме были выделены тройки взаимно перпендикулярных систем трещин (отклонения от прямого угла при переборе отдельных максимумов – менее 10°). По интенсивности максимумов в каждой из троек определялось положение главной, второстепенной и дополнительной системы разрывов. Первая из них свидетельствует о том, что точка наблюдения расположена в непосредственной близости от зоны разлома с соответствующими ей элементами залегания.

Также в каждой из точек геолого-структурных наблюдений анализировались две системы крутопадающих разрывов, характеризующихся наибольшими значениями параметра густоты (количество трещин на 1 пог. м.). Подобный подход определялся тем, что именно густота системы трещин является показателем наличия разломной зоны [Шерман, 1977]. Роза-диаграммы простираний систем трещин приведены на рис. 1, б, в. Так же, как и для разрывных нарушений (рис. 1, а), на диаграммах трещинных систем (рис. 1, б, в) заметно преобладание разрывов северо-западного, субмеридионального и северо-восточного простирания. Кроме того, на диаграмме простираний трещинных систем с максимальными значениями густоты проявлен максимум субширотной ориентировки (рис. 1, б). По результатам предварительного анализа расположения и ориентировки в пространстве систем трещин, характеризующихся максимальными и вторыми по значению параметрами густоты, были намечены оси предполагаемых разломов субмеридионального, северо-западного и северо-восточного простирания.

Собранные данные легли в основу схемы субвертикальных разломов участка локализации трубки «Мир». Объектами картирования и прослеживания были осевые плоскости разломов. Прямым признаком для проведения плоскости разлома служило выстраивание зафиксированных выходов нарушений одного направления вдоль одной линии на плане или на разрезе. Дополнительными признаками, свидетельствующими о близости или наличии разломной зоны, являлись: 1) существенно более высокая густота одной из систем трещин (по сравнению с другими) в точке наблюдения, 2) наличие интенсивного максимума, соответствующего элементам залегания трассируемой структуры, 3) серия субпараллельных трещин одного направления, прослеживающаяся по простиранию в различных выработках, 4) изменение ориентировки наклонных и пологих трещин, наблюдающееся по простиранию в разных горных выработках.

Результаты выполненных построений (рис. 2) свидетельствуют о том, что тектоническое строение участка локализации трубки «Мир» определяют субвертикальные разломы северо-западного, субмеридионального, северо-восточного, а также субширотного направлений. В большинстве своем данные разломы представляют собой зоны повышенной трещиноватости, реже дробления, мощность которых колеблется по разрезу от десятков сантиметров до десятков метров.

Для восстановления положения осей главных нормальных напряжений использовались методы М.В. Гзовского [Гзовский, 1975], В.Н. Даниловича [Данилович, 1961; Гладков, Семинский, 1999] и П.Н. Николаева [Николаев, 1977]. С помощью последних двух на диаграммах массовых замеров были выделены сопряженные системы трещин, и на основе полученных результатов проводился анализ формы максимумов и направлений разбросов. Положения осей главных нормальных напряжений устанавливались по методике, изложенной в монографии М.В. Гзовского [Гзовский, 1975]. Всего было получено сорок решений в 16 точках наблюдения, 19 из которых соответствуют сдвиговому типу подвижек по сопряженным системам, 11 – взбросовому и 10 – сбросовому.

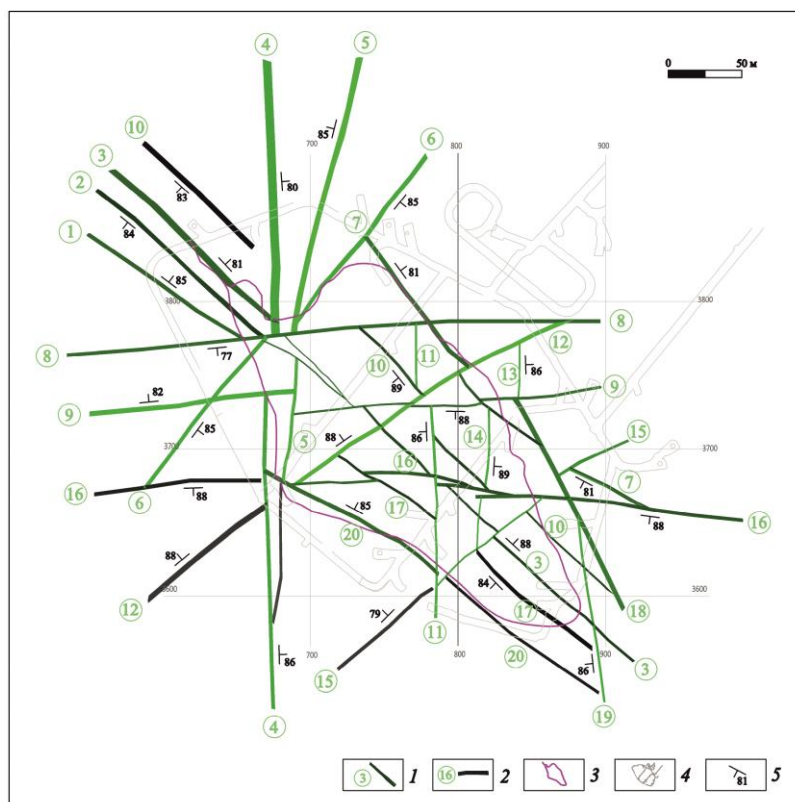


Рис. 2. Схема разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Мир» (вид сверху).

1 – разломы (и их номера), установленные на основании признаков, перечисленных в тексте; 2 – разломы предполагаемые и их номера; 3 – контур рудного тела на гор. – 210 абс. м; 4 – горные выработки на гор. – 210 абс. м.; 5 – направление и угол падения разлома

Сводные роза-диаграммы простираний субгоризонтальных осей сжатия и растяжения для всей совокупности полученных реконструкций полей тектонических напряжений (рис. 3) дают основание предположить, что формирование и активизация разрывной сети изученных участков происходили в течение как минимум пяти этапов проявления разноориентированных полей тектонических напряжений сдвигового типа.

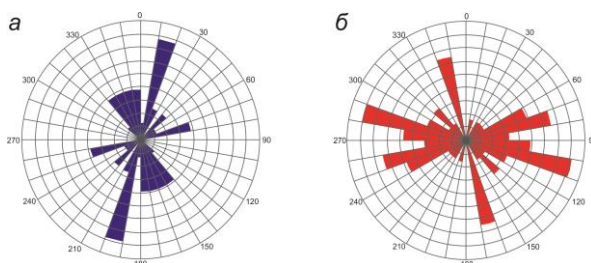


Рис. 3. Синоптические роза-диаграммы для осей растяжения (а) и сжатия (б).

Были рассмотрены особенности проявления сопряженных систем трещин, в породах различного состава, а также разрывных нарушений со следами перемещения в соляных толщах, которые использовались для восстановления положения осей главных нормальных напряжений. Выполненные построения вкпе с известными данными [Гладков и др., 2008] дают основание наметить последовательность проявления полей тектонических напряжений (от более древних – к более молодым):

- 1) северо-восточное сжатие – северо-западное растяжение;
- 2) северо-западное сжатие – северо-восточное растяжение;
- 3) восток-северо-восточное сжатие – север-северо-западное растяжение;

- 4) север-северо-западное сжатие – восток-северо-восточное растяжение;
- 5) запад-северо-западное сжатие – север-северо-восточное растяжение.

Приведенный анализ по относительной интенсивности максимумов на диаграммах трещиноватости отражает кимберлитовый и посткимберлитовый этап развития разрывной сети на участке локализации трубки «Мир». На докимберлитовом этапе можно предположить существование оси растяжения субширотного направления, которое подтверждается наличием дайки долеритов субмеридионального простирания.

Внедрение кимберлитовых тел вслед за А.С. Гладковым [Гладков и др., 2008] мы связываем со вторым этапом (СЗ сжатие – СВ растяжение). Исходя из приведенных особенностей строения разломной сети месторождения, была предложена структурная модель, связывающая внедрение кимберлитов с возникновением структуры локального растяжения в результате взаимодействия разрывных нарушений север-северо-восточного (субмеридионального) простирания и формирующихся или активизирующихся разрывов северо-западной ориентировки (рис. 4). Для проверки и уточнения предложенной модели были выполнены эксперименты на оптически активных материалах.

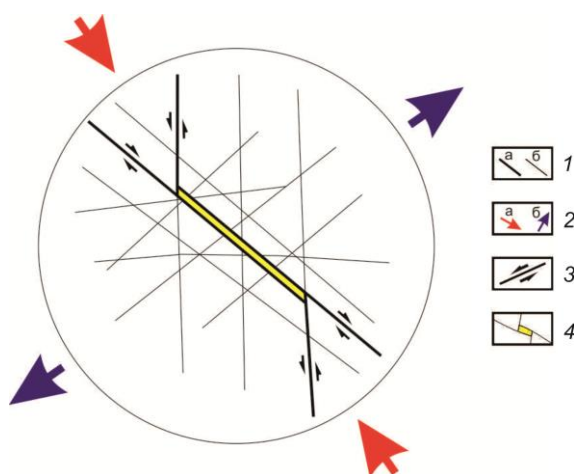


Рис. 4. Структурная модель формирования структуры локального растяжения, вмещающей кимберлитовую трубку «Мир». 1 – разрывы основные (а) и второстепенные (б); 2 – ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 – сдвиговые перемещения блоков модели; 4 – структура локального растяжения

Проведено три серии экспериментов поляризационно-оптическим методом, в которых воспроизводились структурные ситуации, отражающие реальные сочетания различно ориентированных разрывов Мирнинского кимберлитового поля на участках локализации трубки «Мир» и более мелких кимберлитовых тел (по данным других авторов).

В первой серии экспериментов моделировалась структурная картина, характерная для большинства трубок Мало-Ботуобинского района. Проведено три эксперимента, в двух из которых анализировалось взаимодействие пары разрывов (северо-западного и субмеридионального простирания). Третий отражал взаимосвязь трех разрывов (северо-западной, субмеридиональной и субширотной ориентировок). Во всех экспериментах граничные условия воздействия на модель воспроизводили сдвиговое поле напряжений с северо-западным сжатием (310° , 320°).

Полученные результаты во многом объясняют известные особенности структурного положения большинства небольших кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района [Ваганов и др., 1995]: трубок «Таежная», «Амакинская», «Дачная», «Интернациональная» и жилы 21. Практически все они расположены в зонах нарушений северо-западной ориентировки на некотором удалении от узлов пересечения последних с разломами субмеридионального направления. Удаление от точек пересечения разломных линий объясняется тем, что под зоной сочленения разломов (разломный узел) понимается не только точка пересечения сместителей разломов, но и часть окружающего ее пространства, в пределах которого в результате взаимодействия разломов проявляются различные геолого-структурные процессы, а также изменение напряженного состояния [Шерман и др., 1986; Мирошниченко, 1989]. Согласно результатам моделирования, именно к этим участкам приурочены структуры локального растяжения, которые являются наиболее благоприятными для внедрения кимберлитовых тел.

Вторая серия экспериментов была посвящена рассмотрению разломно-блокового строения месторождения трубка «Мир» по компилятивным данным из отчета Г.А. Тирского [Тирский и др., 1993], а также результатам визуального обследования карьера в период 2005–2014 гг. и обработки массовых замеров трещин, выполненных в 2003 г. на верхних горизонтах карьера. В экспериментах воспроизводились различные комбинации сочетаний нарушений север-северо-восточного, северо-западного, север-северо-западного и восток-северо-восточного направлений.

Неоднородности в виде разрывов добавлялись в модель поэтапно, что позволило исследовать напряженно-деформированное состояние как в окрестностях относительно простых узлов сочленения разломов, так и в более сложной разломно-блоковой структуре.

Ориентировка оси сжатия в экспериментах варьировалась от субширотной – 265° до север-северо-западной – 330° . Моделирование показало, что благоприятные для локализации трубки структурные условия характерны при активизации разломов (либо их сегментов) в сдвиговом поле напряжений с ориентировкой оси сжатия в интервале $\sim 290\text{--}310^\circ$ (ось растяжения $\sim 20\text{--}40^\circ$). При субширотной ориентировке оси сжатия, а также когда данная ось находится в интервале $311\text{--}330^\circ$, локальных структур растяжения в центральных сегментах разломов на участке локализации трубки не наблюдается.

В целом, проведенные эксперименты показали, что раскрытие сегментов северо-западного разлома, вмещающего трубку «Мир», происходит только в условиях, когда оси сжатия ориентированы в северо-западном или запад-северо-западном направлении. При этом форма и размеры таких сегментов зависят от количества и направлений разрывов, образующих разломный узел.

Добавление в модели, воспроизводившие деформации разломного узла под действием северо-западного сжатия и северо-восточного растяжения, той или иной комбинации разрывов других направлений, которые могут соответствовать следующим этапам становления трубки «Мир», также приводит к возникновению

локальных участков растяжения, но их размеры заметно меньше. Примерное расположение данных участков в пределах контуров трубки, нанесенных на модель, удовлетворительно коррелирует с известными данными [Владимиров и др., 1981] по распределению различных магматических фаз кимберлитов в окрестности трубки «Мир» (рис. 5).

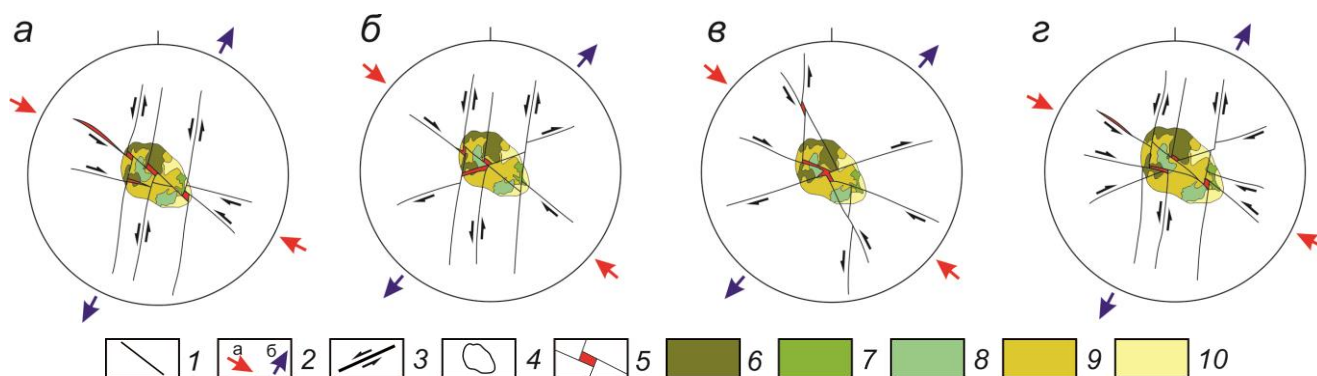


Рис. 5. Сводные результаты различных экспериментов по моделированию напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир», в условиях северо-западного сжатия, северо-восточного растяжения.

1 – разрывы; 2 – ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 – сдвиговые перемещения блоков модели; 4 – контур кимберлитовой трубки; 5 – структура локального растяжения; 6-10 – фазы кимберлитов по А.И. Боткунову [1964]

По соотношению структур локального растяжения, полученных в экспериментах, и положению магматических фаз кимберлитов в контуре рудного тела [Владимиров и др., 1981] можно условно предположить, что рассмотренные комбинации разрывов могли иметь следующую последовательность активизации:

I – серия разрывов север-северо-восточной ориентировки совместно с дизъюнктивами северо-западного и запад-северо-западного направлений (рис. 5, а);

II – серия разрывов север-северо-восточной ориентировки совместно с дизъюнктивами северо-западного, северо-восточного и запад-северо-западного направлений (рис. 5, г);

III – серия разрывов север-северо-восточной ориентировки совместно с дизъюнктивами северо-западного и северо-восточного направлений (рис. 5, б);

IV – два сегмента разрывов север-северо-восточной ориентировки совместно с дизъюнктивами северо-западного, северо-восточного и запад-северо-западного направлений (рис. 5, в).

И наконец, в третьей серии экспериментов было проведено моделирование разломно-блоковой схемы, полученной при детальном изучении тектонических трещин и зон разрывных нарушений в пределах подземного рудника «Мир». Всего было выполнено три эксперимента. Поскольку в предыдущих опытах было установлено, что наиболее благоприятные для внедрения кимберлитового материала структуры растяжения образуются под действием северо-западного сжатия, ориентировки оси сжатия в экспериментах третьей серии варьировались от северо-западной (310° , 325°) до север-северо-западной (340°).

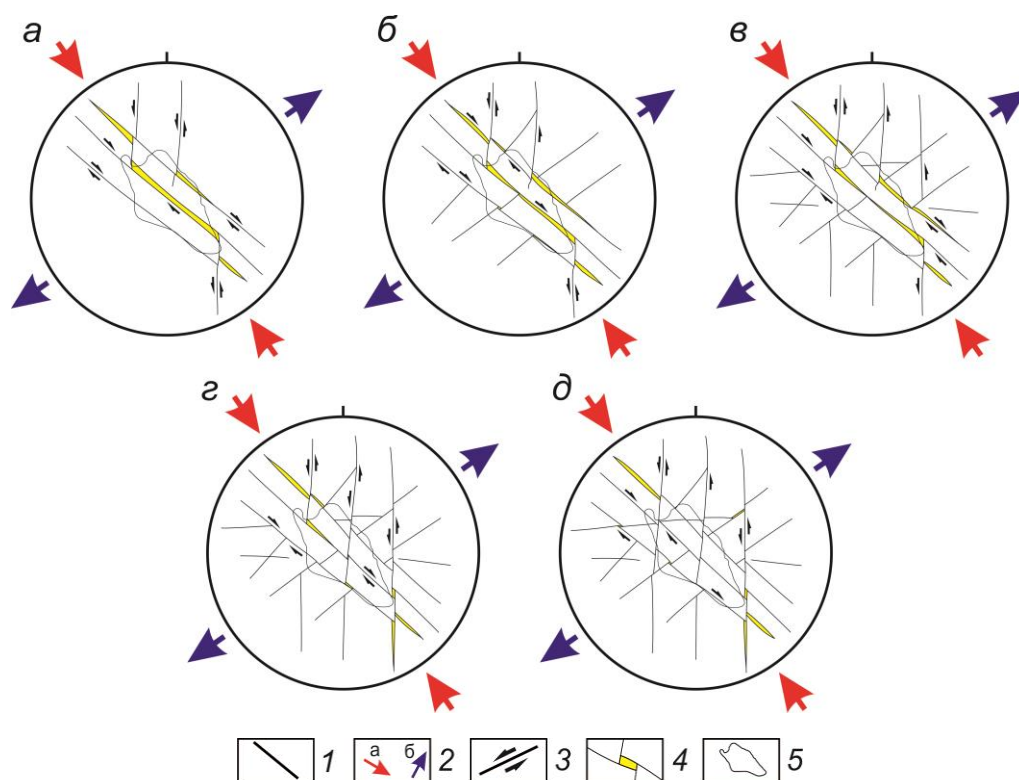


Рис. 6. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего кимберлитовую трубку «Мир» при сжатии 325° , растяжении 55° . *a-d* – этапность активизации разломного узла. 1 – разрывы; 2 – ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 – сдвиговые перемещения блоков модели; 4 – структура локального растяжения; 5 – контур кимберлитовой трубки

Анализ полученных в третьей серии экспериментов результатов показывает, что максимально благоприятные структурные ситуации для локализации кимберлитового тела (при действии сил сжатия в северо-западном или север-северо-западном направлении) возникают в результате взаимодействия разрывов северо-западного, субмеридионального и северо-восточного направлений (или их комбинаций). Добавление на модели субширотных нарушений практически сразу приводило к изменению напряженно-деформированного состояния и закрытию сегментов разрывов в пределах контура будущей кимберлитовой трубки (рис. 6).

Таким образом, можно констатировать, что результаты моделирования полностью подтверждают предположение о том, что формирование структуры разломного узла, вмещающего кимберлитовую трубку «Мир», определяется взаимодействием сегментов разрывных нарушений субмеридионального и северо-западного простирания. При этом, наряду с указанными нарушениями, в образовании дислокаций, благоприятных для локализации кимберлитового тела, также могли участвовать разрывы северо-восточного простирания, в то время как субширотные нарушения являются элементами, препятствующими формированию подобных структур.

Исходя из предположения, что разломы, образующие рудовмещающий узел, существовали до внедрения кимберлитового тела, основной вывод по данному разделу можно сформулировать следующим образом: формирование структур

благоприятных для становления кимберлитовой трубки «Мир» происходило в результате избирательной активизации в разломном узле сегментов нарушений субмеридионального, северо-западного и северо-восточного направлений под действием поля тектонических напряжений, характеризующегося северо-западным направлением оси сжатия и северо-восточным – растяжения.

Глава 4. Особенности локального структурного контроля кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района

Ранее при проведении тектонофизических исследований на площади Мало-Ботуобинского района было создано 78 точек наблюдения, в пределах которых охарактеризовано более 6000 разноранговых разрывных нарушений и тектонических трещин [Гладков и др., 2008]. Основными объектами изучения служили наиболее достоверно установленные по геофизическим данным разломы Вилуйско-Мархинской зоны: Западный, Параллельный, Центральный, Восточный и Аппаинский. Было установлено, что определяющую роль в тектоническом строении осадочного чехла играют субвертикальные и субгоризонтальные разрывные нарушения. Первые, как правило, представлены зонами повышенной трещиноватости, грубого рассланцевания и дробления пород мощностью от первых метров до десятков, редко – сотен метров. По своей пространственной ориентации наиболее многочисленными являются зоны север-северо-восточного (субмеридионального) простирания. Меньшую распространенность имеют зоны северо-западной, северо-восточной и близширотной ориентировки, с тенденцией разделения последних на восток-северо-восточные и запад-северо-западные.

Итогом работ тех лет стала модельная схема, предполагающая развитие разломной сети Мало-Ботуобинского района в течение трех этапов сдвиговых движений, которые различались направлением действующих сил. Внедрение кимберлитов связывалось с формированием в начале второго этапа присдвиговых структур растяжения (дуплексов и пулл-апарт структур) в результате взаимодействия активизирующихся разрывных нарушений север-северо-восточного простирания и формирующихся разрывов северо-западной и запад-северо-западной ориентировки [Гладков и др., 2008].

Результаты тектонофизических исследований, проведенных на эталонном объекте – месторождении трубка «Мир», и моделирования разломной сети показывают, что формирование структур локального растяжения, с которыми ассоциируются кимберлитовые тела, действительно происходит в результате сдвиговых смещений под действием поля тектонических напряжений, характерного для второго этапа развития/активизации разрывной сети района. Однако механизм их образования несколько сложнее, чем предполагалось в 2004 г., и обусловлен он процессами активизации и взаимодействием разломов различных направлений в пределах сложнопостроенного разломного узла.

На основе полученных данных были сформулированы структурные критерии для выделения участков, перспективных на обнаружение кимберлитового тела типа трубки «Мир», – узловых сочленений разломных зон

север-северо-восточного (серия сближенных нарушений), северо-западного, северо-восточного и субширотного простирания. Далее была проведена повторная оценка центральной части Мало-Ботуобинского района на предмет наличия структурных элементов, по своему строению благоприятных для потенциальной локализации кимберлитового тела типа трубки «Мир».

Для анализа использовалась схема разломной тектоники, составленная А.В. Матросовым [Матросов, 2006] по данным магниторазведочных и сейсморазведочных работ. Результаты, полученные при изучении эталонного объекта – месторождения трубка «Мир» – показали, что для корректной оценки участков, потенциальных на обнаружение кимберлитовых тел с точки зрения геолого-структурных факторов, необходима максимально полная информация о строении разрывной сети изучаемого района, поэтому схема А.В. Матросова была дополнена линеаменами, выделенными автором в результате структурного дешифрирования топографических карт масштаба 1:100 000 (листы Р49, номера 47, 48, 59 и 60, а также серии Р50, номера 49, 50) и 1:200 000 (листы серии Р49, номера XI, XII, XVII, XVIII и серии Р50, номера VII, VIII, XIII, XIV).

При проведении анализа были рассмотрены взаимоотношения разноранговых разрывных структур в пределах центральной части Мало-Ботуобинского района. Обязательным условием для отнесения разломного узла к перспективной структуре являлось наличие в его строении протяженной зоны север-северо-восточного (субмеридионального) направления, а также зон северо-западной (примерным простиранием 310°) и северо-восточной ориентировок. Подобным условиям отвечают девять участков (рис. 7).

Для экспериментальной проверки выполненных построений было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния разломной сети центральной части Мало-Ботуобинского района при различных направлениях действия тектонического сжатия поляризационно-оптическим методом.

Всего проведено 19 экспериментов, отличающихся граничными условиями нагружения модели. Из них только в семи фиксируются локальные структуры растяжения в районе локализации известных кимберлитовых трубок. В этих семи экспериментах на границах моделей были заданы силовые воздействия, соответствующие: 1) север-северо-западному сжатию – восток-северо-восточному растяжению; 2) субмеридиональному сжатию – субширотному растяжению; 3) северо-восточному сжатию – северо-западному растяжению.

Моделированию подвергались субмеридиональные, северо-западные и север-северо-западные разломы для выяснения их взаимоотношений друг с другом. Разломы северо-восточного направления не наносились, так как картина становилась очень сложной.

В первом эксперименте при север-северо-западном сжатии (ось простирания 345°) наблюдалось наличие полостей, благоприятных для внедрения кимберлитовых тел, находящихся в окрестности трубок «Интернациональная» и

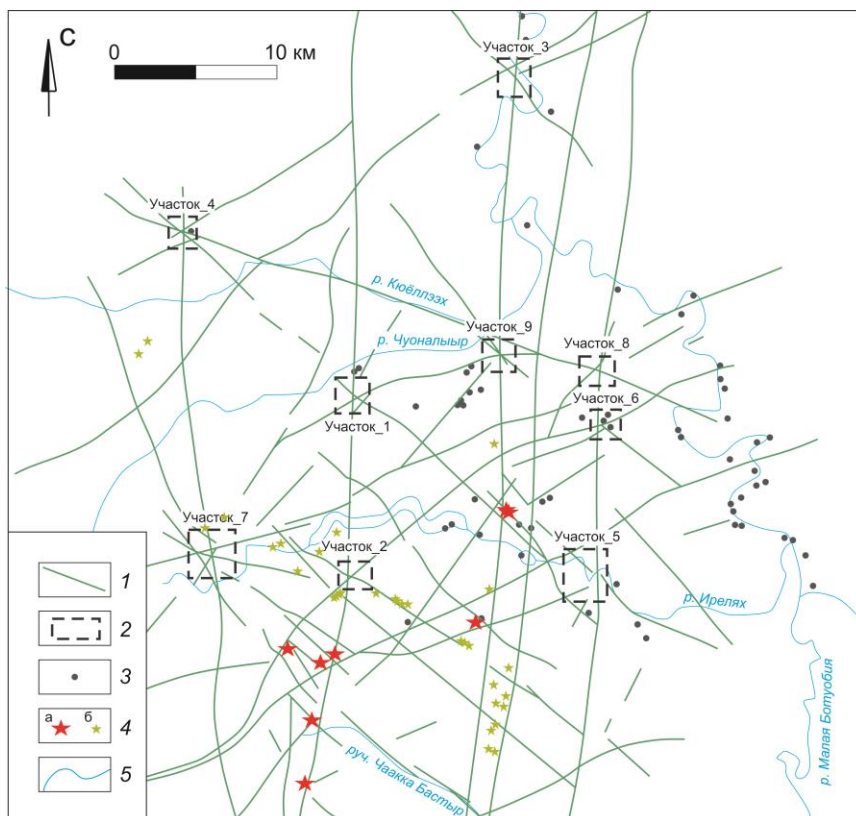


Рис. 7. Схема расположения перспективных участков для обнаружения кимберлитовых тел типа трубки «Мир» по геолого-структурным признакам в пределах центральной части Мало-Ботубинского района. 1 – разломы; 2 – участки, перспективные по геолого-структурным признакам, на обнаружение кимберлитовых тел типа трубки «Мир» и их номера; 3 – точки тектонофизических наблюдений; 4 – трубки: кимберлитовые (а) и туфовые (б); 5 – речная сеть

«Амакинская». После добавления сегментов север-северо-западного направления на схеме проявляется структура локального растяжения в районе трубки «Дачная».

Во втором эксперименте, проводимом при субмеридиональном направлении сжатия в узлах пересечения разломов субмеридионального и северо-западного простирания на местах расположения кимберлитовых трубок «Мир», «Интернациональная» и «Амакинская», наблюдаются участки локального растяжения. С целью уточнения зон растяжения в районе трубок «Интернациональная» и «Амакинская» при иных комбинациях разломов проводился повторный эксперимент при субмеридиональном сжатии, который показал, что данные структуры растяжения в окрестности трубок отсутствуют. Раскрывающийся сегмент субмеридионального разлома на всех этапах эксперимента в районе кимберлитовой трубки «Мир» может быть связан с внедрением дайки долеритов.

Единственный участок растяжения в окрестностях кимберлитовых тел был в пределах трубки «Мир» как при северо-восточном, так и при север-северо-западном сжатии (ось простирания 335°). В первом случае локальные структуры растяжения наблюдались по субмеридиональному разлому, а во втором зафиксировано две структуры типа пулл-апарт, в одной из которых расположена кимберлитовая трубка (рис. 8).

Таким образом, эксперименты показали, что максимально приближенной к природной получается картина в экспериментах при север-северо-западном сжатии (соответственно, восток-северо-восточном растяжении).

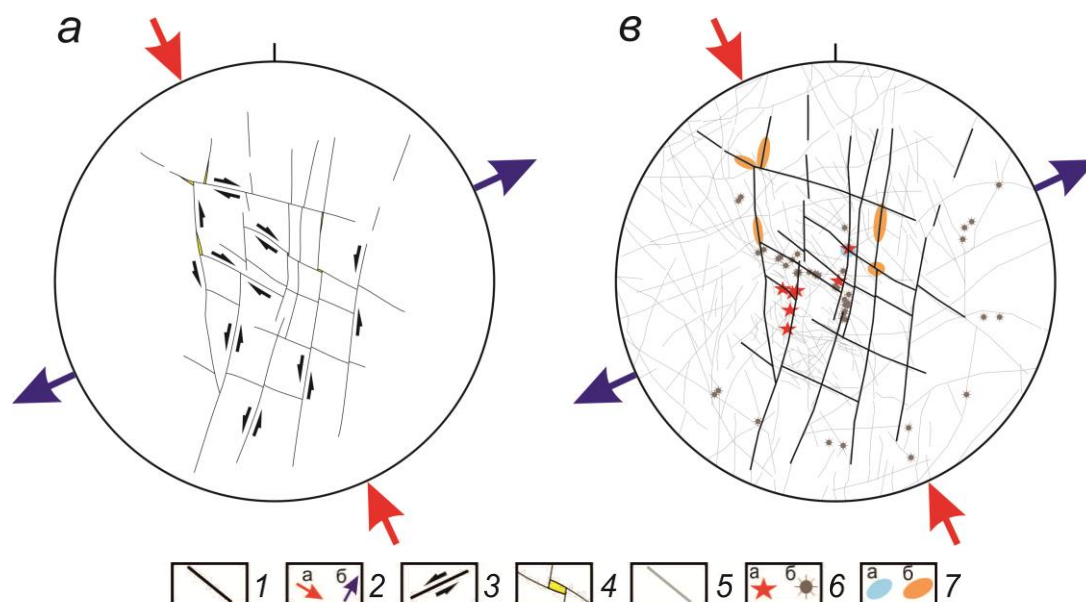


Рис. 8. Моделирование напряженно-деформированного состояния разрывной структуры в пределах центральной части Мало-Ботуобинского района при сжатии 335° , растяжении 65° . 1 – разрывы; 2 – ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 – сдвиговые перемещения блоков модели; 4 – структура локального растяжения; 5 – линеаменты, выделенные по результатам структурного дешифрирования; 6 – трубки: кимберлитовые (а), туфовые (б); 7 – участки локального растяжения разломов: в пределах кимберлитовых трубок (а), в других местах (б)

Выполненные исследования позволяют провести качественную оценку перспективности участков, выделенных на рис. 7. Для этого введен показатель класса перспективности, который определяется на основании суммирования геолого-структурных данных и результатов моделирования. Для отнесения участка к тому или иному классу перспективности предлагаются следующие критерии:

- 1-й класс – наличие в разломной сети района узла пересечения как минимум трёх направлений (субмеридионального, северо-западного и северо-восточного), а также наличие на данном участке раскрытий сегментов разрывов северо-западного простирания по результатам моделирования разрывной сети района;
- 2-й класс – наличие узла пересечения, состоящего из четырех направлений (субмеридионального, северо-западного, северо-восточного и субширотного), т.е., максимально повторяющего по направлениям структуру, вмещающую месторождение трубка «Мир»;
- 3-й класс – наличие узла пересечения, состоящего из трех направлений (субмеридионального, северо-западного и северо-восточного).

Всего к первому классу отнесено два участка, расположенных в северо-западной (участок № 4) и восточной частях района (участок № 5). Данные участки рекомендуются для первоочередного опоскования. Участки, отнесённые ко второму классу перспективности, находятся на северной (участок № 9) и западной (участок № 7) окраинах района. Для дополнительного исследования должны привлекаться участки второго и третьего класса для повышения класса перспективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный тектонофизический анализ позволил детально охарактеризовать особенности проявления тектонической трещиноватости и разноранговых разрывных нарушений в пределах месторождения трубки «Мир», которая послужила эталонным объектом для разработки поисковых структурных критериев. На основе проведенных геолого-структурных и тектонофизических работ, а также поляризационно-оптического моделирования получены следующие выводы:

1. Построена трехмерная разломно-блоковая схема строения участка локализации кимберлитовой трубки «Мир», состоящая из субвертикальных разломов субмеридионального, северо-западного, северо-восточного и субширотного направлений.

2. По результатам восстановления осей главных нормальных напряжений на основе детального изучения тектонической трещиноватости в пределах кимберлитовой трубки «Мир» выделено пять этапов формирования и активизации сети разрывных нарушений, которые определяют строение разломного узла.

3. Определена последовательность проявления полей тектонических напряжений (от более древних к более молодым):

- северо-восточное сжатие – северо-западное растяжение;
- северо-западное сжатие – северо-восточное растяжение;
- восток-северо-восточное сжатие – север-северо-западное растяжение;
- север-северо-западное сжатие – восток-северо-восточное растяжение;
- запад-северо-западное сжатие – север-северо-восточное растяжение.

Внедрение кимберлитовых тел связано со вторым этапом.

4. Поляризационно-оптическое моделирование подтвердило, что к зонам разрывных нарушений северо-западной ориентировки приурочены структуры локального растяжения, являющиеся наиболее благоприятными для локализации рудных тел.

5. Становление кимберлитовой трубки «Мир» происходило при избирательной активизации в разломном узле сегментов нарушений субмеридионального, северо-западного и северо-восточного направлений.

6. Созданная трехмерная разломно-блоковая схема послужила основой для создания поискового объекта, вмещающего кимберлитовое тело типа трубка «Мир» – разломный узел, который состоит из протяженных зон субмеридионального, северо-западного и северо-восточного направлений. Применение данного образа для анализа схемы разломной тектоники (дополненной результатами структурного дешифрирования) позволило отнести к потенциально рудовмещающей структуре девять участков.

7. Выделенные участки были разделены на три условных класса перспективности. К первому из них относятся два участка, рекомендуемые для первоочередного опоскования, отвечающие всем требованиям геолого-структурных данных и результатам моделирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включ. в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России

1. Черемных А.В., Гладков А.С., **Афонькин А.М.**, Потехина И.А., Серебряков Е.В., Кузьмин И.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестностях разломного узла района кимберлитовой трубки «Мир» (Якутская алмазоносная провинция) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2014. № 1 (44). С. 35–43.

2. Гладков А.С., Дроздов А.В., Кошкарев Д.А., Потехина И.А., **Афонькин А.М.** Оценка структурно-тектонического строения глубоких горизонтов трубки “Айхал” для постановки гидрогеомеханического мониторинга // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2015. № 2 (51). С. 46–56.

3. Лунина О.В., Гладков А.С., **Афонькин А.М.**, Серебряков Е.В. Стиль деформаций в зоне динамического влияния Мондинского разлома по данным георадиолокации (Тункинская впадина, юг Восточной Сибири) // Геология и геофизика. 2016. № 9. С. 1616–1633.

Материалы совещаний и тезисы конференций

4. **Афонькин А.М.** Разломы и кимберлитовые тела Мало-Ботуобинского района: проблемы и перспективы // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXV Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 23–28 апреля 2013 г.). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. С. 10–11.

5. Черемных А.В., Гладков А.С., **Афонькин А.М.** Оптическое моделирование напряжённого состояния в окрестностях разломного узла кимберлитовой трубки «Мир» // Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции (Улан-Удэ, 26–31 августа 2013 г.). – Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2013. С. 408–411.

6. **Афонькин А.М.** Оптическое моделирование напряжённо-деформированного состояния горного массива вблизи кимберлитовой трубки «Мир» // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 20–25 апреля 2015 г.). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2015. С. 17–18.

7. Lunina O., Gladkov A., **Afonkin A.**, Style of deformations in the Mondy active fault zone investigated with ground-penetrating radar and structural observations (southern East Siberia) // 7th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology (PATA), 30 May to 3 June, 2016. Crestone, Colorado, USA. Eds. J.P. McCalpin and C. Gruetzner. 2016. Published by the Crestone Science Center. P. 159–161.

8. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А., **Афонькин А.М.** Палеосейсмодислокация Среднекедровая в Байкальском хребте: новые результаты полевых исследований // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 14. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 187–188.