

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Научный руководитель
канд. геол.-мин. наук А.С. Гладков

Иркутск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ	8
1.1. Существующие представления о связи разломов и проявлений кимберлитового магматизма	8
1.2. Основные проблемы структурного контроля кимберлитовых тел Мало- Ботуобинского района.....	16
1.3. Краткая характеристика разломно-блокового строения участка локализации трубки Мир по результатам предшествующих исследований	22
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	29
2.1. Полевые геолого-структурные и тектонофизические методы	29
2.2. Методы структурного дешифрирования.....	32
2.3. Экспериментальные тектонофизические методы	34
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРНОГО КОНТРОЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТРУБКИ МИР	39
3.1. Особенности строения разрывной сети месторождения трубки Мир	39
3.1.1. Субвертикальные нарушения	40
3.1.2. Субгоризонтальные нарушения.....	42
3.1.3. Анализ тектонической трещиноватости	44
3.2. Построение схемы разломно-блокового строения.....	48
3.3. Реконструкция полей тектонических напряжений	54
3.4. Поляризационно-оптическое моделирование процесса активизации разрывной структуры кимберлитовмещающих разломных узлов Мало-Ботуобинского района ...	62

3.4.1. Моделирование напряжённно-деформированного состояния в окрестностях узла пересечения разрывов кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского района ...	63
3.4.2. Моделирование напряжённно-деформированного состояния разломно-блоковой структуры в окрестностях трубки Мир.....	66
3.4.3. Моделирование напряжённно-деформированного состояния сегментов разрывов разломно-блоковой структуры в окрестностях трубки Мир	77
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО КОНТРОЛЯ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ МАЛО-БОТУОБИНСКОГО РАЙОНА.....	84
4.1. Выделение перспективных площадей на поиски кимберлитовых трубок на территории Мало-Ботуобинского района	84
4.2. Результаты оптического моделирования процесса активизации разрывной структуры Мало-Ботуобинского района.....	90
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время перспективы наращивания минерально-сырьевой базы алмазодобывающего комплекса сегодня 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). Однако, 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 тектоники кимберлитовых тел на средне- и крупномасштабных уровнях. Причиной подобного положения дел является недостаточная изученность кимберлитовмещающих структур – разломов и разломных узлов.

Идеальными объектами, на которых возможно решение многих вопросов и построение 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 трёхмерной схемы разломно-блоковой структуры на участке локализации кимберлитовой трубки Мир и изучение условий её 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 строения 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-блокового строения в пределах трубки было создано и проанализировано 83 точки геолого-структурных наблюдений, выполненными автором и сотрудниками лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. Также анализировались результаты документации трещин при проходки горных выработок в пределах рудного тела, выполненные геологическим отделом подземного рудника Мир.

Для экспериментальной проверки геолого-структурных построений автором лично проведены и проанализированы результаты по четырем сериям (более 30) эксперимента 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 ориентировок. 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-Ботубинского района дают 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 объёмная 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 Ботубинской 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 перспективные участки на обнаружения 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**», посвященная 110-летию со дня рождения А.А. Трескова (2013 г., г. Иркутск), на IV Всероссийской научно-практической конференции «**Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии**», посвященная 40-летию Геологического института СО РАН (2013 г., г. Улан-Удэ), на XXVI Всероссийской молодежной конференции «**Строение литосферы и геодинамика**», посвященная 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.

Объём и структура работы. Работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём работы - 108 страниц, включающих 50 рисунка и 4 таблиц. Список литературы содержит 85 наименования.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, кандидату геолого-минералогических наук, старшему научному сотруднику ИЗК СО РАН Андрею Станиславовичу Гладкову, за постановку темы, за проведение полевых исследований и предоставления полевых материалов, за проявления 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 метода поляризационно-оптического моделирования и обсуждение полученных результатов. Также автор признателен всем сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН за поддержку, советы и консультации.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ

1.1. Существующие представления о связи разломов и проявлений кимберлитового магматизма

Открытие в 1949 году первых алмазоносных россыпей на р. Виллой положило начало изучению и освоению Якутской алмазоносной провинции. За прошедшее время было открыто и вовлечено в эксплуатацию более 10 коренных месторождений алмазов (трубки Мир, Айхал, Удачная, Интернациональная, имени XXIII партсъезда, Дачная, Юбилейная, Комсомольская, Нюрбинская, Мархинская, Зарница и другие). К настоящему моменту в пределах ЯАП известно несколько сотен кимберлитовых трубок и дайкоподобных тел, которые группируются в 23 кимберлитовых поля (рис. 1).

При изучении факторов, определяющих размещение кимберлитовых тел, особое внимание было уделено зонам разломов. Повышенный интерес к данной проблеме обуславливался известными представлениями о том, что разрывные нарушения, играют существенную роль в локализации магматогенных месторождений полезных ископаемых [Белоусов, 1952; Крейтер, 1961; Вольфсон, Яковлев, 1975]. Кроме того, сохранность алмазов при транспортировке кимберлитовой магмой из мантии возможна только при больших скоростях подъема. Например, В.А. Милашев [1984] приводит оценки времени, за которое кимберлитовый расплав достигает поверхности земли от основания земной коры в 30-40 часов. Подобные скорости возможны только при существовании зон – проводников кимберлитовой магмы, которые, подавляющее большинство исследователей, отождествляют с зонами глубинных разломов [например, Одинцов, 1957, 1966; Владимиров, Одинцов, 1971; Мокшанцев и др., 1976; Брахфогель, 1984; Колодезников и др., 1996 и многие другие]. Глубинные разломы рассматриваются в одних случаях, как пути для продвижения кимберлитовых расплавов (подводящие каналы), в других, с их активизацией связывается возникновение кимберлитовой магмы [Ковальский, 1963; Трофимов, 1961, 1967, 1980; Сарсадских, 1968, 1973].

Несмотря на более чем 60-тилетнюю историю изучения кимберлитоконтролирующих разломов, относительно пространственного положения, ориентировок и строения подобных зон на Сибирской платформе, а также их времени заложения и развития единого мнения не существует.

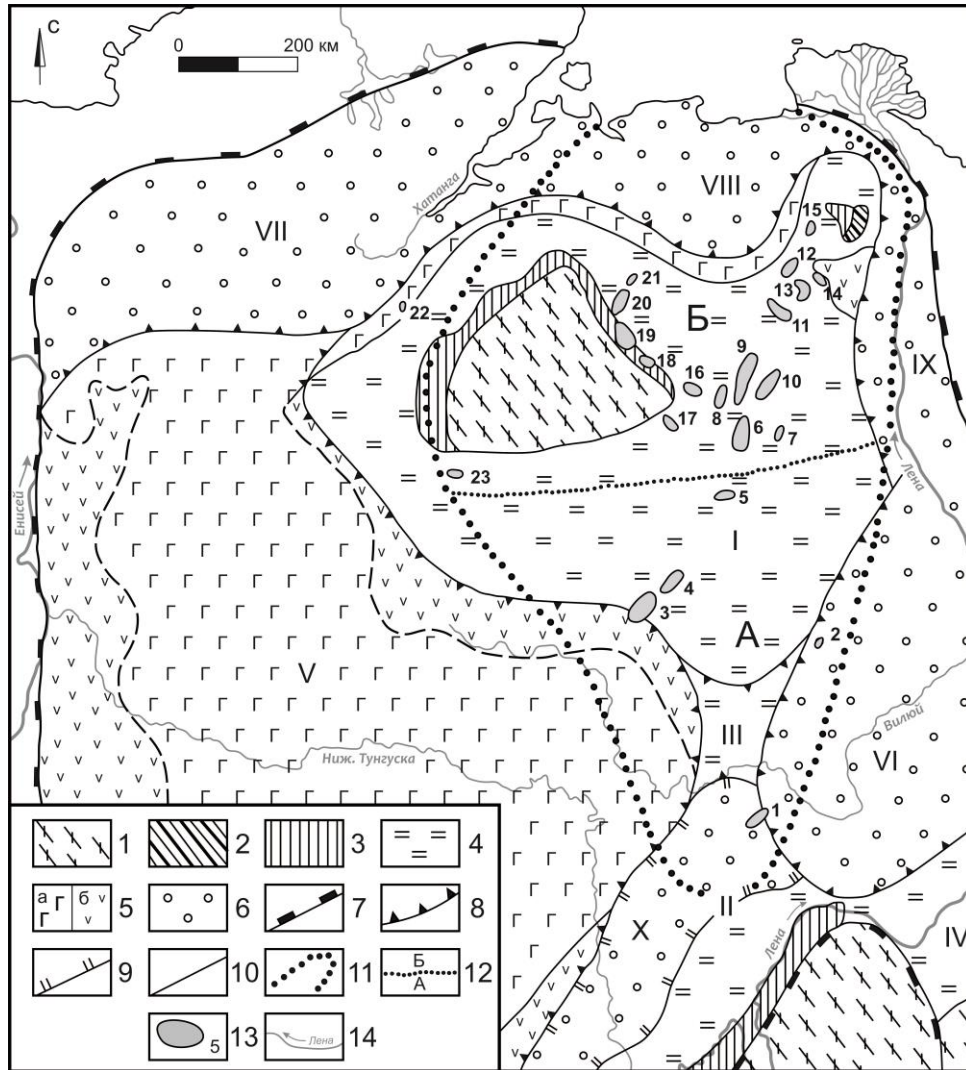


Рис. 1. Структурно-формационная карта Сибирской платформы [по данным К.Б. Мокшанцева, Н.И. Горева и других авторов].

1 - магматические и метаморфические формации архея; 2 - метаморфизованные вулканогенно-осадочные породы нижнего протерозоя; 3 - осадочные и магматические формации верхнего протерозоя; 4 - терригенно-карбонатные формации нижнего палеозоя; 5 - терригенные вулканогенно-терригенные, угленосные (а) и магматические (трапповые) (б) формации верхнего палеозоя; 6 - терригенные формации мезозоя-кайнозоя; 7 - современная граница Сибирской платформы и их названия (I - Анабарская антеклиза, II - Непско-Ботуобинская антеклиза, III - Сюгджерская седловина, IV - Алданская антеклиза, V - Тунгусская синеклиза, VI - Вилюйская синеклиза, VII - Енисейско-Хатангский прогиб, VIII - Лено-Анабарский прогиб, IX - Приверхоянский прогиб, X - Ангаро-Вилюйский прогиб); 9 - граница Ангаро-Вилюйского прогиба; 10 - границы формаций; 11 - предполагаемый контур ЯАП; 12 - граница между алмазоносными областями (А - Вилюйская, Б - Анабаро-Оленекская); 13 - кимберлитовые поля и их номера (1 - Мирнинское, 2 - Накынское, 3 - Алакит-Мархинское, 4 - Далдынское, 5 - Верхнемунское, 6 - Чомурдахское, 7 - Севернейское, 8 - Западно-Укукитское, 9 - Восточно-Укукитское, 10 - Огонер-Юряхское, 11 - Мерчимденское, 12 - Куойское, 13 - Верхнемолодинское, 14 - Толуопское, 15 - Хорбусуонское, 16 - Лучаканское, 17 - Куранахское, 18 - Дьюкенское, 19 - Среднекуонамское, 20 - Нижнекуонамское, 21 - Орто-Ыаргинское, 22 - Котуйское, 23 - Харамайское); 14 - речная сеть и их название.

Например, по мнению Ф.Ф. Брахфогеля, кимберлитоконтролирующие зоны - это разломные образования, которые не обнаруживают пространственно-генетических связей с другими элементами современного структурного плана региона. Он представлял их как «разовые» проводники магмы, функционировавшие с середины позднего девона до начала карбона. В работах В.И. Ваганова, посвященных характеристике зон скрытых разломов фундамента контролирующей кимберлитовый магматизм Сибирской платформы и Канады, предлагается называть их поясами повышенной проницаемости [Ваганов, 1995, 2000]. При этом отмечается, что для них характерно зональное строение: т.е. центральная часть представлена широкой зоной глубинного разлома, а краевые части – линейными гранулит-базит-гипербазитовыми блоками.

В свою очередь В.А. Милашев [1965, 1979, 1984, 1990, 1997] предложил другое видение тектонических факторов, благоприятных для проявления кимберлитового магматизма. Он не признает причинно-следственную связь кимберлитового магматизма с зонами глубинных разломов, поскольку, по его мнению, таких примеров единицы. По его мнению, кимберлитовые поля связаны с блоками повышенной проницаемости земной коры, которые маркируются на дневной поверхности участками изотропной трещиноватости.

Следует также отметить, что некоторые исследователи помимо зон глубинных разломов и их узлов, к структурным факторам локализации кимберлитовых полей относят элементы пликативной тектоники [Мокшанцев и др., 1974, 1976]. По их мнению, кимберлитовые поля приурочены к склонам поднятий фундамента, которые сопряжены с грабенообразными прогибами. Это флексуорообразные перегибы в платформенном чехле, склоны валов и желобов. Перечисленные пликативные структуры также контролируются глубинными разломами, что и определяет закономерности пространственного размещения кимберлитовых полей.

Также имеет место точка зрения о том, что кимберлитовые поля приурочены к авлакогенам и палеорифтам [Сарсадских, 1968, 1973; Масайтис и др., 1975; Францессон, 1986; Малич и др., 1989; Горев, 1998; Эринчек и др., 1998а; Дукарт, 2000; Зинчук и др., 2004]. Однако трактовка взаимосвязи рифтогенная система – область архейской консолидации у различных авторов отличается. Например, одни считают

Вилуйско-Мархинскую зону разрывных нарушений элементом кимберлитоконтролирующей системы [Горев, 1998], другие наоборот, отрицают её участие, отводя ей роль пассивной структуры [Дукарт, 2000].

Необходимо также упомянуть представления о связи кимберлитового магматизма с кольцевыми структурами [Серокуров, 1995; Серокуров и др., 2001]. На основании визуального и компьютерного анализов аэрокосмических снимков они сделали вывод о наличии простирающихся радиально-кольцевых зонально выстроенных структур (диаметр ~200 км). В пределах этих крупных структур расположены мелкие (диаметр ~30-50 км), с которыми пространственно связаны практически все кимберлитовые поля (рис. 2).

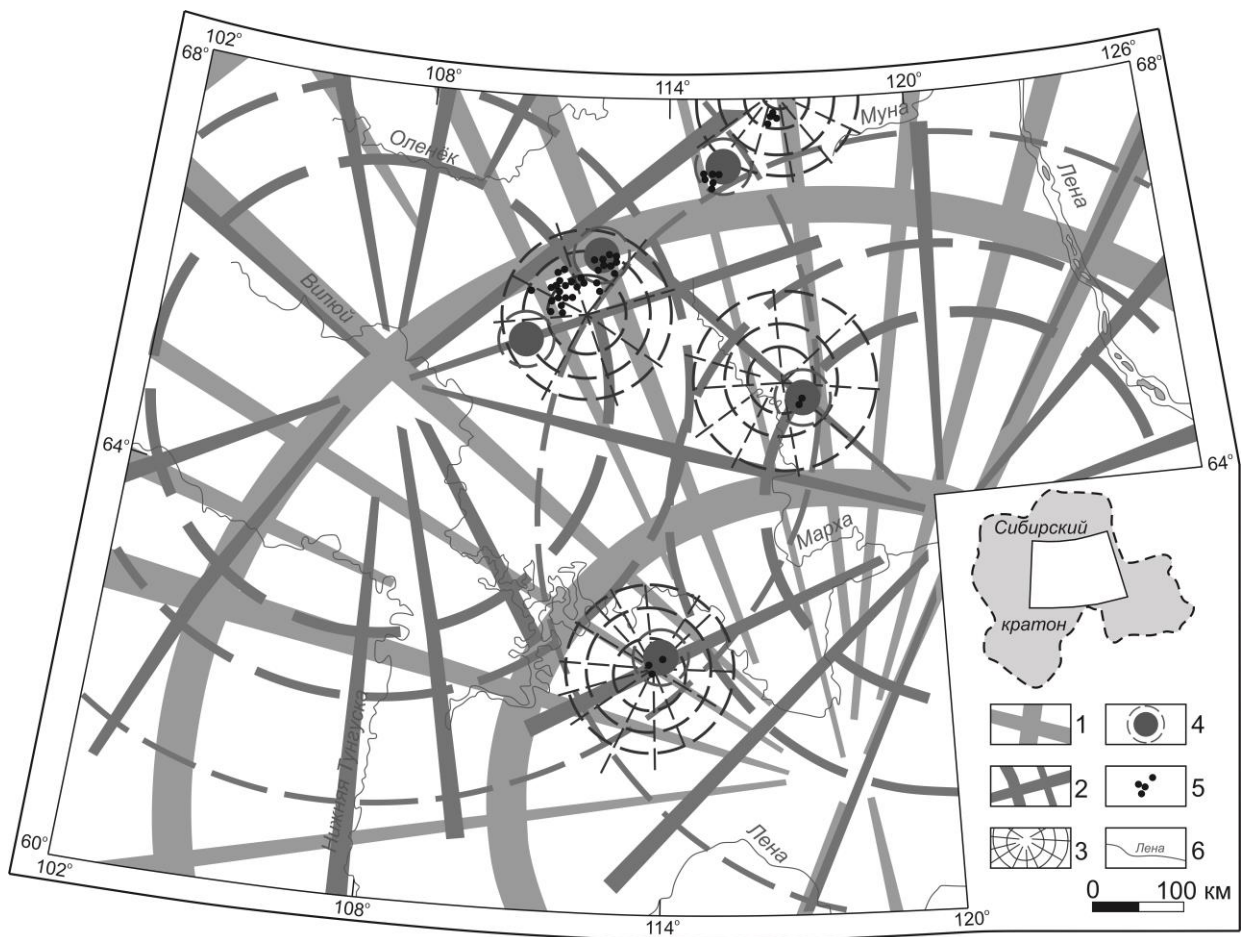


Рис. 2. Схема взаимодействия разноранговых структур, контролирующих алмазоносный магматизм в центральной части Сибирской платформы [Серокуров, 2001].

1-3 зоны линеаментов соответственно первого-третьего порядка (континентальный, региональный и районный ранги), формирующих радиально-кольцевые системы и структуры; 4 – кольцевые структуры кимберлитовых полей (локальный ранг); 5 – известные кимберлитовые тела; 6 – речная сеть и их название.

На основании перечисленных выше представлений различные исследователи выделяли разные по местоположению и направлению кимберлитоконтролирующие зоны. Например, А.А. Арсеньев [1961, 1963] выделил семь зон глубинных разломов северо-восточного (Ангаро-Мунская, Мархинско-Оленёкская, Котуй-Попигайская, Чугино-Ленская и Чарская) и северо-западного (Мархинско-Котуйская, Молодо-Попигайская и Мунско-Анабарская) направлений (рис. 3). По его мнению, кимберлитовые поля приурочены к северо-восточным зонам, а также участкам их пересечения с северо-западными зонами.

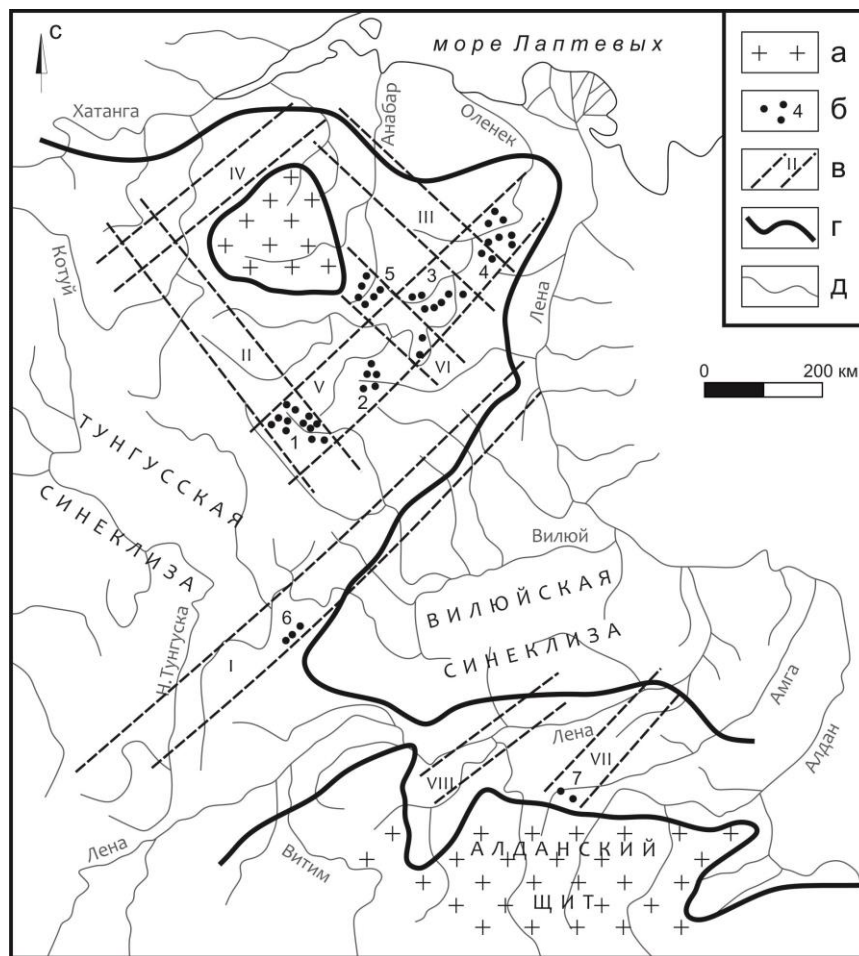


Рис. 3. Схема расположения дизъюнктивных структур северо-восточной части Сибирской платформы [Арсеньев, 1961].

а – выходы на поверхность кристаллического фундамента платформы; *б* – кимберлитовые трубки и дайки: 1 – Алакито-Далдынская группа, 2 – Мунская группа, 3 – Среднеоленёкская группа, 4 – Куойкско-Мэрчимдэнская группа, 5 – группа трубки «Мир», 6 – Алданская группа; *в* – дизъюнктивные зоны разломов: I – Ангаро-Мунская, II – Мархинско-Котуйская, III – Молодо-Попигайская, IV – Котуй-Попигайская, V – Мархинско-Оленёкская, VI – Мунско-Анабарская, VII – Чугино-Ленская, VIII – Чарская; *г* – границы крупных платформенных структур; *д* – речная сеть.

Н.С. Зайцев [Зайцев, 1954], а вслед за ним И.И. Краснов и В.Л. Масайтис [Краснов, Масайтис, 1955] выделяли зоны глубинных разломов северо-восточного простирания (Ангаро-Вилуйская – от бассейна реки Ангары на юго-западе до бассейнов р. Тюнг и р. Муна на северо-востоке), а также северо-западную зону разломов (Вилуйско-Котуйская – от бассейна верхнего течения Котуя до бассейна р. Мархи). Кроме того, была выделена А.Г. Дьяковым [Дьяков, 1967] Оленекско-Саянская кимберлитовая зона, простирающаяся в юго-западном направлении от рек Молодо и Беенчиме до устья р. Укукит (рис. 4).

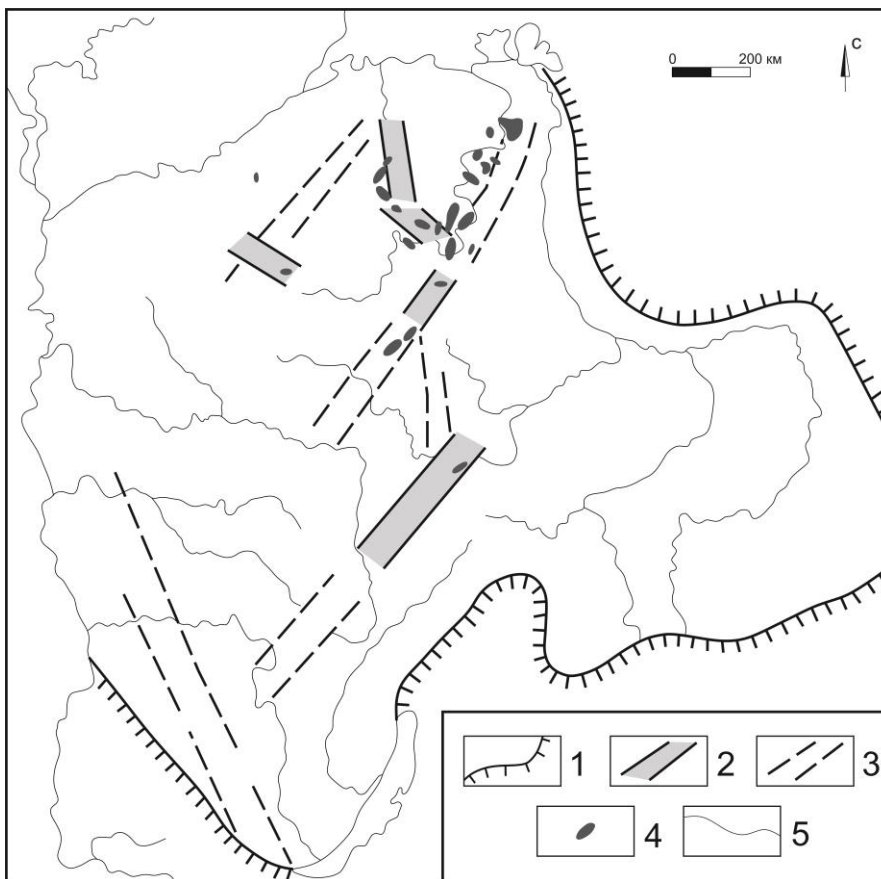
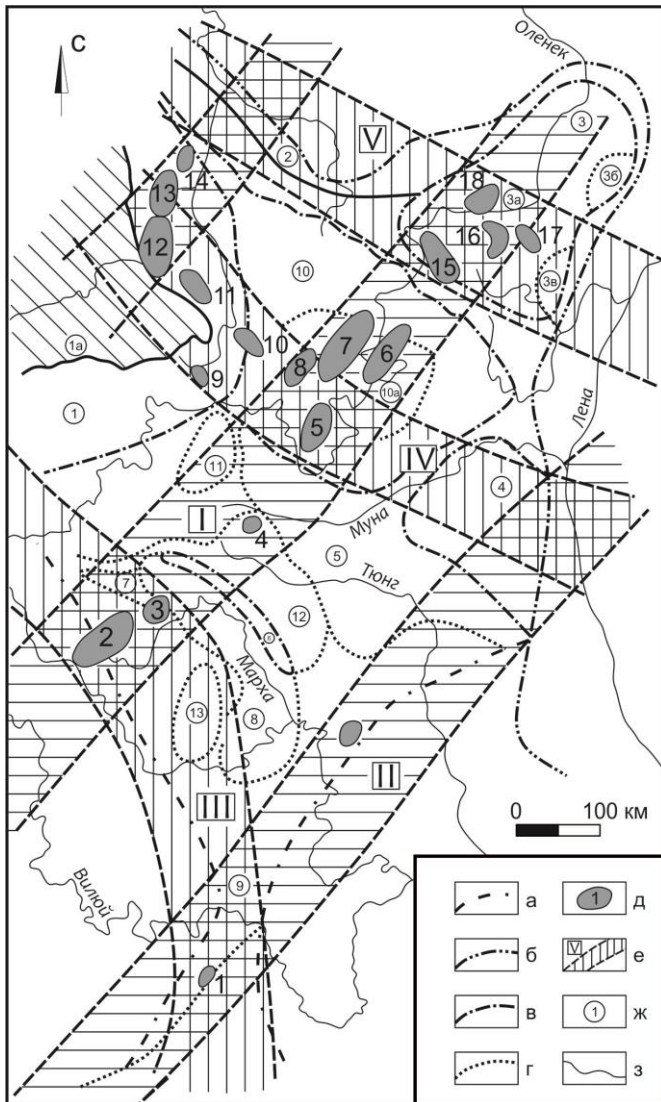


Рис. 4. Зоны кимберлитового магматизма Сибирской платформы [Геология и генезис..., 242 с.]
 1 – границы краевых швов,
 2 – установленные и 3 – предполагаемые зоны кимберлитового магматизма, 4 – кимберлитовые поля; 5 – речная сеть.

Кимберлитоконтролирующие зоны аналогичных направлений предполагались группой исследователей во главе с К.Б. Мокшанцевым [Мокшанцев и др., 1976]. Интерпретируя данные геолого-геофизических исследований и результаты геологосъемочных работ для восточной части Сибирской платформы, они выделили пять крупных разломных зон земной коры субмеридионального (Вилуйско-Котуйская), северо-восточного (Далдыно-Оленекская, Вилуйско-Жиганская), субширотного (Куонапско-Жиганская) и северо-западного (Куойско-Эбеляхская) простираний (рис. 5).



а – границы синеклиз; б – границы прогибов; в – границы крупных сводов, валов и впадин; г – границы прочих структур; д – кимберлитовые поля: 1 – Мало-Ботуобинское, 2 – Алакитское, 3 – Далдынское, 4 – Верхне-Мунское, 5 – Чомурдахское, 6 – Западно-Укукитское, 7 – Восточно-Укукитское, 8 – Огоньор-Юряхское, 9 – Куранахское, 10 – Лучаканское, 11 – Дюкенское, 12 – Ары-Мастахское, 13 – Старореченское, 14 – Орто-Ыаргинское, 15 – Мерчимденское, 16 – Молодинское, 17 – Толоупское, 18 – Куойкское; е – основные зоны разломов (дробления земной коры): I – Далдыно-Оленекская, II – Вилюйско-Жиганская, III – Вилюйско-Котуйская, IV – Куонапско-Жиганская, V – Куойкско-Эбеляхская; ж – номера пликативных структур: 1 – Анабарский свод, 1а – Анабарский массив, 2 – Уджинская седловина, 3 – Оленекский свод, 3а – Куойкское поднятие, 3б – Солоолийское поднятие, 3в – Салабынское поднятие, 4 – Мунский свод, 5 – Оленек-Тюнгское поднятие, 9 – Ботуобинская седловина, 10 – Суханская впадина, 10а – Биректинская котловина, 11 – Верхне-Силигирская впадина, 12 – Верхне-Мунская впадина, 13 – Бай-Юряхская котловина; з – речная сеть.

Рис. 5. Схема расположения основных зон разломов (дробления земной коры) Якутской кимберлитовой провинции на тектонической основе [Мокшанцев и др., 1976].

Группа Г.С. Гусева связывала кимберлитовые поля с разломами скрытого типа северо-восточного простирания [Гусев и др., 1982] (рис. 6). При изучении тектонических полей напряжений нескольких кимберлитовых полей они выяснили, что тектонические структуры образовались в условиях северо-восточного сжатия и северо-западного растяжения, т.е. при сдвиге.

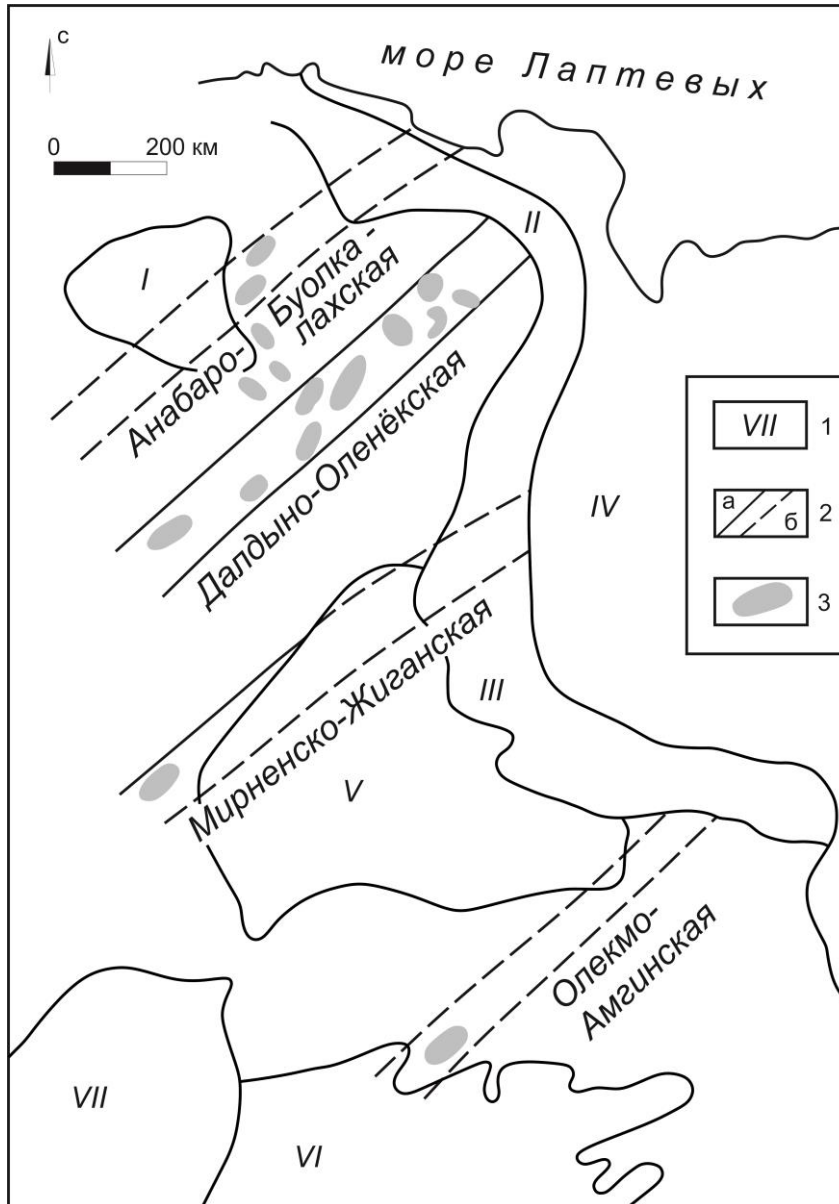


Рис. 6. Схема тектонического контроля размещения кимберлитового магматизма на востоке Сибирской платформы [Гусев и др., 1982].

I – структуры восточной части Сибирской платформы и её складчатого обрамления (I – Анабарский массив, II – Лено-Анабарский прогиб, III – Предверхоанский прогиб, IV – Верхряно-Чукотская геосинклинальная область, V – Вилюйская синеклиза, VI – Алданский щит, VII – Байкало-Патомская складчатая область); 2 – разломы: а – установленные, б – предполагаемые; 3 – кимберлитовые поля.

Как уже отмечалось, единого мнения относительно зон не существует, но практически на всех схемах присутствуют кимберлитоконтролирующие зоны, в пределах которой находятся среднепалеозойские кимберлитовые поля севера Якутской кимберлитовой провинции. Это позволяет с уверенностью говорить, что алмазоносные кимберлитовые поля Якутской провинции приурочены к зонам глубинных разломов северо-восточного простирания и узлам их пересечений с разломами других направлений. Под «алмазоносным полем» мы вслед за В.И. Вагановым подразумеваем естественную группировку пространственно-сближенных тел, связанных происхождением с развитием единой вертикальной «стволовой» зоны повышенной проницаемости – флюидно-магматической колонны [Ваганов, 2000]. При этом до

настоящего времени границы кимберлитовых полей устанавливаются по крайним известным телам, при этом одни исследователи включают в них россыпи алмазов, другие рассматривают только диатремы и жильные тела.

При рассмотрении следующих по масштабу уровней – куста кимберлитовых трубок и единичных кимберлитовых тел – причинно-следственная связь последних с разломными структурами становится все менее “определенной” [Милашев, 1984]. Причиной этого является тот факт, что с увеличением масштаба работ большое значение для контроля кимберлитового магматизма приобретают структуры платформенного чехла и, в конечном счете, – его приповерхностных слоев.

Между тем, необходимость наращивания минерально-сырьевой базы алмазодобывающего комплекса в Якутской алмазоносной провинции требует развития именно локального прогноза для закрытых территорий (объекты - кимберлитовое тело, куст кимберлитовых тел). Это касается и необходимости совершенствования локальных структурных факторов и критериев для внедрения в технологии и методы поисковых работ. Исходя из этого, для постановки исследований по изучению закономерностей структурного контроля кимберлитовых тел, нами был выбран эталонный объект Мало-Ботуобинского района – коренное месторождение трубка Мир.

1.2. Основные проблемы структурного контроля кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района

Мало-Ботуобинский район расположен на юге Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). В него входит Мирнинское поле, кимберлитовые трубки которого прорывают осадочную толщу нижнего палеозоя и перекрываются терригенными осадками мезозоя. Кристаллический фундамент залегает на глубине 2,1-2,3 км. В центральной части Мало-Ботуобинского алмазоносного района, проходит субмеридиональная (север-северо-восточная) Виллойско-Мархинская зона глубинных разломов (ВМЗР) [Горев и др., 2011; Эринчек и др., 1998б] протяженностью более 800 км, шириной на юге, в исследуемом алмазоносном районе, составляет 30–50 км, а в северной части, в Среднемархинском и Муно-Тюнгском алмазоносных районах, достигает 150 км. Разрывные нарушения, входящие в ВМЗР, часто залечены долеритовыми дайками. В фундаменте платформы она состоит из серии субпараллельных, сближенных в пространстве разрывных

нарушений субмеридионального направления, которые уверенно картируются сейсморазведкой по горизонту КВ (кровля венда). В потенциальных полях нарушения имеют вид линейных положительных аномалий различной интенсивности (рис. 7). Она состоит из серии субпараллельных разломов, среди которых выделяют Западный, Параллельный, Центральный (Мирнинский), Восточный, Буордахский, Кюеляхский (Интернациональный) и Мало-Ботуобинский. Расстояние между разломами от 3–6 до 10–16 км, азимут простираения колеблется от 7 до 25°, падение преимущественно восточное под углом 80-83° [Матросов, 2006].

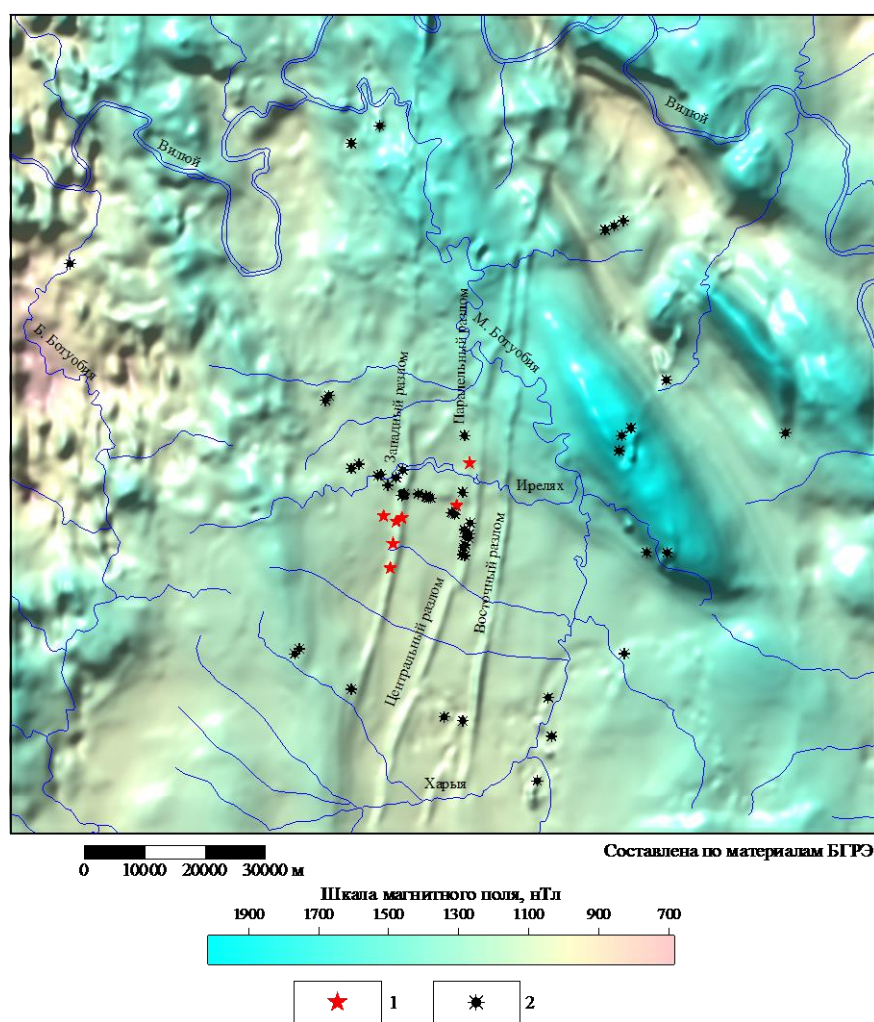


Рис. 7. Карта магнитного поля Мало-Ботуобинского района [Матросов, 2006].
1 - кимберлитовые тела Мирнинского поля; 2 - тuffовые трубки.

В поле открыто семь кимберлитовых трубок (рис. 8): Мир, Спутник, Дачная, им. XXIII съезда КПСС, Интернациональная, Амакинская, Таёжная, а также кимберлитовые дайки (Ан-21 и Южная) и множество даек кимберлитов сопряжённых с трубками

[Харьков и др., 1998]. Поле характеризуется линейным расположением кимберлитовых тел. Кимберлитовые трубки приурочены преимущественно к зонам Западного и Параллельного разломов. На дневной поверхности обнажены кимберлитовые трубки Мир, Спутник, Амакинская, а остальные полностью перекрыты кластическим нижнеюрскими отложениями мощностью до 20 м.

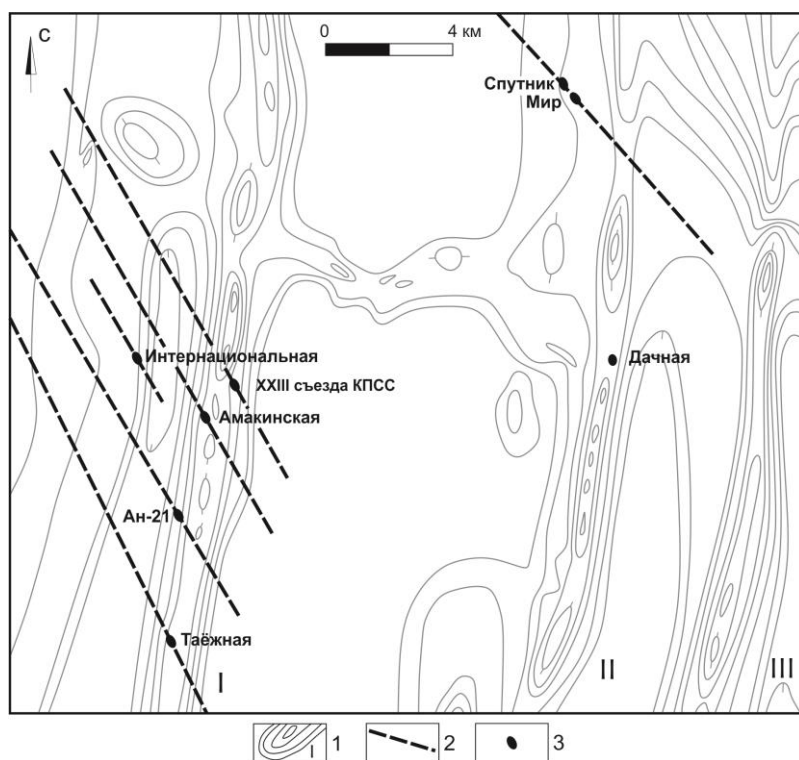


Рис. 8. Тектоническая схема центральной части Мало-Ботуобинского района и размещение кимберлитовых тел [Харьков и др., 1972].

1 – изолинии магнитного поля, подчёркивающие глубинные разломы (I – Западный, II – Мирнинский, III – Восточный); 2 – предполагаемые оперяющие разломы; 3 – трубки кимберлитовых пород.

В настоящее время существуют различные мнения относительно структурного контроля кимберлитовых тел. Одни исследователи [Щукин и др., 1972; Молчанов, Саврасов, 1981, 1985; Варламов, 1989] утверждают, что глубинные разломы Вилюйско-Мархинской зоны север-северо-восточного и субмеридионального простирания (рис. 9, А), являются магмоподводящими, а роль вмещающих структур, по их мнению, принадлежит оперяющим трещинам северо-западного простирания.

Другая группа авторов [Бабаян и др., 1976] считают рудовмещающими структурами узлы пересечения субмеридиональных разломов Вилюйско-Мархинской зоны с субширотной Джункун-Хампинской (Мирнинской) зоной или с Угукутской рифтоподобной структурой северо-восточного простирания (рис. 9, Б).

По мнению И.К. Шалаева, Б.Н. Соколова, М.И. Попова, Я.Я. Биезайса [Биезайс, 2002] и других, структурный контроль определяется наличием глубинных разломов

северо-западного простирания в узлах пересечения которых с разломами Вилуойско-Мархинской зоны и локализована большая часть известных кимберлитовых тел (рис. 9, В).

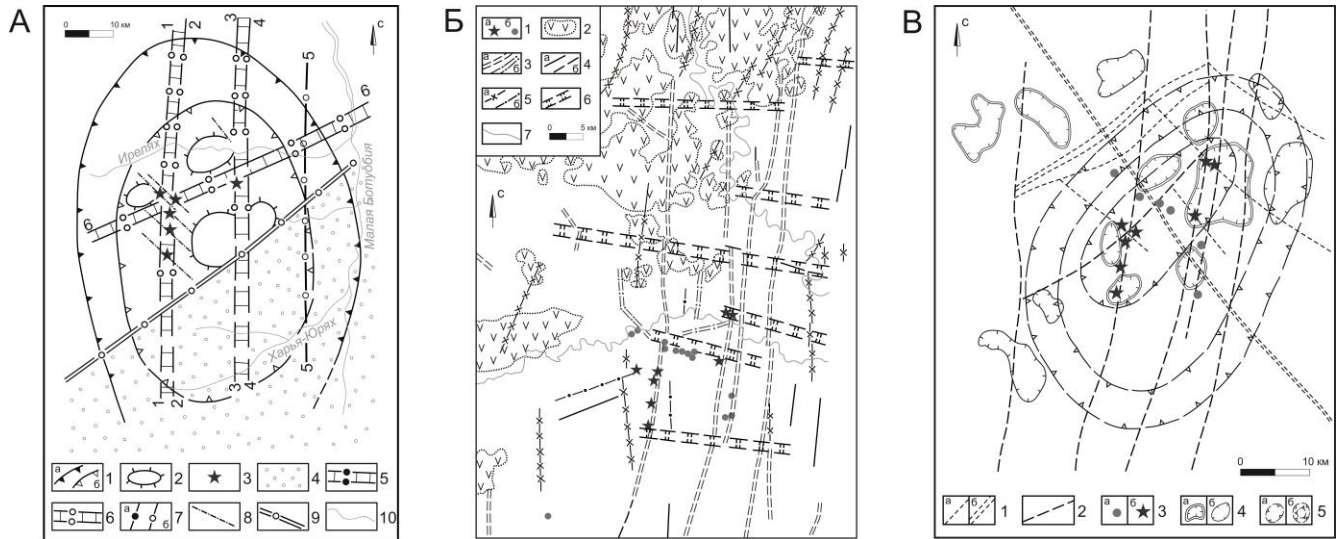


Рис. 9. Примеры моделей строения разломной сети Мирнинского кимберлитового пояса используемых различными авторами.

А. Структура Мирнинского кимберлитового поля [по данным В.А. Варламова, 1989]:

1-контур: а-глубинной геофизической аномалии центрального типа, б-Амакинского купольного поднятия; 2-контур куполов второго порядка; 3-кимберлитовые трубки; 4- часть структуры поля, перекрытая мезозойскими отложениями Ангаро-Вилуойского прогиба; 5- кальдеры проседания кимберлитового вулканизма; 6-кальдеры проседания базальтового вулканизма; 7-глубинные разломы, контролирующие: а- кимберлитовый и базальтовый магматизм (1-1 –Кюеляхский, 2-2 –Западный, 3-3 –Параллельный, 4-4 –Центральный), б- только базальтовый магматизм (5-5 –Восточный, 6-6 – Аппаинский); 8- кимберлитовмещающие разломы; 9-разломы ограничивающие мезозойский прогиб (7-7 – Ангаро-Вилуойский разлом); 10-речная сеть.

Б. Карта разломной тектоники и магматизма Мало-Ботубинского района, по [Г.Д. Бабаяну и др., 1976]:

1-кимберлитовый (а) и базальтовый (б) трубки взрыва; 2-пластовые интрузии долеритов; 3-разломы, выделенные положительными линейными аномалиями Δg и ΔT уверенно (а) и неуверенно (б); 4-разломы, выделенные положительными линейными аномалиями Δg уверенно (а) и неуверенно (б); 5-разломы, выделенные (неуверенно) по изгибам изоаномал и линейным цепочкам локальных аномалий силы тяжести (а) и по изгибам изодинам (б); 6-эрозионно-тектонические уступы кристаллического фундамента, выделенные по зонам повышенных значений Δg ; 7-речная сеть.

В. Схема динамического развития тектоно-магматических зон кимберлитобразующей системы в породах платформенного чехла (Мирнинское кимберлитовое поле) [Биезайс, 2002].

1-разрывные нарушения: а- платформенного чехла, б- глубинные, коровые; 2-дайки долеритов, выполняющие центральные части разломов платформенного чехла север-северо-восточного простирания; 3-трубки взрыва: а- пород основного состава, б- кимберлитов; 4- генерализованные контуры: а- россыпей алмазов, б- ореолов индикаторных минералов кимберлитов; 5-предполагаемые контуры зон динамического развития кимберлитобразующей системы: а- центральной, б- периферийной.

В.А. Биланенко, Г.Д. Балакшин и другие [*Структурно-тектонические...*, 1976] предложили более сложную схему структурного контроля кимберлитовых тел Мало-Ботубинского района. Они увязывают особенности распределения кимберлитовых тел с разломами различных порядков. Наиболее крупные разломы I порядка играют определяющую роль в размещении кимберлитового поля в целом. К разломам II порядка пространственно приурочены все имеющиеся кимберлитовые трубки, которые залегают в оперяющих разрывах III порядка (рис. 10).

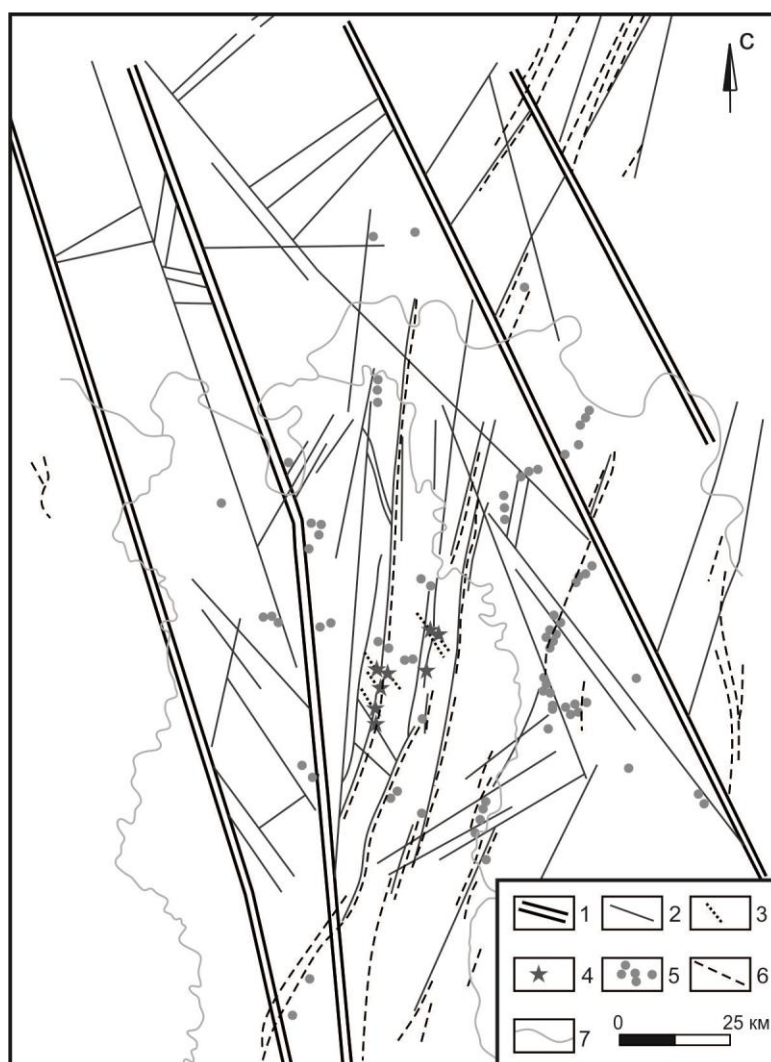


Рис. 10. Схема структурного контроля размещения кимберлитовых трубок в Мало-Ботубинском районе [Биланенко и др., 1976]

1 – глубинные разломы I порядка, контролирующие размещение кимберлитовых полей; 2 – глубинные разломы II порядка (трещины скалывания), контролирующие размещение кимберлитовых тел; 3 – трещины III порядка (оперяющие), кимберлитовмещающие; 4 – кимберлитовые трубки; 5 – трубки основного состава; 6 – дайки траппов; 7 – речная сеть.

Близкую точку зрения высказал А.С. Гладков, который предложил модельную схему развития разрывной сети и внедрения кимберлитовых трубок Мирнинского кимберлитового поля в сдвиговых зонах (рис. 11), формирующихся в платформенном чехле над субмеридиональными разломами фундамента [Гладков и др., 2008]. По его

мнению, известные кимберлитовые тела приурочены к узлам пересечения север-северо-восточных и запад-северо-западных разрывных нарушений. При этом практически все указанные узлы приходятся на участки взаимодействия между окончаниями сближенных кулисообразных нарушений север-северо-восточных нарушений, имеющих характерные черты дуплексных или пулл-апарт структур.

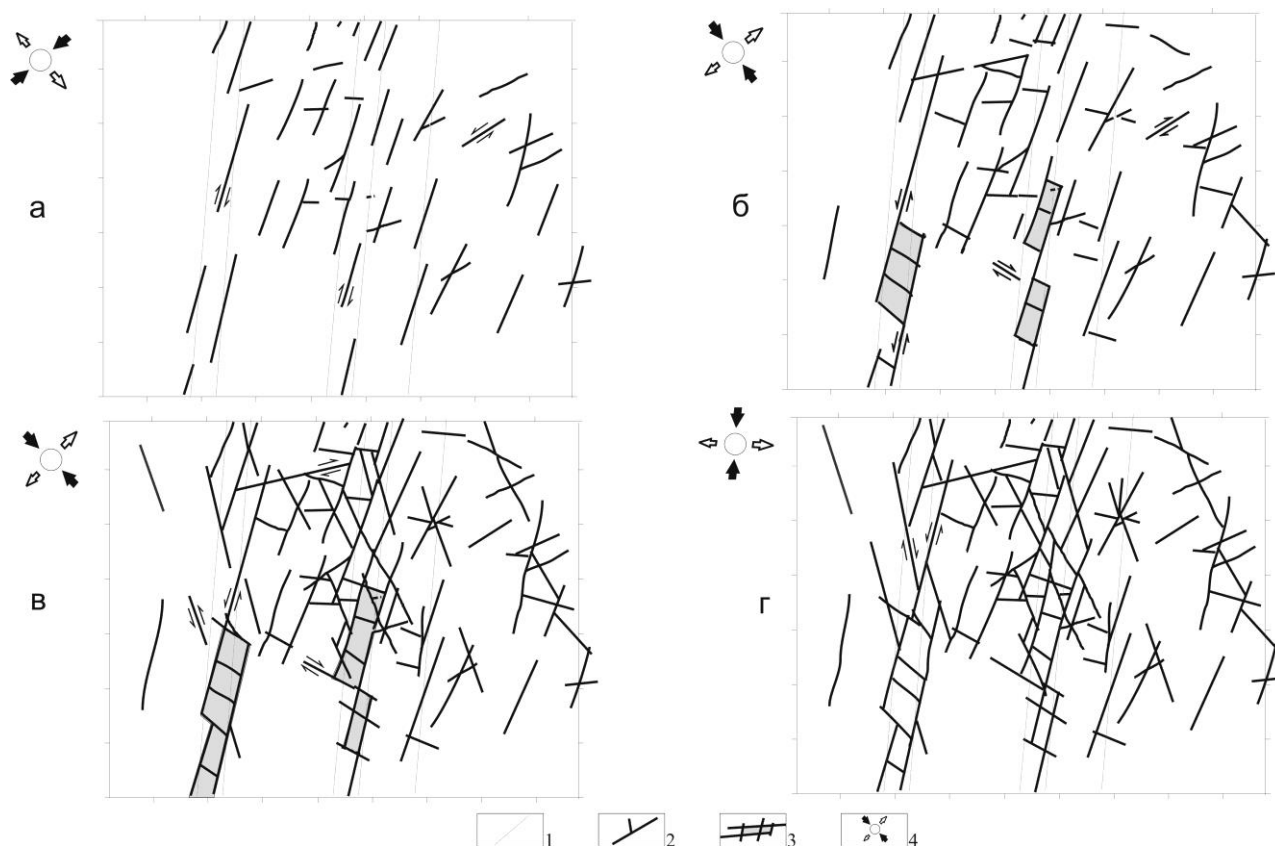


Рис. 11. Этапы формирования активизации сети разрывных нарушений в верхних слоях платформенного чехла на площади Мирнинского кимберлитового поля:

а – I этап; б, в – II этап; г – III этап.

1 – осевые линии разломов фундамента Вилюйско-Мархинской зоны; 2 – разрывные нарушения в верхней части платформенного чехла; 3 – дуплекс растяжения; 4 – ориентировка осей сжатия (черного) и растяжения (белого) регионального поля тектонических напряжений.

Приведенный обзор свидетельствует о том, что, несмотря на долгую историю изучения вопроса, не удалось разработать модель структурного контроля кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района. Между тем, известно, что в настоящее время основные перспективы наращивания сырьевой базы связываются с месторождениями, не выходящими на дневную поверхность и перекрытыми мощными

толщами осадочных или вулканогенных пород. В этом случае многократно возрастает роль структурных факторов, разработка которых должна проводиться на основе хорошо изученных площадей и месторождений с использованием современных геолого-структурных и тектонофизических методов. С этой точки зрения Мало-Ботуобинский район и расположенные в его пределах коренные месторождения алмазов могут служить эталонными объектами для изучения закономерностей структурного контроля кимберлитовых тел и разработки на их основе поисковых критериев.

1.3. Краткая характеристика разломно-блокового строения участка локализации трубки Мир по результатам предшествующих исследований

Месторождение трубка Мир приурочено к Параллельному разлому, который выделяется по данным магнитной и гравиметрической съемками. На поверхности трубка имела форму овала с размерами 490×320 м. До глубины 200 м трубка имела форму воронки, которая на более глубоких горизонтах (до глубины 900 м) переходит в цилиндрическое тело с незначительным сужением книзу [Афонькин, 2013]. На глубине в 900—1000 м от поверхности она переходит в серию подводящих даек. Трубка прорывает карбонатно-терригенные и галогенно-карбонатные породы ордовика и кембрия, два силла (на глубине 500 и 1100—1200 м мощностью соответственно 12 — 34 и 70 м) и дайку диабазов позднедевонского возраста. Терригенно-карбонатные породы представлены известняками, доломитами, мергелями, алевролитами и их переходными разностями. Пласты и линзы каменной соли мощностью до первых десятков метров занимают значительный объем в разрезе прорванных пород, начиная примерно с глубины 500 м; встречаются также прослой и линзы гипса, ангидрита и сепиолита [Харькив и др., 1998].

Анализ литературных [Владимиров и др., 1981; Харькив и др., 1998] и фондовых [Сафьянников, Судаков, 1981; Борис и др., 1985; Тирский и др., 1989, 1990, 1993; Ивашин и др., 1993] материалов свидетельствует, что основным элементом разломной структуры, вмещающей трубку Мир считается Параллельный разлом субмеридионального простирания. На верхних горизонтах данное нарушение представляет собой грабенообразную структуру шириной до нескольких сотен метров, а на глубине – залечено мощной дайкой долеритов. Параллельный разлом является

составной частью Виллюйско-Мархинской разломной зоны, которую ряд исследователей относит к глубинным нарушениям [Борис, Францессон, 1992]. Предполагается, что другие рудоконтролирующие элементы представлены разломами более низких порядков (локальные разломы).

Практически все исследователи подчеркивают, что структурный план участка локализации трубки Мир определяют разрывные нарушения север-северо-восточного (субмеридионального) (аз. прост. $10-30^\circ$) и северо-западного (аз. прост. $310-320^\circ$) направлений. Однако, относительно других элементов разрывной сети, мнения различных авторов существенно расходятся. Например, по данным Г.А. Тирского и В.А. Ивашина, наряду с субмеридиональными и северо-западными дизъюнктивами, определяющую роль в строении участка локализации трубки Мир играют субвертикальные разрывы субширотного (аз. прост. $75-85^\circ$) [Ивашин и др., 1993; Тирский и др., 1993] простирания. Другие [Шеремеев и др., 1993; Борис, Францессон, 1992], указывают на наличие северо-восточных (аз. прост. $50-60^\circ$) нарушений. И, наконец, согласно результатам группы Б.М. Владимирова [Владимиров и др., 1981], разрывная сеть участка определяется указанными выше разрывами субмеридионального и северо-западного простирания, а также дизъюнктивами запад-северо-западного (аз. прост. 280°) направления.

Большая часть приведенных данных отражает тектоническое строение вмещающих трубку отложений. Разрывная структура собственно кимберлитового тела охарактеризована гораздо в меньшей степени. В 70-х – 80-х годах прошлого столетия трещиноватость в кимберлитах трубки Мир на верхних горизонтах карьера была изучена группой Б.М. Владимирова [Владимиров и др., 1981]. Авторами было показано, что кимберлиты различных фаз отличаются по степени трещиноватости кимберлитов, а также сделан вывод о том, что строение сети разрывов в трубке определяют дизъюнктивы четырех систем: 1) северо-западной ориентировки (аз. прост. $310-320^\circ$, $\angle 80-90^\circ$), 2) северо-восточной (аз. прост. $40-50^\circ$, $\angle 80-90^\circ$), 3) субмеридиональной ориентировки ($\angle 80-90^\circ$) и 4) субгоризонтальные трещины.

Также все без исключения исследователи отмечают наличие трещин, связанных с внедрением и остыванием кимберлитового тела, выделяя при этом радиальные и

концентрические разрывы, что также усложняет строение трещинной сети участка локализации кимберлитового тела и собственно трубки. Однако масштаб этих дизъюнктивов невелик. Например, радиальные разрывы наиболее отчетливо проявлены вблизи контактов рудного тела и довольно быстро затухают как во вмещающих породах, так и в кимберлитовом теле. Концентрические разрывы также встречаются в непосредственной близости к рудному телу и отчасти наследуют отдельные сегменты тектонических разрывов.

В большинстве упомянутых выше работ отмечается, что разрывы субмеридиональной, субширотной и северо-западной ориентировок представлены ровными, прямолинейными трещинами (сколами). Для северо-западных дизъюнктивов наблюдается раскрытие и выполнение жилами кимберлита. Разрывы северо-восточного простирания, по [Владимиров и др., 1981] характеризуются неровными поверхностями и во многих случаях выполняются гидротермальными образованиями (кальцит, кварц, битум и др.). Кинематические характеристики разрывов различных направлений, формирующих разломный узел зачастую неясны. Наиболее уверенно установлены сбросовые смещения по частным сместителям Центрального разлома [Борис, Францесон, 1992; Харьков и др., 1998 и мн. др.]. При этом, по данным группы Г.А. Тирского, в верхних частях разреза для некоторых нарушений данного направления отмечается взбросовая компонента смещений [Тирский и др., 1993]. Кроме того, все авторы указывают на широкое развитие послонных срывов, смещающих вертикальные трещины и жилы. Также в верхних слоях разреза отмечались пликативные дислокации: приразломная складка волочения простиранием 30° (по [Ивашин и др., 1993] - флексура) и антиклинальная складка с простиранием 45° в зоне Параллельного разлома [Тирский и др., 1993].

Предложенные в тот период структурные модели формирования рудного тела также существенно различаются. Ряд авторов связывает становление кимберлитовой трубки с общим проявлением процессов растяжения в перпендикулярном направлении к зоне Параллельного разлома и усилению их на участках пересечения субмеридиональных и северо-западных нарушений [Борис, Францесон, 1992; Ивашин, 1993; Харьков и др., 1998 и многие др.]. Другие [Тирский и др., 1993; Гладков и др., 2008 и др.] предложили модель формирования кимберлитовой трубки Мир в локальной

структуре растяжения северо-западной ориентировки, возникающей в результате сдвиговых перемещений по сместителям Параллельного разлома. Необходимо отметить, что определение возможного механизма формирования тектонической структуры вмещающей кимберлитовую трубку Мир является принципиальным для решения задач, обозначенных в настоящей работе, поскольку именно от механизма зависят закономерности строения разрывной сети, характер раскрытия и заполнения дизъюнктивов различных направлений.

На рисунке 12 приведены геолого-структурные схемы изучаемого участка, составленные различными авторами. Следует отметить, что все они созданы по результатам изучения верхних горизонтов карьера трубки Мир. Представленные схемы в определенной мере различаются между собой даже по расположению и формам основных рудоконтролирующих разломов субмеридионального (зона Параллельного разлома) и северо-западного направлений. Остальные отличия отражают, главным образом, взгляды авторов на превалирование тех или иных систем разрывов в тектоническом строении участка. На наш взгляд, особенности формы трубки на глубине (на участке перехода в дайку (рис. 12, А, В)) и закономерности распределения кимберлитов различных фаз внедрения (рис. 12, В) позволяют сделать предположение о наличии в строении разломного узла, вмещающего кимберлитовое тело, крупных нарушений северо-восточного и восток-северо-восточного направлений.

В целом, различия в положении основных разломов участка на представленных схемах, скорее всего, зависят от того какие из горизонтов карьера были полнее изучены тем или иным исследователем. Разломы и дизъюнктивы более мелких рангов по-разному проявляются в различных породах, характеризуются наличием участков расширения и сужения, а также изменчивостью углов падения в вертикальном направлении. Поэтому двумерные схемы малопригодны для прогноза тектонической структуры на глубине, для этого необходим переход к объемным моделям.

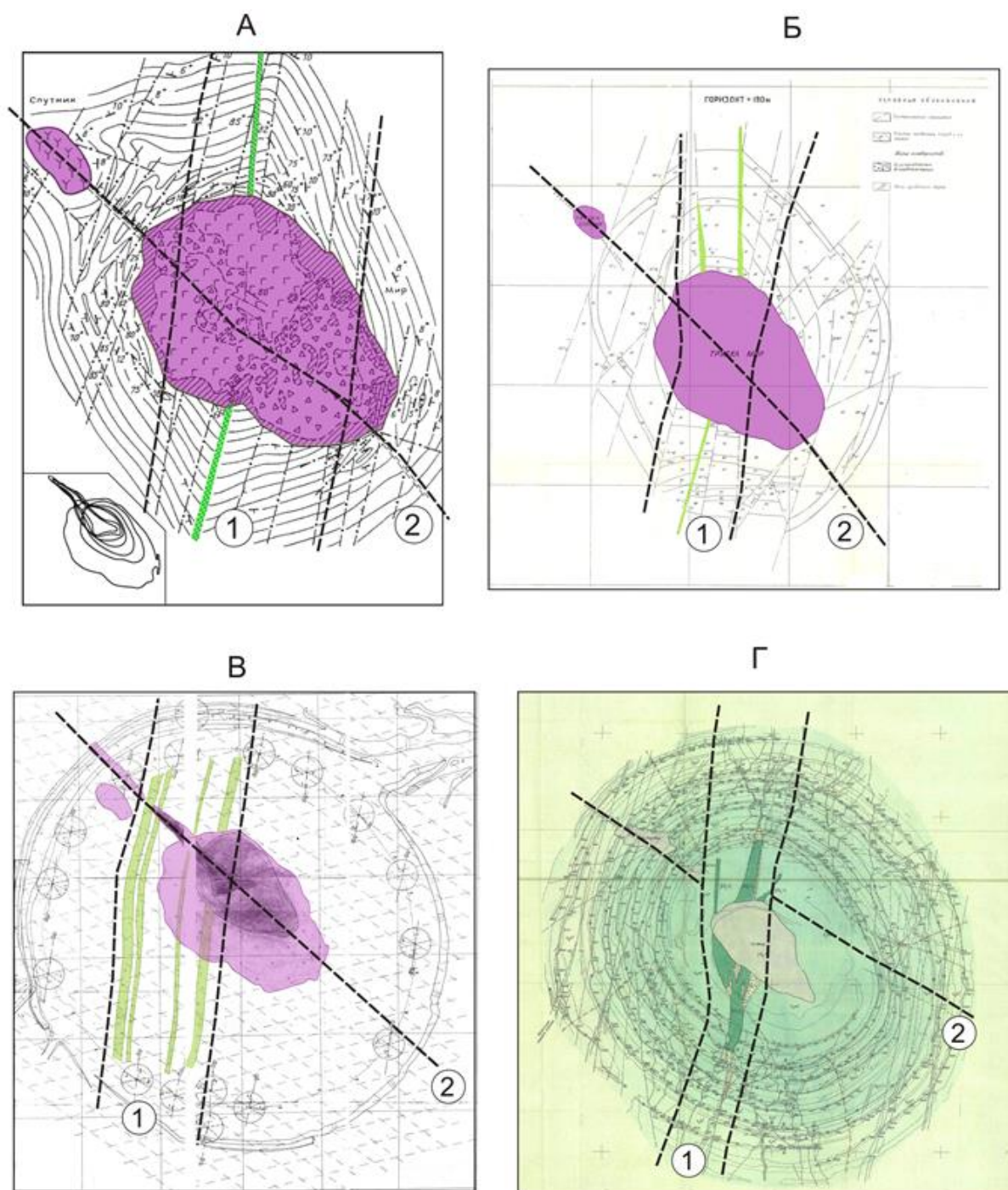


Рис. 12. Геолого-структурные схемы трубок Мир и Спутник по данным разных авторов. А – по (Харькив и др., 1998); Б – по (Шеремеев и др., 1993); В – по (Тирский и др., 1993); Г – по (Ивашин и др., 1993).

Зеленым цветом показаны дайки долеритов, фиолетовым – кимберлитовые тела. Цифры обозначают основные рудоконтролирующие структуры: 1 – зона Параллельного разлома субмеридионального простирания; 2 – разлом северо-западного направления.

Наиболее близко к решению данного вопроса для карьера трубки Мир подошла группа В.А. Ивашина [Ивашин и др., 1993], которая по результатам фототеодолитных

съемок создала псевдо-3D виды стенок карьера на юге и на севере (рис. 13). Данная работа в конце девяностых годов прошлого века, безусловно, носила пионерный характер, но ее результаты уже мало отвечают современным требованиям.

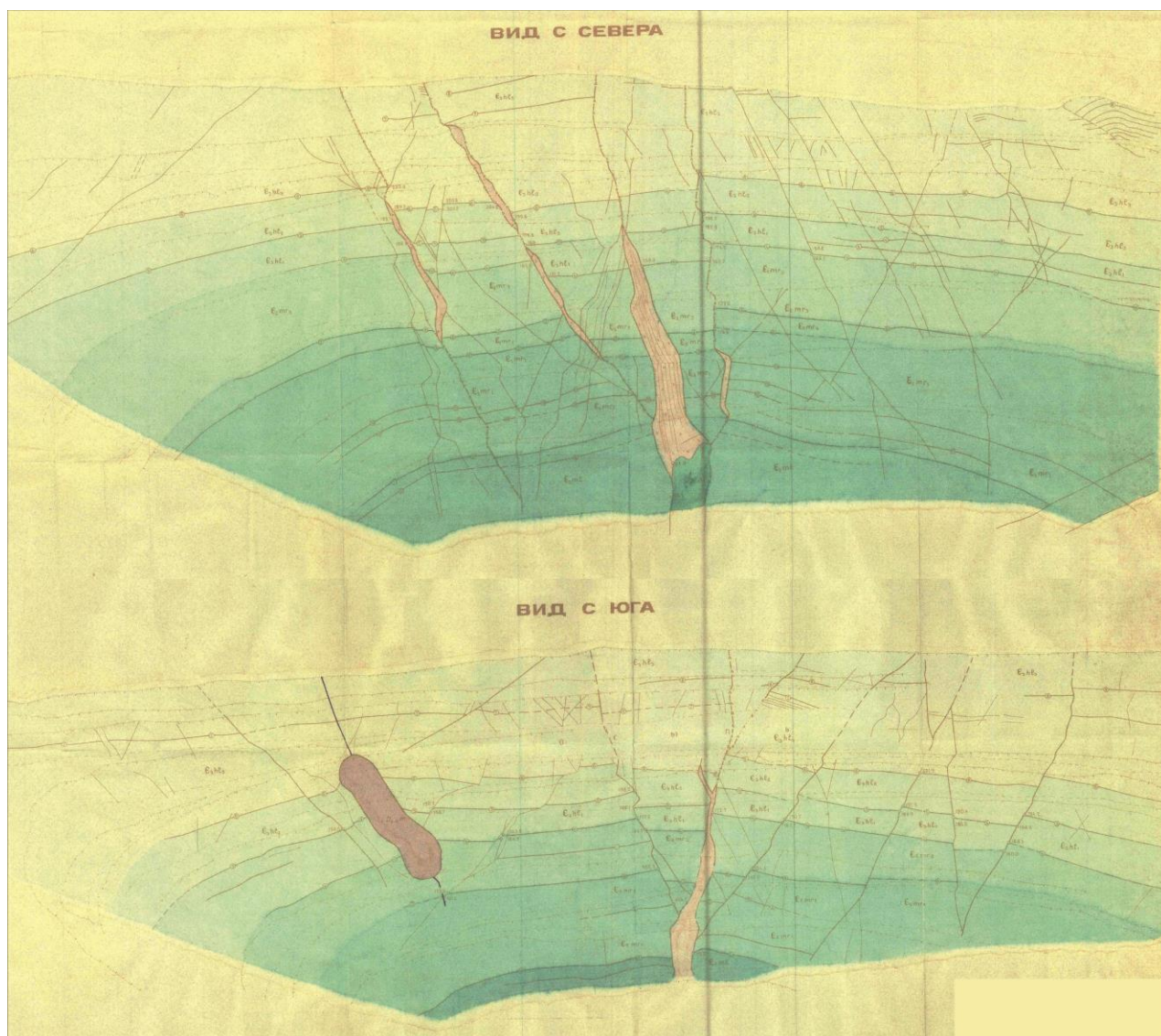


Рис. 13. Псевдо-3D виды северного и южного бортов карьера трубки Мир по результатам интерпретации материалов фототеодолитных съемок [Ивашин и др., 1993].

Таким образом, обзор предыдущих работ показывает, что структурный план участка локализации трубки Мир определяют разрывные нарушения север-северо-восточного (субмеридионального) и северо-западного направлений. Однако, относительно других элементов разрывной сети, мнения различных авторов существенно расходятся. Поэтому необходимо изучение разрывных нарушений с помощью современных методик и создание объемной геолого-структурной схемы

изучаемого участка. При этом должен решаться ряд практических задач, направленных на картирование разломных зон в пределах выработок действующего рудника Мир. Последующий анализ был направлен на восстановление динамики развития и активизации разломной сети и увязки ее с этапами становления кимберлитовой трубки. Это позволило построить разломно-блоковую схему участка локализации месторождения, предложить модель ее функционирования на рудном этапе и сформулировать поисковые признаки для объекта типа трубки Мир. Кроме того, были проанализированы структурные данные, собранные группой А.С. Гладкова в 2002-2004 гг. на площади Мало-Ботуобинского района. Структурное дешифрирование топографических материалов масштаба 1:100000 и 1:200000 для площади Мирнинского поля и сопряженных с ним территорий Мало-Ботуобинского района послужило основанием для предполагаемых разломных структур, которые в силу тех или иных причин не фиксируются в геофизических полях. Для проверки и уточнения геолого-структурных моделей использовались экспериментальные методы.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных задач были использованы полевые и экспериментальные тектонофизические методы, а также приемы структурного дешифрирования топографических материалов.

2.1. Полевые геолого-структурные и тектонофизические методы

Включали в себя комплекс методических разработок и приемов, направленных на полевое изучение зон разломов, картирование основных элементов их внутреннего строения и восстановления полей тектонических напряжений. Основой для реализации этих методов служат, создаваемые в процессе полевых работ точки наблюдений, в пределах которых выполняется комплекс однотипных тектонофизических и структурно-геологических измерений, таким образом, чтобы создать регулярную сеть точек. При работе в руднике месторождения трубка Мир стандартная точка наблюдений представляла собой отрезок стенки горной выработки (на определенном горизонте) протяженностью от 10 до 20 м. Природные скальные выходы имели различные размеры, составляющие от 2 до 10 и более метров по протяженности и от 1 до 10 м по высоте.

Схема производства наблюдений [Гладков и др., 2008; Семинский К.Ж, 1994], включает в себя привязку точки на плане, определение основных систем трещин и измерение элементов их залегания. Кроме того, документировались взаимоотношения трещин друг с другом. Далее на точке наблюдения проводилось изучение дизъюнктивных структур более крупного по отношению к трещинам масштаба, т.е. локальных разрывных нарушений, если таковые присутствовали в обнажении. Документация их подразумевала измерение элементов залегания, характеристику особенностей вещественного и структурного заполнения, типа контактов с вмещающей средой, морфологию сместителей, а также обязательное измерение количественных параметров (видимая мощность, амплитуда и тип смещения, расстояние между сместителями, если их несколько, и другие). При этом проводилась классификация разрывных нарушений по двум признакам. Во-первых, в зависимости от угла наклона к горизонту они относились к одной из трех групп: 1) субвертикальные (углы наклона 60-90°); 2) наклонные (30 – 59°); 3) субгоризонтальные нарушения (менее 29°). Во-вторых,

с учетом масштаба проявления в изучаемом выходе (т.е. в зависимости от наблюдаемой ширины): 1) менее 1 м; 2) от 1 до 10 м; 3) более 10 м. Вторая классификация носит условный характер и призвана помочь оценить возможную протяженность и ранг зафиксированного разлома.

Затем, в точках, где позволяли условия для безопасного проведения работ, производился массовый замер элементов залегания трещин. При этом измерялись все трещины в пределах произвольно выбранной документируемой площадки с обязательным указанием их генетической разновидности (сколовая или отрывная). Особое внимание при замерах в пределах техногенных выработках уделялось выявлению тектонических трещин, которые возникли в процессе проведения взрывных работ и по этой причине в массовый замер не включались. Общее количество измеряемых трещин в точке, зависело от размеров коренного выхода и изменялось, в зависимости от конкретной ситуации от 30 до 100 штук. Кроме перечисленных характеристик, фиксируемых для всех без исключения дислокаций, для некоторых из них проводились специальные наблюдения, связанные с наличием признаков перемещения блоков горных пород по поверхности трещины. В этом случае документировались не только ориентировки штрихов (или борозд) и давалось описание самой поверхности скольжения (морфология, распределение заполнителя по плоскости и т.д.), но также определялся (если это было возможно) знак смещения по трещине.

Особое внимание уделялось получению количественных характеристик трещинной сети. Во-первых, оценивалось среднее расстояние между трещинами соизмеримой длины для каждой из систем, что в дальнейшем, позволяет рассчитывать два важных показателя, характеризующих особенности блоковой делимости того или иного участка горного массива:

1. Γ_i - густоту каждой системы или линейную плотность, измеряемую количеством трещин, секущих заданное расстояние нормали к их плоскостям.

2. P - объемную плотность (количество трещин соответствующего ранга на выбранную единицу объема 1 м^3 или 10 м^3) по формуле [Методика изучения..., 1969]:

$$P = \sum_{i=1}^n \Gamma_i \quad (1)$$

где: n - количество зафиксированных в точке наблюдения систем трещин.

Во-вторых, фиксировались параметры отдельных трещин (длина, зияние, амплитуда смещения и другие характеристики).

Кроме дизъюнктивных структур, на точке наблюдения описывались (в случае их наличия) другие структурные формы такие, как складки, будины, линейность и т.д.

Собранная таким образом информация сводилась в специализированную табличную форму. Для их обработки и анализа использовалась программа RockWorks15, а также оригинальная разработка лаборатории тектонофизики – программный комплекс Structure, предназначенная для построения, обработки и анализа структурных диаграмм по замерам трещин и разрывных нарушений. В ней, помимо визуализации диаграмм, реализованы основные методы выделения и анализа сопряженных систем трещин [Гзовский, 1975; Николаев, 1977, 1992]. С развитием сколовых разрывов часто происходит формирование закономерного разброса в их ориентации (рис. 14), в которых разбросы сопряжённых пар противоположны друг другу [Николаев, 1992]. После выделения сопряжённых систем трещин дальнейшие построения выполнялись по методу М.В. Гзовского. Для определения линий смещения – метод В.Н. Даниловича [Данилович, 1961].

Для построения объёмной модели разломно-блоковой схемы использовалась программа AutoCAD, а для оформления всех рисунков применялся CorelDraw.

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

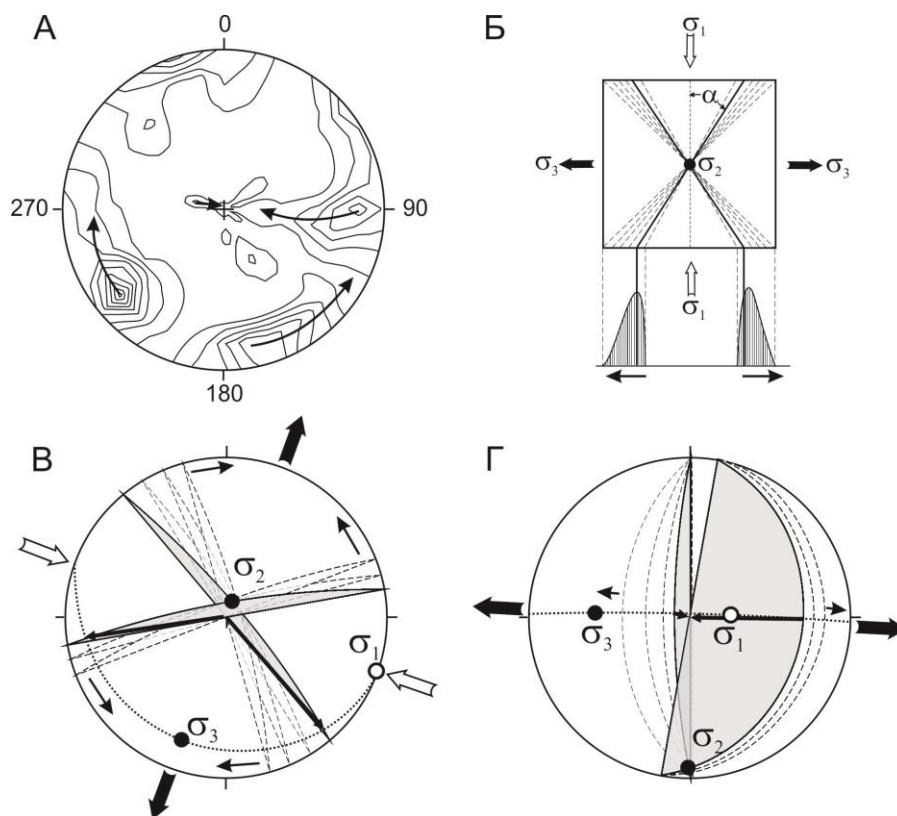


Рис. 14. Пример определения сопряжённых систем трещин, реконструкции осей главных нормальных напряжений и кинематики смещений по разрывам с помощью методов П.Н. Николаева [1977, 1992] и М.В. Гзовского [1975].

А – диаграмма трещиноватости; стрелки показывают направление преобладающего разброса в максимумах трещиноватости, указывающего на сопряжённость систем по методу П.Н. Николаева; проекция верхней полусферы, количество замеров 100, размер окна 10° ; Изолинии проведены через 0,5; 2,5; 4,5% и более; Б – схема развития разброса трещин, показанных пунктиром, под воздействием сжатия (σ_1) и растяжения (σ_3), по П.Н. Николаеву [1992]; В, Г – диаграммы ориентировки векторов главных нормальных напряжений с установленными направлениями смещений по сопряжённым трещинам (показаны стрелками внутри сколовых плоскостей); σ_1 – ось сжатия, σ_2 – промежуточная ось, σ_3 – ось растяжения.

2.2. Методы структурного дешифрирования

Представляют собой комплекс приемов направленных на выявление и характеристику линеаментов, под которыми понимается совокупность всех линейных элементов рельефа и растительного покрова, являющихся отражением дизъюнктивных структур разных рангов [Гольбрайх и др., 1968; Амурский и др., 1988]. Исходными материалами для линеаментного анализа послужили топографические карты масштаба 1:100000 и 1:200000. Структурное дешифрирование было направлено, во-первых, в распознавании на анализируемых материалах ландшафтных особенностей местности,

свидетельствующих о наличии тектонических нарушений и, во-вторых, в определении параметров этих нарушений. Выделение линеаментов, соответствующих разрывам различного ранга, производилось на основе геоморфологических и комплексных признаков.

Геоморфологические признаки включали в себя следующие линейные объекты [*Методическое руководство, 1978; Никонов, 2003; Структурное дешифрирование..., 1981*]:

- спрямленные участки и коленообразные изгибы речных долин (постоянных или/и временных водотоков), являются одним из главных индикаторов разрывных нарушений в закрытых районах;

- денудационные гряды, образующие в рельефе в случае приуроченности к разрывному нарушению пород, наиболее крепким к процессам денудации по сравнению с вмещающими (дайка, жила, минерализованная брекчия дробления);

- уступы – проявляются вдоль разрывного нарушения, во-первых, когда по разрыву происходят или имели место в недалеком прошлом вертикальные тектонические подвижки, вызванные расположением контактирующих блоков на разных гипсометрических уровнях, во-вторых, когда по дизъюнктиву соприкасаются породы, резко различающиеся по своей устойчивости к процессам денудации;

- понижения (западины, потяжины, карстовые воронки, рвы) – образуются вдоль разлома за счет выноса рыхлого материала из зоны дробления, а также растворения или суффозионной просадки в зоне усиленного водообмена, связанной с разрывным нарушением.

Комплексные признаки были направлены на выделение линеаментов и линеаментных зон по различию ландшафтных обстановок в разломной зоне или в крыльях. Например, изменение элементов ландшафта (рельеф, рисунок гидросети, густота и состав растительности, почвенного покрова и т.д.) по разные стороны от линейной границы обычно обусловлено соприкосновением по разрыву толщ, различающихся по составу и физико-механическим свойствам. Индикаторами разрывных нарушений могут служить линейные границы лесных массивов, болот, берегов озер, растительных ассоциаций, эоловых образований и других природных объектов.

Полученные результаты не противоречат мелкомасштабным данным дистанционного зондирования [Серокуров, 1995, 2001].

2.3. Экспериментальные тектонофизические методы

Представлены методом поляризационно-оптического моделирования, используемые для изучения специфики перераспределения поля напряжений в окрестностях разрывов. Применение в качестве модельного материала упругого желатинового студня позволяет воспроизводить в моделях стационарные поля напряжений и деформаций. Основной особенностью метода является специфика напряженного состояния, когда главные нормальные напряжения лежат в горизонтальной плоскости модели [Фрохт, 1948; Осокина, 1963; Александров, Ахмедзянов, 1973]. Наблюдаемая картина цветных (изохром) и черных (изоклин) полос в деформируемой модели, соответствует напряжённому состоянию, расположенная между скрещенным поляризатором и анализатором. Изохромы – это полосы одинаковой окраски с равными величинами разности хода, пропорциональной разности квазиглавных (для направления просвечивания) напряжений. Изоклины – это система темных полос, в которых главные направления параллельны осям поляризатора и анализатора поляриметра. Метод поляризационно-оптического моделирования позволяет изучить ориентацию главных нормальных напряжений, а также особенности распределения и концентрации максимальных касательных напряжений.

Исследования проводились на оборудовании лаборатории тектонофизики Института земной коры. Установка для моделирования, состоит из полярископа-поляриметра ПКС-250 и деформационного стола, позволяющего прикладывать к моделям различные виды нагрузки (рис. 15). Для моделирования использовались студни оптически активного материала – желатина (желатин фотографический активный, марки А). Свойства желатиновых студней детально охарактеризованы в работе Д.Н. Осокиной [1963]. Желатиновая модель нарушенная системами разрывов заданной конфигурации, при деформации которой происходило формирование сложной структуры локальных полей максимальных касательных напряжений, ответственной за формирования тела кимберлитовой трубки. В связи с тем, что физические и оптические свойства модельного материала существенно меняются с течением времени, при проведении

экспериментов соблюдалось строгое единообразие при изготовлении моделей в каждой серии опытов.

Все модели приготавливались по единой методике. Желатин расплавлялся на водяной бане, заливался в специальную форму (размер - 0.02×0.3×0.45 м) для застывания и выдерживался в ней 22 часа. Моделирование осуществлялось через 30 минут после извлечения модели из формы. Опытным путем была установлена оптимальная для проведения экспериментов концентрация желатина, она составляла 25%. Непосредственно перед проведением эксперимента производилась тарировка модели, в процессе которой определялось соотношение деформации и разности хода лучей (цвета модели при скрещенных николях поляризатора и анализатора). Это было необходимо для дальнейшего выявления участков относительного увеличения и уменьшения значений максимальных касательных напряжений (τ_{\max}), вызванного внесением в модель неоднородностей в виде разрывов и их сочетаний. За фоновое значение τ_{\max} приняты границы распространения в нагруженных моделях оранжевого и красного цветов.



Рис. 15. Общий вид оборудования для поляризационно-оптического моделирования.

После проведения тарировки на модель переносился рисунок сети наиболее крупных разрывов, рассекающие всю толщу вмещающих пород. Таким образом, учитывались особенности разломно-блокового строения земной коры. Все разрывы наносились в виде вертикальных прорезей на всю толщину модели со смазкой их поверхностей водой. В ходе эксперимента картина распределения в моделях цветов (изохромы и изоклины), необходимая для изучения напряженного состояния, фиксировалась цифровым фотоаппаратом для последующей обработки полученных результатов. Метод имеет определённые ограничения не позволяющий воспроизводить горизонтальные и/или наклонные разрывы в модели, так как реализовывалось плоское напряжённое состояние [Александров, Ахмедзянов, 1973]. Но для изучения субвертикальных разрывных нарушений и выявления участков локальных структур растяжений его вполне достаточно.

На рис. 16 приведена схема строения локальных полей максимальных касательных напряжений (τ_{\max}) в окрестностях разломов, составляющих структуру кимберлитовой трубки Мир в поле одноосного сжатия.

В работах М.В. Гзовского [Гзовский, 1975], Д.Н. Осокиной [Осокина, 1963] и других исследователей подробно описаны локальные поля максимальных касательных напряжений, характеризующихся закономерно расположенными областями увеличения или уменьшения τ_{\max} относительно фонового напряжения. Например, в публикации [Мирошниченко, 1989], выделяются пять основных типов локальных полей максимальных касательных напряжений различной степени концентрации по расположению их относительно разрывов. Три максимума: концевой - области интенсивного увеличения τ_{\max} вблизи концов трещин, боковой - области умеренного увеличения τ_{\max} по бокам разрывов или между их концами на удалении от плоскости разрывов, узловой - области значительного увеличения τ_{\max} напряжений вблизи пересечения разрывов. Два минимума: концевой - сопровождающие концевые максимумы области умеренного снижения напряжений τ_{\max} , боковой - области значительного снижения напряжений τ_{\max} , расположенные по бокам разрывов, примыкая к ним.

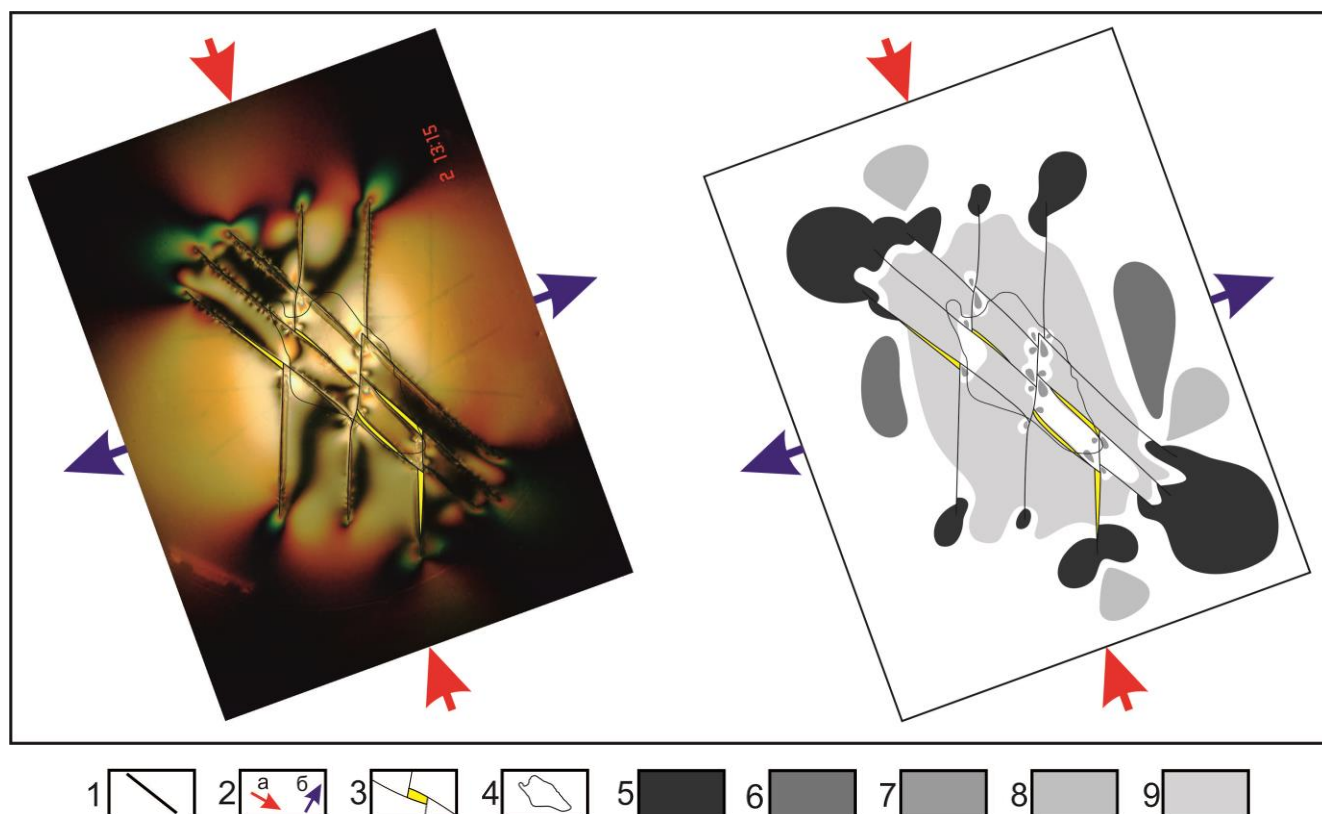


Рис. 16. Схема строения локальных полей максимальных касательных напряжений в окрестностях разломного узла, вмещающую кимберлитовую трубку «Мир» при сжатии 340° , растяжении 70°

1 - разрывы; 2 - ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 - раскрытия разломов; 4 - контур кимберлитовой трубки; максимумы: 5 - концевой, 6 - боковой, 7 - узловой; минимумы: 8 - концевой, 9 – боковой.

Анализ выделенных типов локальных полей максимальных касательных напряжений позволяет получить определённую информацию. Так, концевые максимумы в зависимости от формы и положения относительно разрывных нарушений отражают особенности подвижек или перемещений по ним. В свою очередь особенности деформации блоков, вычленяемых разломами, определяются боковыми и узловыми максимумами и боковыми минимумами.

В целом структура максимальных касательных напряжений в окрестностях трубки Мир определяются двумя типами полей: концевыми максимумами и боковыми минимумами.

Из-за близкого расстояния и совместной активизации разрывы северо-западного простирания выступают как единая структура. Практически все концевые максимумы имеют раздвиговый тип подвижек за исключением южного окончания северо-западных

разломов, который характеризуется сдвигом с поджатием. В пределах центральной части наблюдается область снижения напряжения (боковой минимум), имеющий эллипсообразную форму, где расположены места пересечения всех разломов. На фоне этого минимума существует локальные узловые максимумы.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРНОГО КОНТРОЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТРУБКИ МИР

3.1. Особенности строения разрывной сети месторождения трубки Мир

Для решения поставленных задач в пределах горизонтов рудника «Мир» (от абс. отм. -210 до -310) было создано 83 точки специализированных геолого-структурных наблюдений (рис. 17) в которых было измерено и охарактеризовано более 1200 тектонических трещин и зон разрывных нарушений локального ранга.

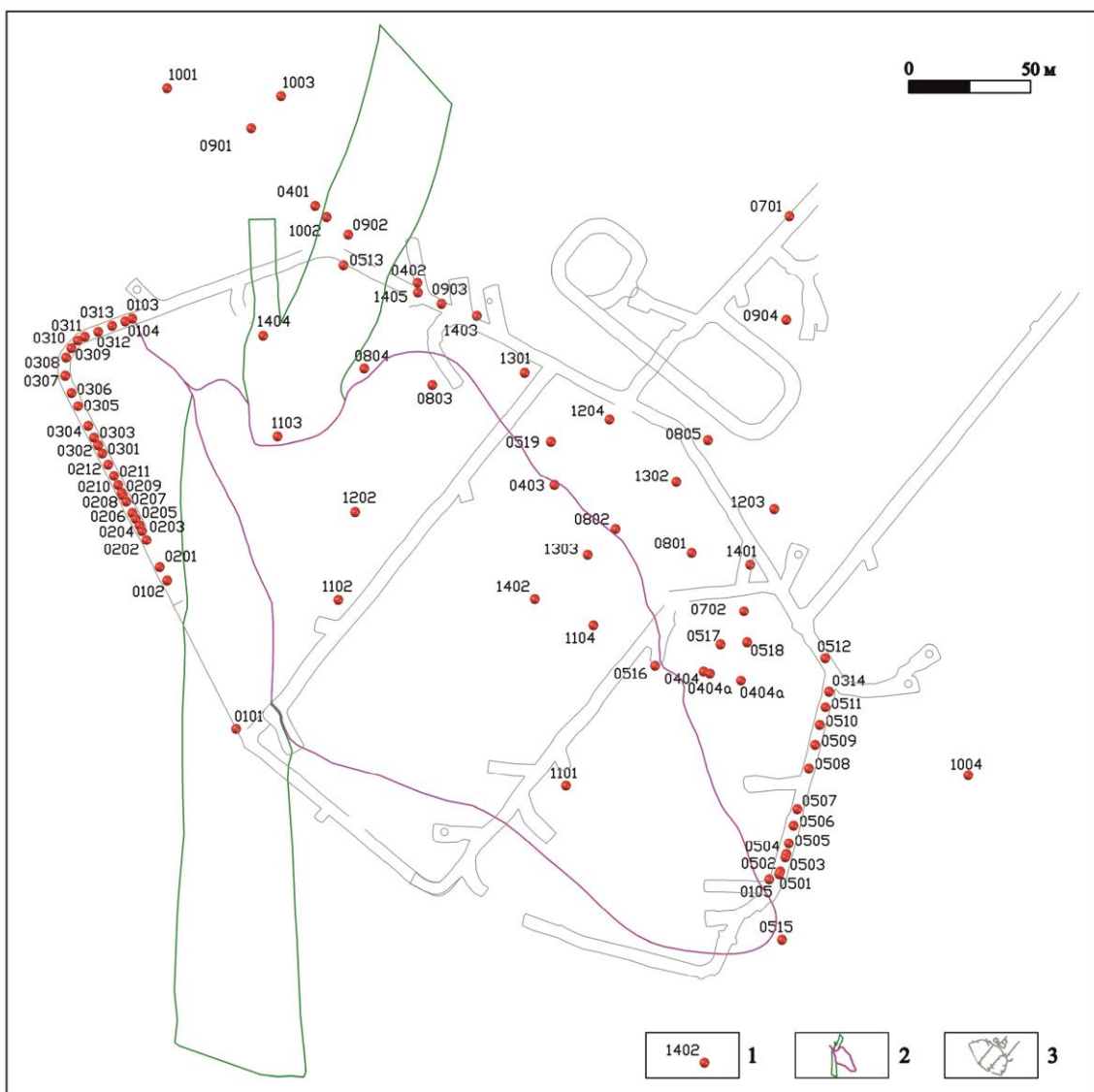


Рис. 17. Схема расположения точек геолого-структурных наблюдений в руднике «Мир»

1 – точки геолого-структурных наблюдений и их номера; 2 – контур рудного тела и дайки долеритов на гор. – 210 абс. м.; 3 – горные выработки на гор – 210 абс. м.

Следует отметить, что, в отличие от терригенно-карбонатных отложений и долеритов, при работе в пределах солевых толщ для наблюдений были доступны только наиболее крупные трещины и зонки тектонических нарушений мощностью от первых до десятков сантиметров. Мелкие разрывы в соли ввиду высокой пластичности и текучести материала быстро залечиваются и не фиксируются. Поэтому основной задачей при изучении соляных пластов в стенках горных выработок было выявление крупных трещин и зон нарушений, их привязка на маркшейдерском плане, измерение их элементов залегания и характеристика взаимоотношений разрывов различных направлений. 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.

Полученные данные показали, что в тектоническом строении месторождения основную роль играют субвертикальные (углы падения 60° и более) и субгоризонтальные (углы падения менее 30°) тектонические трещины и разрывные нарушения различной мощности.

3.1.1. Субвертикальные нарушения

Особенности пространственного расположения задокументированных субвертикальных разрывных нарушений приведены на схеме (рис. 18, б). Роза-диаграмма простираний зафиксированных нарушений (рис. 18, а) показывает, что среди них преобладают дизъюнктивы северо-западного (аз. прост. $320-340^\circ$ и $290-310^\circ$), субмеридионального (аз. прост. $350-20^\circ$) и северо-восточного (аз. прост. $30-60^\circ$) простираний. Нарушения восток-северо-восточной и широтной ориентировок (аз. прост. $70-90^\circ$) встречались реже.

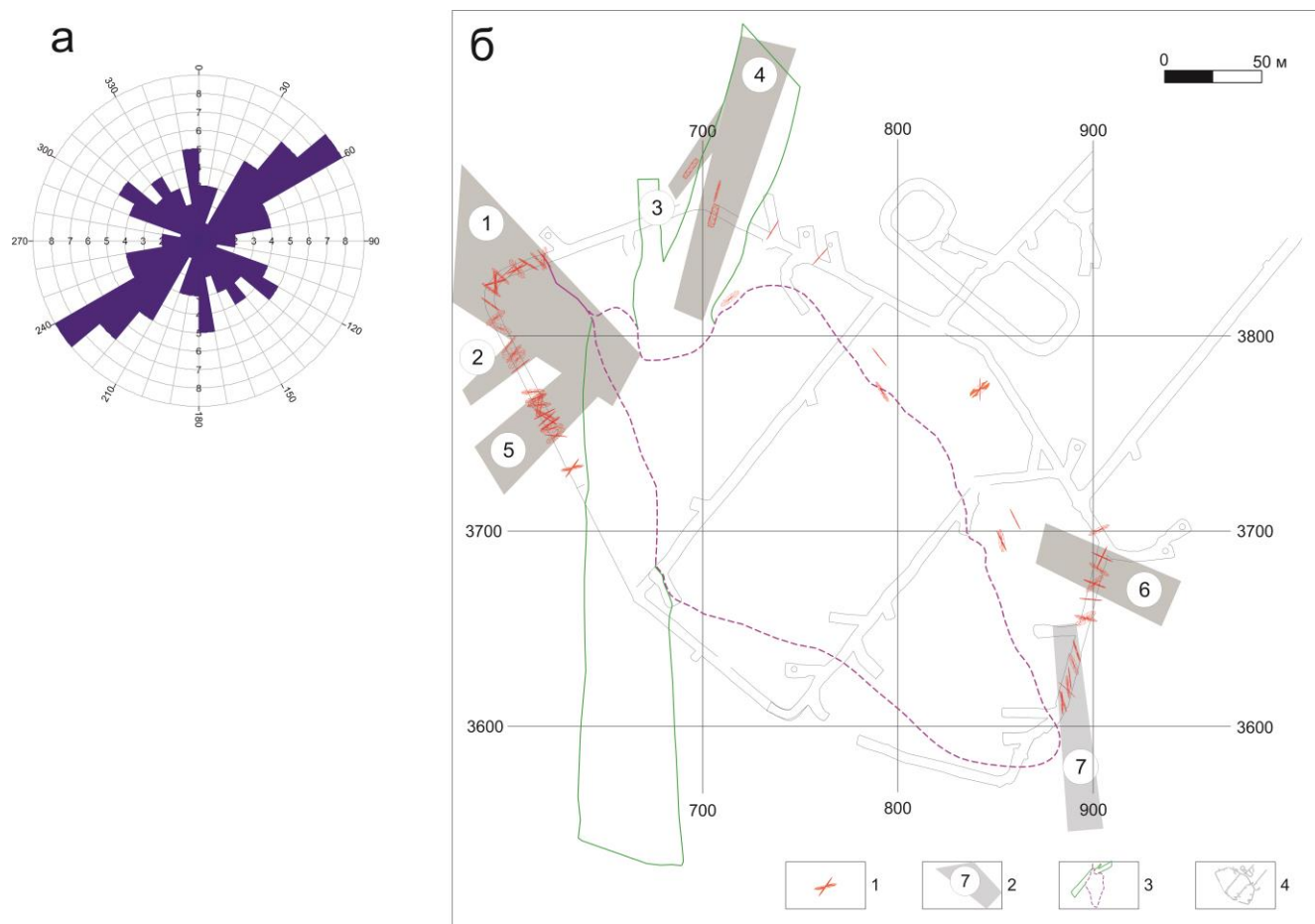


Рис. 18. Особенности распределения субвертикальных разрывных нарушений (б) задокументированных в точках наблюдения на руднике Мир и основные их направления (а).

1 - разрывные нарушения (в виде проекций дисков, толщина диска - пропорциональна мощности нарушения); 2 – предполагаемые зоны разломов; 3 – контур рудного тела и дайки долеритов на гор. – 210 абс. м.; 4 – горные выработки на гор. – 210 абс. м.

Анализ схемы показывает, что большая часть зафиксированных субвертикальных зон нарушений характеризуются мощностями в первые десятки сантиметров. Это, как правило, дизъюнктивы в толщах соли. Наиболее значительные нарушения (зоны трещиноватости и дробления мощностью 2 и более м.) наблюдались в пределах дайки долеритов и вблизи ее контактов (рис. 18, б). Указанные различия в мощностях нарушений отражают различия физико-механических свойств горных пород, в которых проявляются дизъюнктивы данного ранга. Большая часть маломощных нарушений наблюдалось в пределах соляных отложений на горизонтах -210 – -235 абс. м. Данная особенность обусловлена тем, что в “свежих” выработках трещины и разрывы в соли

затушеваны следами механического воздействия комбайнов. В выработках существующих достаточно долгое время, вследствие воздействия влаги и способности соли к пластическому течению, механические следы нивелированы и разрывы хорошо прослеживаются. В случаях значительных смещений по дизъюнктивам данного ранга они уверенно выделялись и на глубоких горизонтах (до - 310 абс. м.).

Наибольшее количество субвертикальных разрывных нарушений было зафиксировано вблизи северо-западного и юго-восточного окончаний рудного тела (рис. 18, б). Также разрывные нарушения были отмечены по восточному (северо-восточному) контакту кимберлитовой трубки и в приконтактных объемах вмещающих пород. Вдоль южного (юго-западного) контакта тела наблюдения дизъюнктивов данного ранга отсутствуют. Однако данный факт обусловлен тем, что выработки в этой части месторождения есть не на всех горизонтах, а на тех, где имеются – они, как правило, недоступны для наблюдений по соображениям безопасности.

Полученные данные по распределению субвертикальных разрывных нарушений и наличию участков их сгущения, позволяют предположить наличие нескольких фрагментов разломных зон (рис. 18, б). Это, прежде всего, разломы северо-западного простирания (зоны 1 и 6) вдоль которых ориентирована длинная ось кимберлитового тела. Зоны 2, 3 и 5, соответствующие разломам северо-восточной ориентировки, просматриваются у северо-западного окончания трубки. И, наконец, фрагменты субмеридиональных разломов (зоны 4 и 7 на рис. 18, б). Один из них трассируется дайкой долеритов на западном фланге месторождения (зона 4), другой – расположен на востоке у юго-восточного окончания рудного тела.

3.1.2. Субгоризонтальные нарушения

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).

Расположение задокументированных субгоризонтальных нарушений в плане и в разрезе показано на рис. 19. Также как и субвертикальные нарушения они были зафиксированы, главным образом, на севере, северо-востоке и юге месторождения. Их

положение в разрезе показывает, что наряду с разрывами, проявленными вдоль напластования во вмещающих породах, встречаются нарушения имеющие наклон в 20 - 30°. 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]. Наличие таких слабонаклонных нарушений наряду с субвертикальными нарушениями обеспечивает перемещение подземных и поверхностных вод по вертикали.

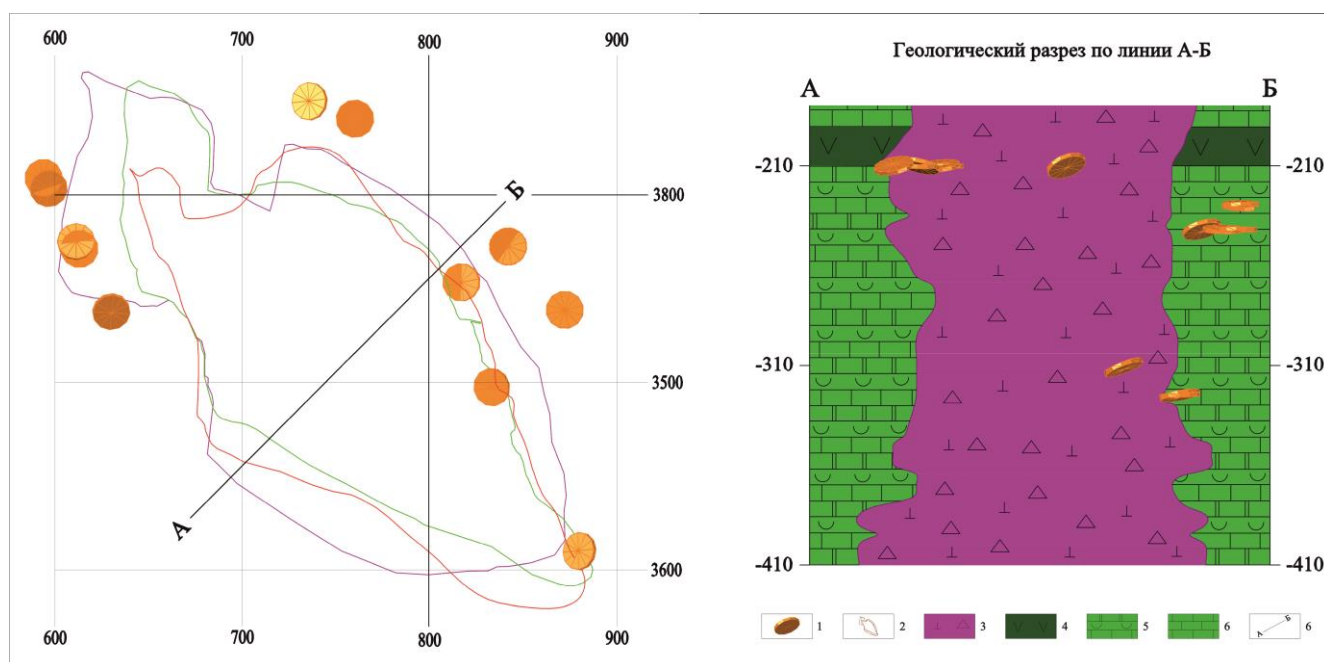


Рис. 19. Особенности распределения на плане (а) и в разрезе (б) субгоризонтальных разрывных нарушений задокументированных в точках наблюдения на руднике Мир. 1 – положение плоскостей разрывных нарушений; 2 – контур рудного тела: -210 (красный), -310 (зелёный), -410 (фиолетовый); 3 – рудное тело; 4 – sill долеритов (βPZ); 5 – галогенно-карбонатная толща (ε₁сг); 6 – доломиты, известняки, гипс-ангидриты (ε₁₋₂ic); 7 – поперечная линия геологического разреза.

Очевидно, что полученные по собранным данным схемы, отражающие положение в горном массиве разрывных нарушений (рис. 18, б и рис. 19, а), в силу ряда объективных причин (невозможность прямых наблюдений разрывных нарушений в пределах закрытых участков горизонтов) не отражают полной картины распределения структур данного ранга и, соответственно, их недостаточно для построения разломно-блоковой схемы месторождения. Поэтому с целью выявления и прослеживания

разломных зон строения был проведен дополнительный анализ тектонической трещиноватости.

3.1.3. Анализ тектонической трещиноватости

Трещины являются наиболее мелкими разрывными структурами доступными для наблюдения в стенках горных выработок. Разрывы тектонической природы выделялись на основе следующих предпосылок: во-первых, разрывы данного генезиса наиболее многочисленны в природе и присутствуют в любом макрообъеме горных пород; во-вторых, они в большинстве случаев представляют собой сколы и, следовательно, имеют внешние отличия от других трещин (усыхания, техногенных и т.д.), являющихся преимущественно отрывами с характерными структурами роста на плоскостях; в-третьих, дополнительным признаком для отрывных структур служило наличие минерального заполнения. Для построения схемы 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 использовались разработки лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН, хорошо зарекомендовавшие себя при работах подобного типа. Главной из них была методика анализа пространственного распределения в пределах изучаемой площади структурных парагенезисов, состоящих из трех примерно перпендикулярных друг другу систем тектонических трещин. Подобные парагенезисы, как известно [Семинский и др., 2005; Гладков и др., 2008], образуют основу трещинных сетей вблизи разломов разного типа и ранга. В связи с этим методика позволяет выявлять разломные зоны по распространенности в сближенных точках наблюдения одноориентированных троек-систем трещин.

В подземных выработках изучаемого месторождения удалось сделать 16 массовых замеров (рис. 20). В каждой из которых были измерены элементы залегания от 30 до 100 трещин. Согласно методике [Семинский и др., 2005] 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 систем разрывов. Первая из них является указанием на то, что точка наблюдения расположена в зоне разлома, элементы залегания которого близки к элементам залегания главной системы.

Из представленных данных (см. рис. 20) на каждой из диаграмм присутствует тройственный парагенезис систем трещин, а для четырех из них было выделено два таких парагенезиса. Последний случай отвечает разломному узлу. Большинство троек образовано двумя субвертикальными (главная и второстепенная) и одной близгоризонтальной (дополнительная) системами трещин. Данный тип характерен для развития разлома в условиях сдвига. Реже отмечаются тройки, у которых два максимума (основной и второстепенный) отвечают системам с углами наклона в $40 - 70^\circ$, а третий (дополнительный) – системе с близвертикальным падением. Подобные тройки свидетельствуют о наличии в истории становления разлома взбросовых или сбросовых смещений.

Как указывалось выше, для каждой из троек были определены максимумы, соответствующие основной системе трещин с элементами залегания, близкими к элементам разломной зоны, которой соответствует тройка (см. рис. 20). Затем на схеме в каждой из точек, где были выполнены массовые замеры, были вынесены полосы, соответствующие простирацию основной системы тройственного парагенезиса и, как следствие - предполагаемой разломной зоны. Результаты выполненных построений (рис. 20) подтверждают существование крупного субмеридионального разлома на западном (северо-западном) фланге месторождения, а также указывают на наличие разлома вдоль северо-восточного контакта рудного тела. Кроме того, полученные данные позволили наметить ряд фрагментов предполагаемых разломов субширотной, северо-западной и северо-восточной ориентировок, что в дальнейшем было использовано при комплексном анализе данных для построения схемы разломно-блокового строения месторождения.

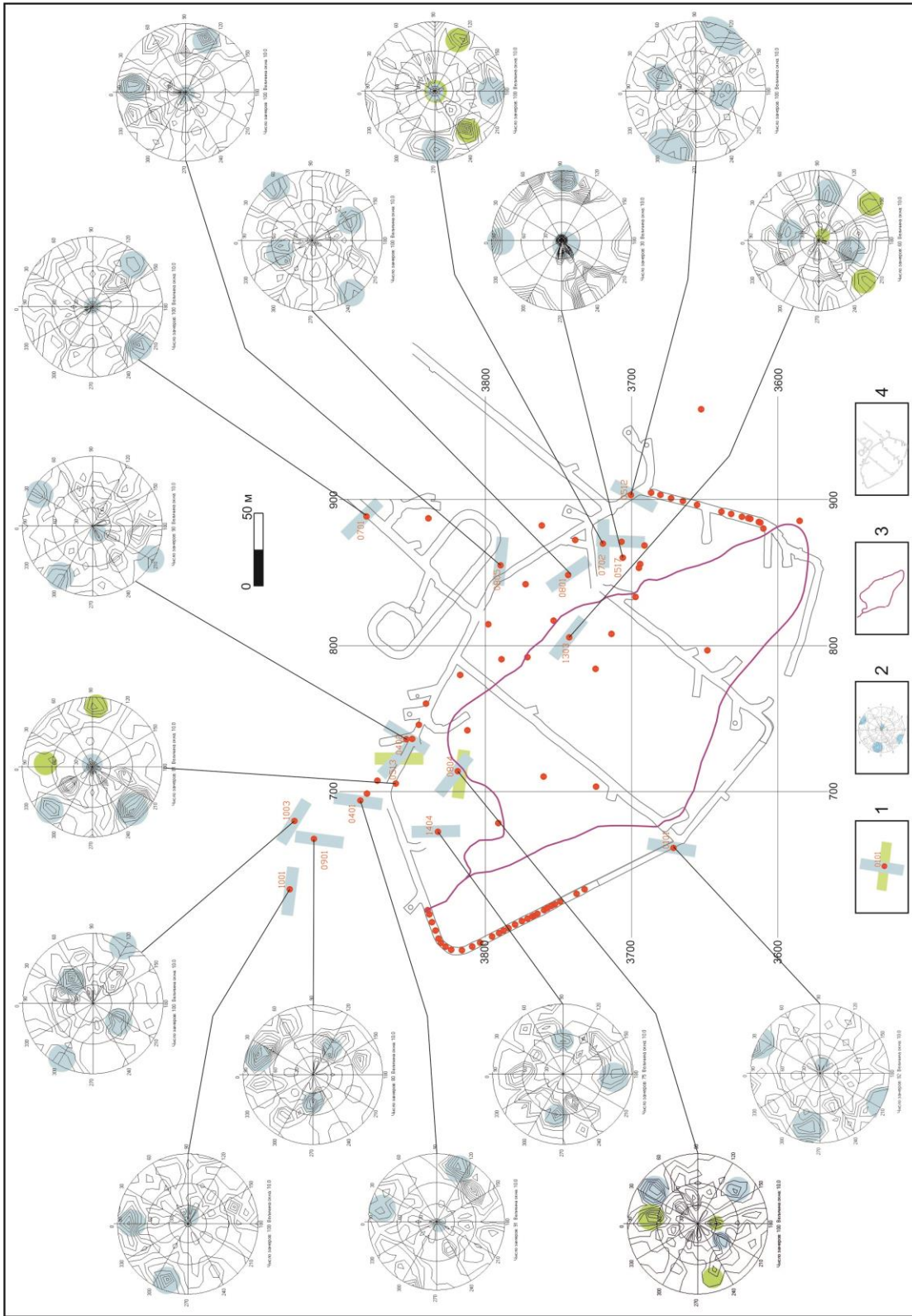


Рис. 20. Результаты анализа массовых замеров тектонических трещин.

1 – ориентировка разрывного нарушения в зоне которого расположена точка с массовым замером; 2 – структурная диаграмма и тройственный парагенезис на ней; 3- контур рудного тела на гор. – 210 абс. м.; 4 – горные выработки на гор. – 210 абс. м..

Кроме того, были рассмотрены данные, характеризующие густоту систем трещин. Для данного вида анализа использовались замеры элементов залегания основных систем трещин производимые при общей характеристике каждой из точек наблюдения. То есть здесь используются замеры крупных и средних трещин образующих систему и измерение расстояний между ними. Этим он отличается от массового изучения, в процессе которого производился статистический замер всех трещин с последующим построением структурных диаграмм.

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 может свидетельствовать о наличии разломных зон [Шерман, 1977]. Выбор для рассмотрения субвертикальных дизъюнктивов основывался на закономерностях строения разрывной сети установленных в расположенном поблизости карьере трубки Мир и свидетельствующих, что в тектонической структуре участка определяющую роль играют субвертикальные и субгоризонтальные разрывные нарушения.

Особенности положения измеренных в каждой из точек субвертикальных систем трещин с максимальными и вторыми по значениям параметра густоты показаны на рис. 21, а (синие и зеленые диски). Также как и для разрывных нарушений, для систем трещин был проведен анализ основных направлений разрывов характеризующихся повышенными значениями густоты. Полученные розы-диаграммы простираний систем трещин приведены на рис. 21, б, в. Необходимо отметить сходство основных максимумов на них с розой-диаграммой разрывных нарушений (рис. 18, а). Также как и для разрывных нарушений на диаграммах трещинных систем заметно преобладание разрывов северо-западного, субмеридионального и северо-восточного простираний. В тоже время на диаграмме простираний трещинных систем с максимальными значениями густоты (тр./пог. м.) проявился максимум субширотной ориентировки (рис. 18, 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 простираний (рис. 21, а).

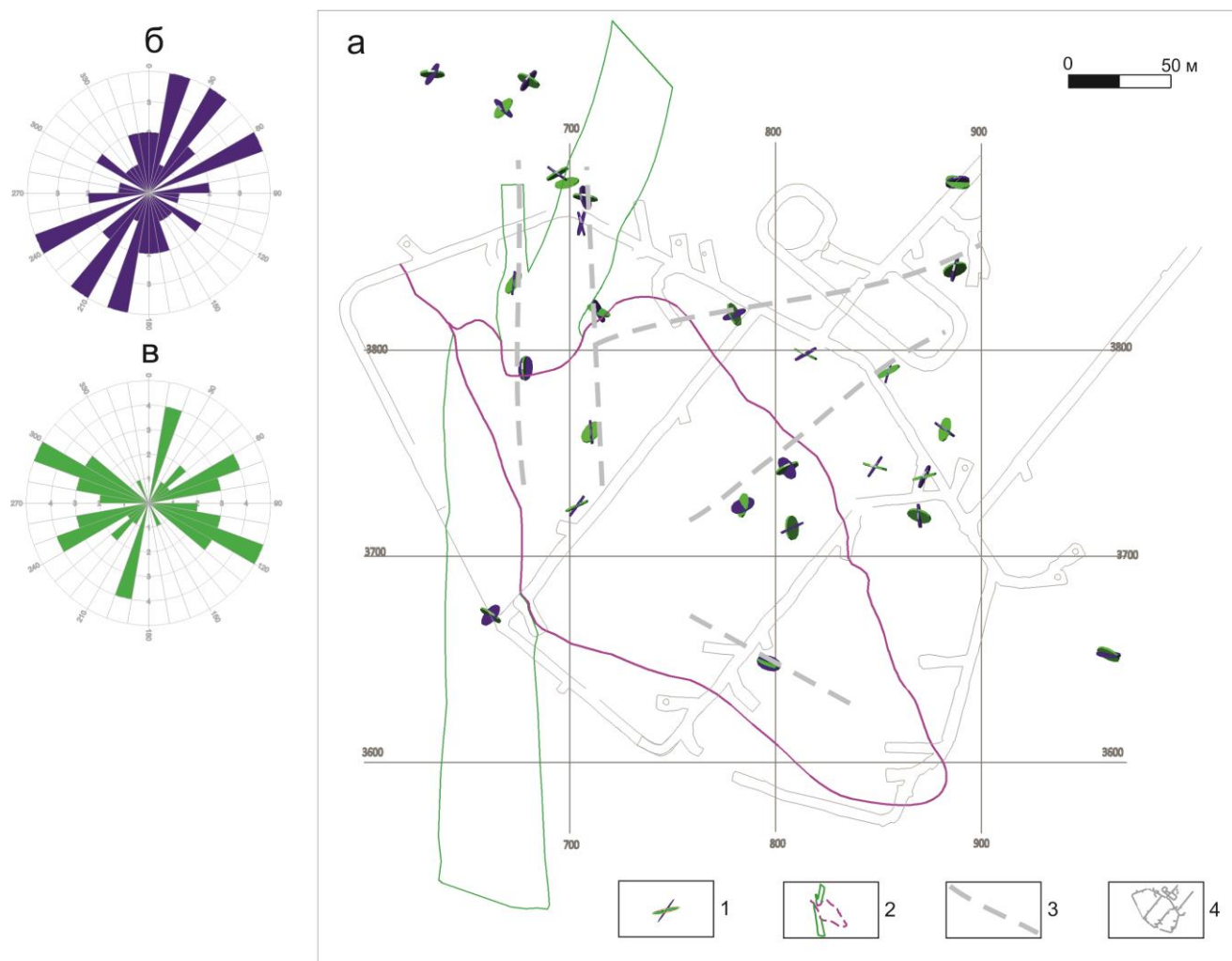


Рис. 21. Особенности распределения систем субвертикальных трещин с максимальными и вторыми по величине значениями густоты (количества трещин на 1 пог. м.) (а) задокументированных в точках наблюдения на руднике Мир и основные их направления (б – роза-диаграмма систем с максимальным значением густоты; в – роза-диаграмм систем со вторым по значению показателем густоты).

1 – системы субвертикальных трещин, характеризующиеся максимальной (синие диски) и второй по величине (зеленые диски); 2 – контур рудного тела и дайки долеритов на гор. – 210 абс. м.; 3 – оси предполагаемых разломов; 4 – горные выработки на гор. – 210 абс. м..

3.2. Построение схемы разломно-блокового строения

Представленные материалы послужили основой для построения объемной схемы субвертикальных разломов участка локализации трубки Мир.

Объектами картирования и прослеживания были осевые плоскости разломов. Под осевой плоскостью понимается воображаемая плоскость, проходящая через центр разломной зоны. 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 (в случаях отсутствия прямых наблюдений выходов разрывных нарушений) 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, прослеживающееся по простиранию в разных горных выработках.

Последний признак сформулирован исходя из установленных ранее на месторождениях трубка Юбилейная и трубка Айхал особенностей взаимодействия вертикальных и пологих разрывов [Гладков и др., 2003, 2008, 2015]. Было показано, что при формировании и активизации разрывной сети субвертикальные нарушения представляют собой границы, вдоль которых происходит своеобразное “сгущивание” пологих дизъюнктивов. Поэтому наблюдаемые участки линейного выстраивания замеров пологих и наклонных нарушений, резко не совпадающих по простиранию с элементами напластования во вмещающих породах или пологой трещиноватостью в рудном теле также позволяют выделить отрезки субвертикальных дизъюнктивов соответствующего направления.

Размеры каждого нарушения по вертикали для отображения на схеме определялись исходя из того, что информация, по которой производились построения, была получена в интервале -210 абс. м. - -310 абс. м. При этом большая часть данных характеризует горизонты -210 абс. м. - -265 абс. м.: то есть 50 м интервал. Как показывает опыт работ сотрудников лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН на других месторождениях Якутской алмазонасной провинции, можно успешно прогнозировать изменения угла наклона и мощности зоны исходя из закономерностей ее строения на верхних горизонтах на глубины около 50 м – то есть, в нашем случае – до горизонта – 310 абс. м. Для более глубоких отметок прогноз представляется менее достоверным и возможен после более детального изучения глубоких горизонтов.

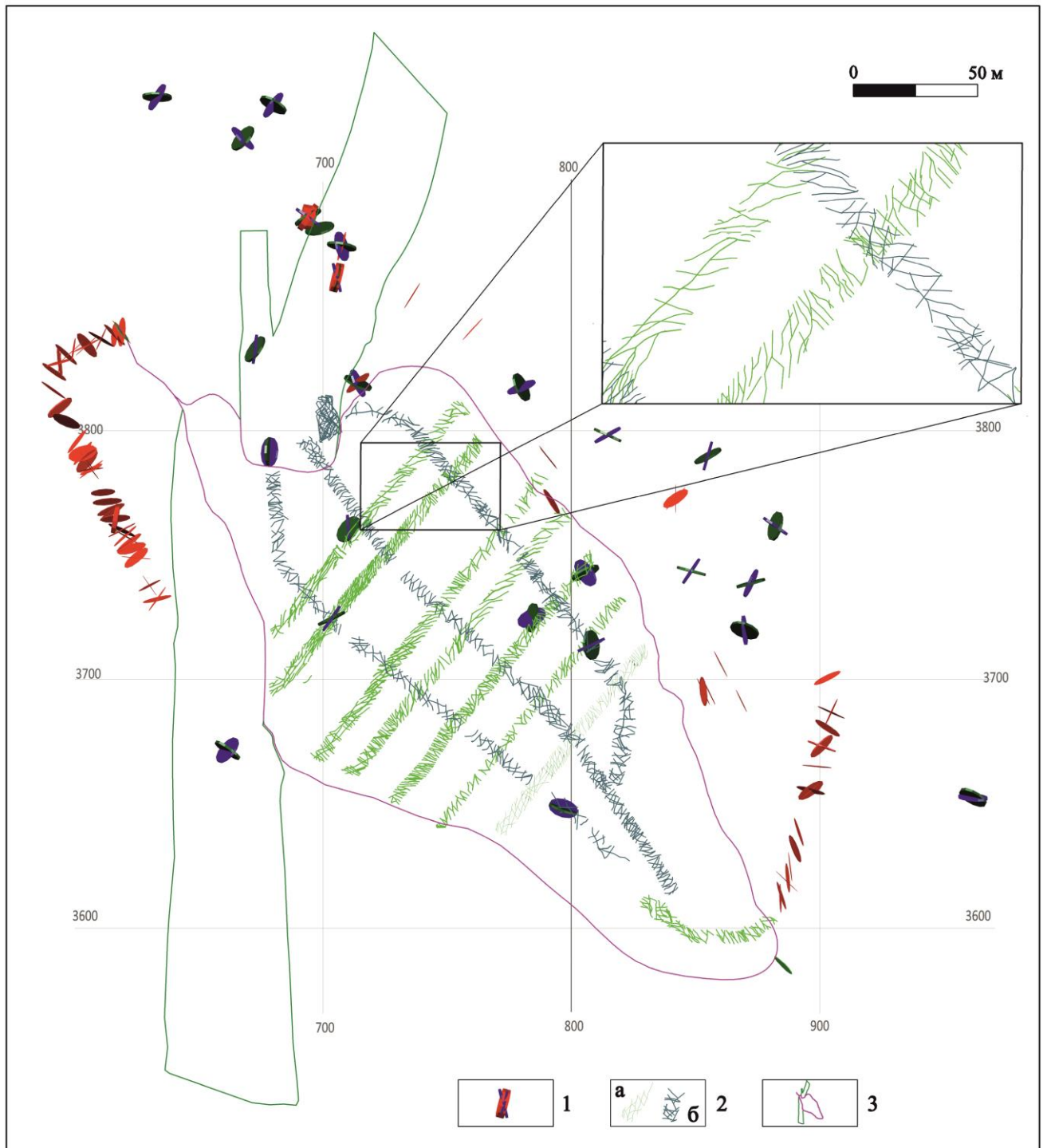


Рис. 22. Исходные данные для построения схемы разломно-блокового строения месторождения трубки «Мир».

1 – задокументированные выходы разрывных нарушений (красные диски) и систем трещин с максимальным (синие диски) и вторым по величине (зеленые диски) показателем густоты; 2 – данные измерений трещин в горных выработках полученные геологами рудника в процессе документации (а – в лентах на гор. -230 абс. м., б – в водоотводных выработках на гор. -210 абс. м.); 3 – контуры рудного тела и дайки долеритов на гор. -210 абс.м.

Для построения схемы разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки Мир проведен комплексный анализ всего массива данных, включавших информацию об особенностях распределения в изученном объеме горных пород разрывных нарушений (рис. 18), тектонической трещиноватости (рис. 20-21), а также материалы документации трещин геологами рудника Мир (рис. 22). В таблице 1 приведена информация по выделенным разломам. В пределах кимберлитового тела выделенные разломы получены в основном по результатам картирования трещин геологами рудника. Анализ литературных материалов, а также тектонической трещиноватости позволяют подтвердить откартированные разрывы.

Таблица 1

Критерии выделения разрывных нарушений

№ разлома	литературные данные	картирование геологов рудника	Полученные данные		
			прямые наблюдения	массовые замеры	системы трещин
1			+		
2		+	+		
3	+	+	+		
4	+			+	+
5		+	+		
6		+	+	+	
7		+	+	+	+
8		+	+	+	
9		+			+
10		+	+		
11	+	+			
12		+			+
13			+		
14		+			
15		+	+		
16		+	+		+
17		+			
18			+		
19	+		+		
20		+			

Результаты построений представлены на рис. 23 и 24. Они свидетельствуют, что тектоническое строение участка локализации трубки Мир определяют субвертикальные разломы северо-западного (№№ 1, 2, 3, 7, 10, 17, 18 и 20), субмеридионального (№№ 4, 5, 11, 13, 14 и 19), северо-восточного (№№ 6, 12 и 15), а также субширотного (№№ 8, 9 и 16) направлений. В большинстве своем, данные разломы представляют собой зоны повышенной трещиноватости, реже дробления, мощности которых колеблются по разрезу от десятков сантиметров до десятков метров. При этом минимальные значения их мощности характерны для пластов соли, а максимальные – для долеритов и кимберлитов. Другим фактором, определяющим увеличение мощностей разломных зон, является взаимодействие разломов в узлах пересечения.

Тектонический характер некоторых участков контактов рудного тела и продолжение в его пределах сегментов выделенных разломов указывает на активизацию разломно-блоковой структуры месторождения на пострудных этапах. При этом в кимберлитовом теле, под воздействием тектонических сил (как сжатия, так и растяжения) была сформирована и отчасти залечена солью, гипсом или кальцитом густая сеть трещин, наблюдаемых в настоящее время в горных выработках.

Зафиксированные нарушения разбивают горный массив (в плане) на трех-четырёхугольные блоки различного масштаба. Полученная схема позволяет оценить размеры блоков горных пород, вычленяемых разломными структурами. Учитывая, что зоны разломов характеризуются значениями ширины от десятков сантиметров до десятков м (у наиболее протяженных нарушений), размеры блоков колеблются от первых сотен до десятков тысяч м². Наиболее мелкие блоки наблюдаются в пределах рудного тела и на участках сгущения разломов вблизи рудного тела, более крупные фиксируются на удалении от кимберлитового тела.

Другим важным элементом разломно-блоковой структуры участка являются субгоризонтальные разрывные нарушения, которые служат ограничениями блоков по вертикали. Однако полученных данных пока недостаточно для уверенного выделения подобных границ в изученных объемах горных пород. Мы предполагаем наличие пологой зоны, разграничивающей выделенные блоки на горизонте – 240 абс. м (см. рис. 19).

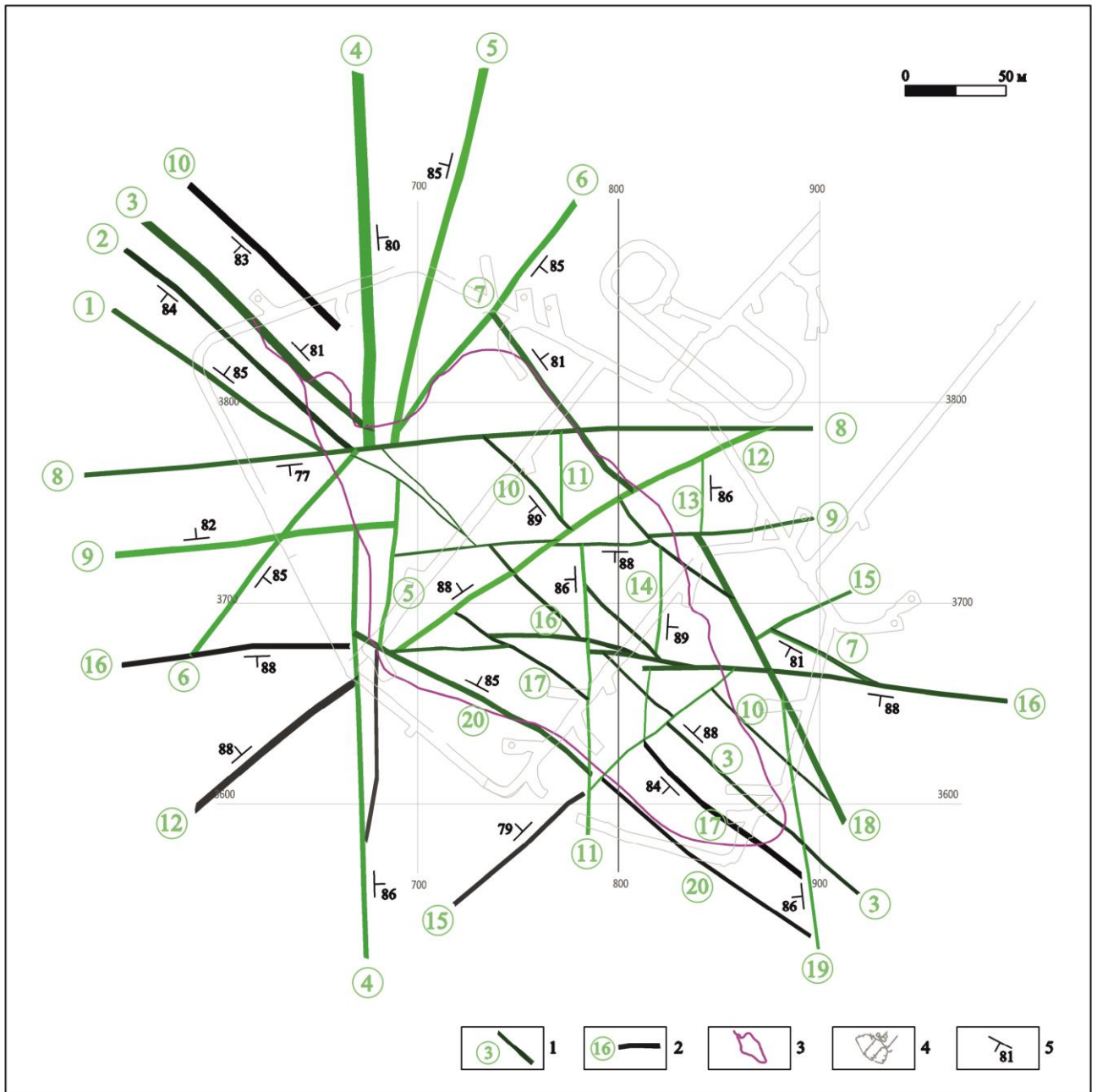


Рис. 23. Схема разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки Мир (вид сверху)

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.

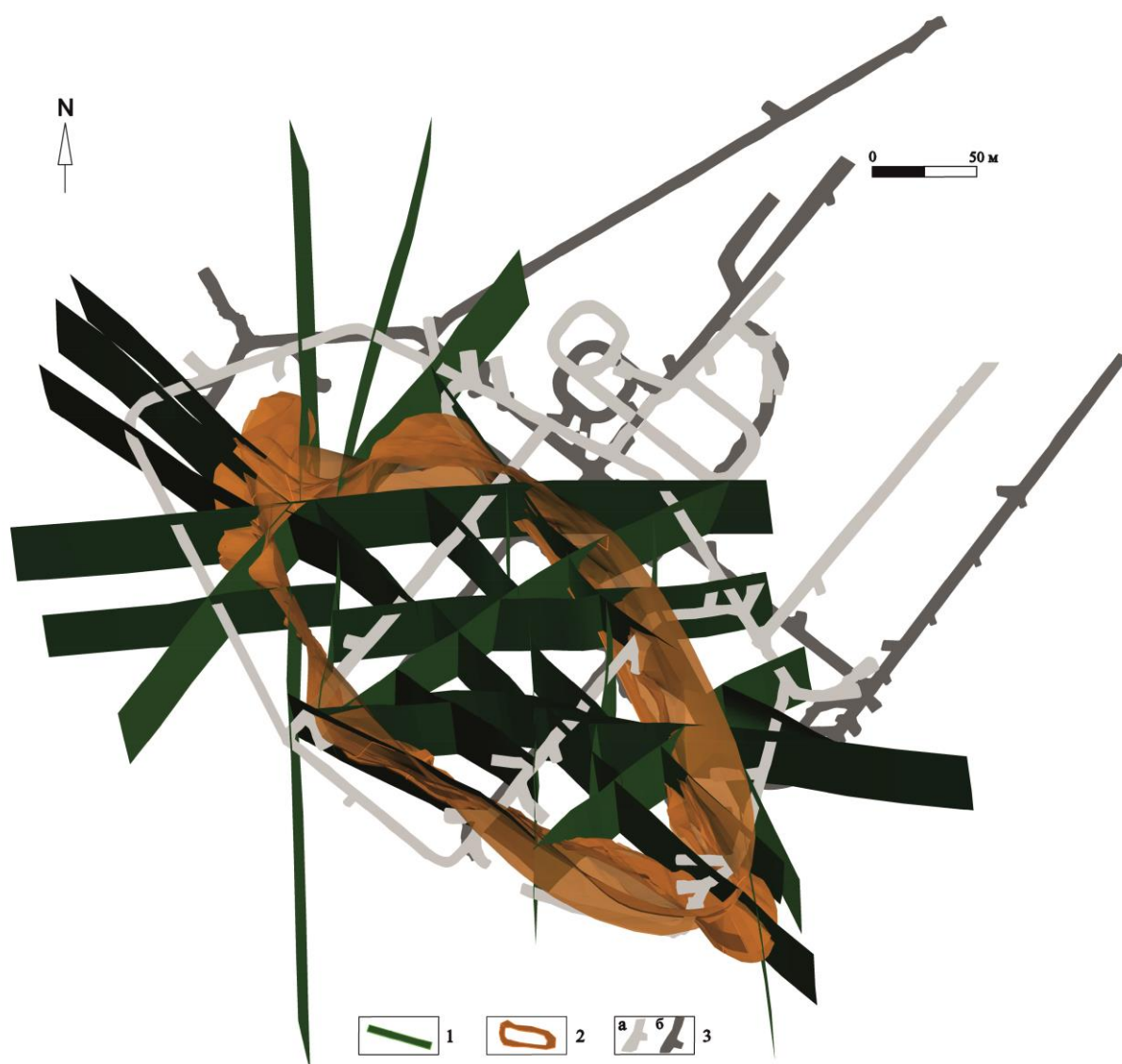


Рис. 24. Трёхмерная схема разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки Мир (вид с юга)

1 - разломы; 2 – рудное тело; 3 – горные выработки: а - -210, б - -310.

В целом, выполненные построения позволяют сделать вывод о том, что трубка Мир локализована в узле разломов меридионального, северо-западного, северо-восточного и широтного направлений. Каждый из упомянутых разломов представлен сериями сближенных разрывных нарушений мощностью от первых метров до десятков метров.

3.3. Реконструкция полей тектонических напряжений

Согласно существующим представлениям, разломы образующие узел имеют до среднепалеозойский возраст заложения [Милашев, 1984 и др.]. Поэтому важным

элементом анализа является восстановление полей напряжений, которые определяли формирование и активизацию разломного узла и, в конечном счете, локализацию месторождения. Исходным материалом для данного анализа послужили массовые замеры тектонических трещин (от 30 до 100 шт.), выполненные во вмещающих терригенно-карбонатных толщах, дайке долеритов и собственно в кимберлитовом теле (см. рис. 20). На большинстве диаграмм присутствуют характерные структурные рисунки – пояса трещиноватости [Данилович, 1961]. Наблюдаются два типа поясов. Первые из них образованы максимумами расположенными по периферии большого круга и соответствуют сдвиговому типу. Вторые – представляют собой шлейф и цепочку максимумов вдоль дуги большого круга, проходящей через центральную часть диаграмм. Такие пояса образуются в результате преимущественно сбросовых или взбросовых подвижек.

Как указывалось выше, основу для восстановления полей напряжений составили диаграммы массовых замеров трещин. Выделение сопряженных пар систем трещин проводилось с использованием критериев Николаева [1977] и Даниловича [1961]. Всего было получено сорок решений в 16 точках наблюдения (см. табл. 2).

Анализ полученных данных показывает, что 19 из полученных решений соответствуют сдвиговому типу подвижек по сопряженным системам, 11 – взбросовому и 10 – сбросовому. Синоптические розы-диаграммы ориентировок осей главных нормальных напряжений растяжения и сжатия приведены на рис. 25. Основные максимумы ориентировок осей растяжения лежат в интервалах (рис. 25, А): I) 10-20°, II) 320-360°, III) 70-80°, IV) 40-50°. Для сжатия характерны следующие направления (рис. 24, Б): I) 270-300°, II) 60-80°, III) 310-320°, IV) 340-350°. Обращает на себя внимание тот факт, что некоторые из ориентировок для прямо противоположных по знаку осей близки. Например, III у растяжения и II у сжатия. Это может свидетельствовать о наличии этапов, когда ориентировки действия сил оставались одинаковыми, однако оси сжатия и растяжения менялись местами. Другой особенностью полученных диаграмм является то, что практически каждому из максимумов растяжения соответствует максимум сжатия ориентированный практически под 90°. Данный факт может свидетельствовать о значительной роли полей напряжений сдвигового типа в истории становления разломного узла, вмещающего трубку Мир.

Таблица 2

Результаты восстановления осей главных нормальных напряжений в точках наблюдения

№ т.н.	Сопряженные системы				угол	Метод	Породы	σ_1		σ_2		σ_3		Тип поля
	аз. пад.	угол	аз. пад.	угол				Аз.	∠	Аз.	∠	Аз.	∠	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
101	285	75	210	80	73	Нп	долерит	158	4	263	74	67	16	сдвиг
101	60	70	245	55	55	Нп	долерит	210	81	332	5	62	8	взброс
401	190	80	305	80	68	Н	долерит	337	0	247	72	67	18	сдвиг
401	190	50	10	75	55	Н	долерит	10	12	100	0	190	78	сброс
402	30	85	295	85	85	Н	карбонаты	252	0	343	83	163	7	сдвиг
402	120	30	305	50	80	Н	карбонаты	134	80	33	2	303	10	взброс
512	280	85	340	80	60	Нп	карбонаты	221	5	340	80	130	9	сдвиг
512	25	60	180	50	74	Нп	карбонаты	267	72	105	17	13	5	взброс
512	105	20	275	50	70	Д	карбонаты	87	75	187	3	278	15	взброс
513	230	80	90	80	45	Нп	долерит	340	27	160	63	70	0	сдвиг
517	90	80	185	85	86	Н	карбонаты	227	3	120	78	318	11	сдвиг
601	130	75	260	80	55	Нп	карбонаты	16	28	190	62	285	3	сдвиг
601	30	65	185	50	69	Н	карбонаты	19	8	111	18	267	70	сброс
601	310	60	155	60	65	Н	карбонаты	143	0	232	21	52	69	сброс
701	215	75	310	70	89	Нп	карбонаты	173	3	270	65	82	25	сдвиг
701	215	75	290	70	71	Н	карбонаты	72	22	264	68	164	4	сдвиг
701	135	60	310	45	75	Н	карбонаты	133	8	223	3	336	82	сброс
702	30	75	120	80	87	Нп	карбонаты	164	4	63	72	256	17	сдвиг
702	165	80	225	70	59	Н	карбонаты	14	17	226	70	107	10	сдвиг
702	40	30	230	40	70	Д	карбонаты	80	84	316	3	226	5	взброс
801	50	85	120	85	70	Нп	карбонаты	175	0	85	84	265	6	сдвиг
801	155	60	320	50	71	Нп	карбонаты	33	78	239	10	148	5	взброс
801	165	40	345	50	90	Н	карбонаты	165	85	255	0	345	5	взброс
801	120	85	200	65	79	Н	карбонаты	338	19	199	65	73	15	сдвиг
804	140	70	245	70	84	Нп	долериты	12	31	192	59	282	0	взброс
804	110	40	300	20	60	Н	долериты	279	80	23	3	113	10	взброс
804	40	35	215	45	80	Д	долериты	15	85	127	2	217	5	взброс
805	60	80	340	80	79	Н	карбонаты	200	13	20	77	290	0	сдвиг
805	135	45	325	60	76	Н	карбонаты	321	8	51	6	181	80	сброс
901	30	70	305	70	79	Н	долерит	168	26	348	64	257	0	сдвиг
901	115	50	270	45	88	Нп	долерит	2	77	194	13	103	3	взброс
1001	155	70	240	75	80	Н	карбонаты	18	23	188	67	287	4	сдвиг
1001	0	80	285	80	74	Н	карбонаты	143	13	323	77	232	0	сдвиг
1001	60	60	240	75	45	Д	карбонаты	240	7	150	0	60	83	сброс
1003	20	50	210	45	85	Д	долерит	25	3	295	5	140	84	сброс
1003	30	85	297	87	87	Д	долерит	254	1	357	84	163	6	сдвиг
1303	147	80	225	85	77	Д	кимберлит	6	10	163	80	276	4	сдвиг
1303	95	40	270	60	80	Нп	кимберлит	76	80	182	3	272	10	взброс
1303	2	50	170	60	71	Н	кимберлит	176	5	85	8	296	80	сброс
1303	45	50	235	50	81	Н	кимберлит	230	0	320	6	140	84	сброс

В графе 7 буквами обозначены: Н – метод Николаева для хрупких условий; Нп – метод Николаева для пластичных условий; Д – метод Даниловича.

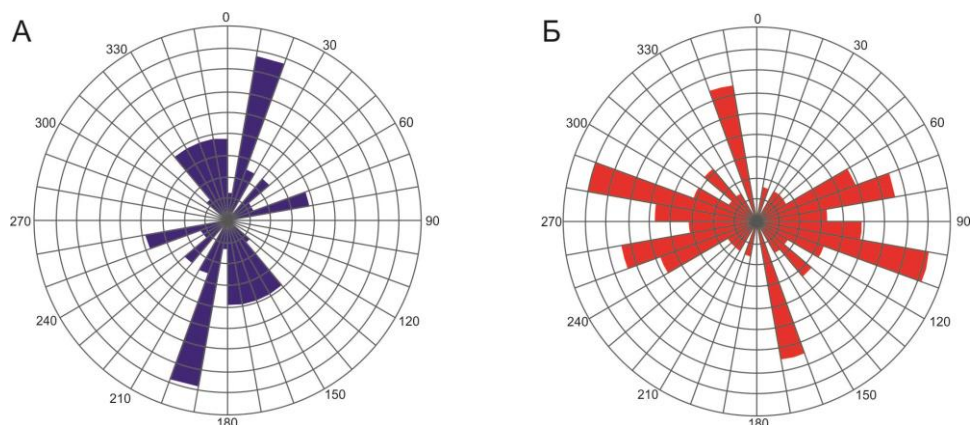


Рис. 25. Синоптические розы-диаграммы для полученных решений осей растяжения (А) и сжатия (Б) приведенных в таблице 2.

Также были рассмотрены особенности полученных решений в пределах различных типов пород. Наиболее представительные данные, в силу объективных причин (хорошая сохранность трещин и возможность безопасного проведения замеров), были получены для долеритов и карбонатно-терригенных отложений (рис. 26). Можно отметить, что основные максимумы направлений осей, отмеченные выше, присутствуют и в пределах рассматриваемых пород. Однако их интенсивность и количество в долеритах (рис. 26, А, В) и карбонатных породах (рис. 26, Б, Г) различаются.

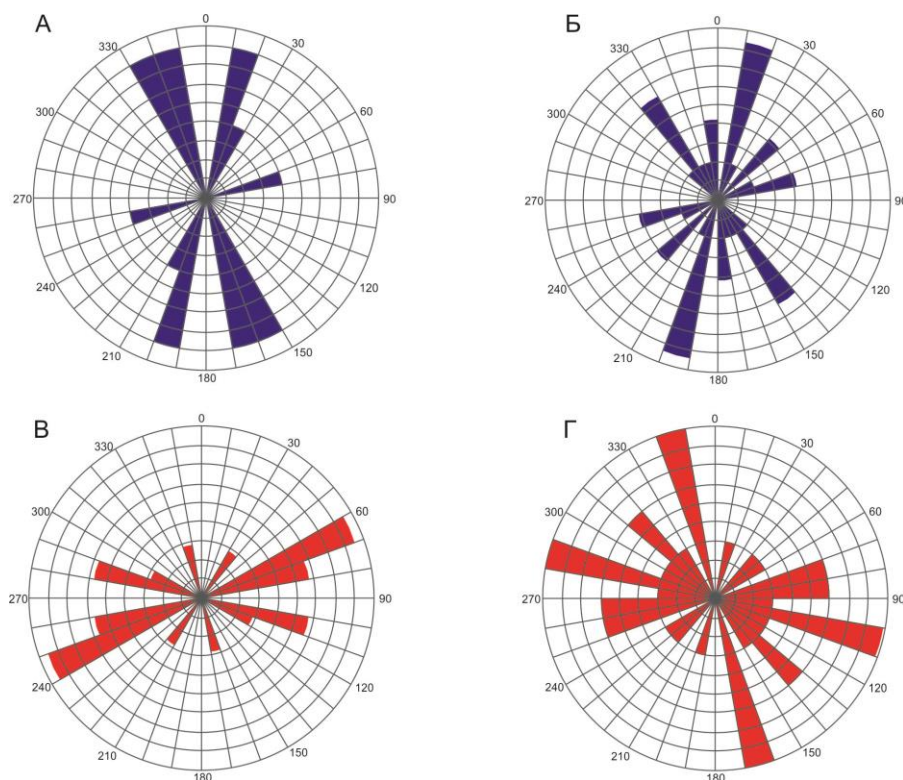


Рис. 26. Синоптические розы-диаграммы для полученных решений осей растяжения и сжатия в различных типах пород (см. табл. 2). А, В – долериты, Б, Г – карбонатно-терригенные породы

Как в долеритах, так и в карбонатно-терригенных отложениях присутствуют достаточно интенсивные максимумы соответствующие сдвиговому полю с осью растяжения ориентированной в север-северо-восточном (ССВ 10-20°) и сжатия в запад-северо-западном (ЗСЗ 280-290°) направлениях (см. рис. 26). Также можно отметить проявление и в тех и в других породах сдвигового поля с ориентировкой оси растяжения в восток-северо-восточном (ВСВ 70-80°) и оси сжатия в север-северо-западном (ССЗ 340-350°). Однако интенсивность указанных максимумов в долеритах заметно ниже (см. рис. 26).

На диаграммах в долеритах присутствуют интенсивные максимумы, свидетельствующие об ориентировках осей растяжения в север-северо-западном (ССЗ 330-350°) и сжатия в восток-северо-восточном (ВСВ 60-80°) направлениях (рис. 26, А, В), тогда как в карбонатах (рис. 26, Б, Г) близкие к ним максимумы (ССЗ 340-350° и ВСВ 70-90°) характеризуются заметно меньшими значениями. В свою очередь, на диаграммах, построенных для решений, полученных для карбонатных пород (рис. 26, Б, Г) есть максимумы, соответствующие сдвиговому полю с направлением оси растяжения в северо-восточном (СВ 40-50°) и оси сжатия в северо-западном (СЗ 310-320°) направлениях, а в долеритах следы проявления его отсутствуют (рис. 26, А, В). И, наконец, следует отметить в карбонатных отложениях наличие решений с ориентировками осей растяжения в северо-западном (СЗ 320-330°) и сжатия в северо-восточном (СВ 40-60°) направлениях (рис. 26, Б, Г).

Таблица 3

Результаты анализа полученных решений в пределах карбонатно-терригенных отложений

№	Ориентировка оси растяжения (σ_1)	Ориентировка оси сжатия (σ_3)	$\Sigma I, \%$
1	ССВ 10-20°	ЗСЗ 280-290°	13,5
2	ВСВ 70-80°	ССЗ 340-350°	11
3	ССЗ 350-360°	ВСВ 70-90°	7,5
4	СЗ 320-330°	СВ 40-60°	7
5	СВ 40-50°	СЗ 310-320°	7

Результаты анализа представлены в таблице 3. Последняя колонка таблицы содержит показатель относительной интенсивности в виде суммы величин максимумов (в процентах) на соответствующих диаграммах. Полученные данные позволяют предположить в истории развития разрывной сети на участке локализации трубки Мир наличие как минимум 5 этапов проявления полей тектонических напряжений сдвигового типа. При этом поля под номерами 2 и 3 соответствуют смену осей главных нормальных напряжений на прямо противоположные по значению (сжатие на растяжение и наоборот). 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 существования оси растяжения субширотного направления, которое подтверждается наличием дайки долеритов субмеридионального простирания.

Как указывалось выше, в толщах солей фиксировались только крупные дизъюнктивы и поэтому массовые замеры не проводились. В тоже время, для некоторых из них были зафиксированы смещения, что позволяет также судить с той или иной степенью достоверности об ориентировках осей главных нормальных напряжений. На рис. 27, А приведена синоптическая роза-диаграмма, на которой показаны линии проекций плоскостей со смещениями на верхнюю полусферу. Установленные типы смещений по анализируемым плоскостям возможны в результате действия полей 2 и 3. В первом случае происходят сбросы по дизъюнктивам северо-западного и север-северо-западного простираний. Действию поля номер 3 (табл. 3) соответствует наблюдаемый парагенезис включающий левый сдвиг по разрыву запад-северо-западной ориентировке, правый сдвиг по дизъюнктивам северной и север-северо-западной ориентировок, а также взбросовые смещения по трещинам северо-западной и север-северо-западных направлений.

В кимберлитах (из-за технологии отработки: комбайновая выемка с последующей закладкой) удалось сделать 1 точку массового замера (рис. 28). На диаграмме трещиноватости, построенной по 75 замерам (рис. 28, 1) наблюдается структурный рисунок “конуса”, соответствующего одноосному сжатию в близвертикальном направлении [Расцветаев, 1982]. Использование методов П.Н. Николаева [1977] и

Даниловича [1961] в сочетании с приемами анализа хаотической трещиноватости [Семинский и др., 2005] позволило выделить несколько сопряженных систем трещин. Полученные решения приведены на рис. 28, 2. Ориентировки их осей могут быть сопоставлены полю № 1 (рис. 28, 2, А и Б), а также частными случаями проявления сдвиговых полей № 3 (рис. 28, В) и № 4 (рис. 28, 2, Г).

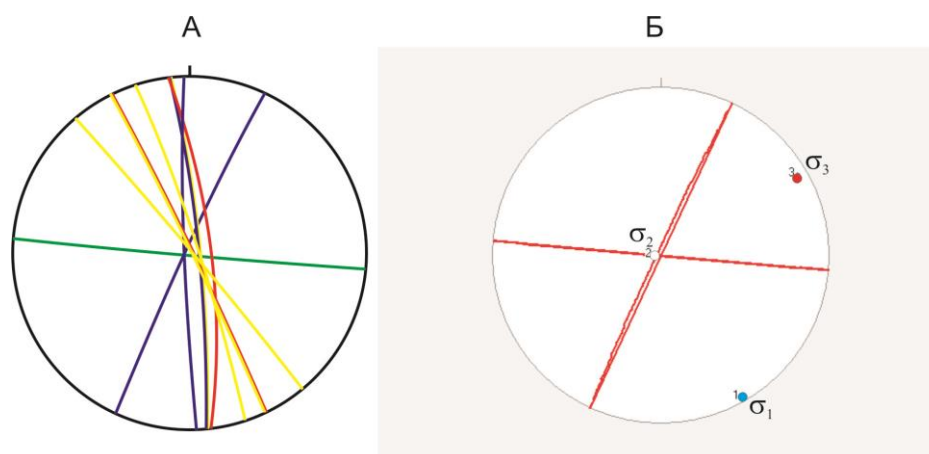


Рис. 27. Диаграммы замеров разрывов со смещениями в солях.

А – линии плоскостей со смещениями на верхней полусфере: синие – правые сдвиги, зеленые – левые сдвиги, красные – взбросы, желтые – сбросы. Б – сопряженные трещины по критерию М.В. Гзовского [1975] и полученное решение положений осей главных нормальных напряжений.

Полученные результаты (табл. 3, рис. 23, 24), в целом, соответствуют особенностям проявления полей тектонических напряжений в пределах Мало-Ботуобинского района ранее установленным А.С. Гладковым [Гладков и др., 2008]. Напомним, что в указанной работе, на основе анализа трещиноватости в разновозрастных отложениях, была установлена следующая последовательность проявления региональных полей тектонических напряжений сдвигового типа:

- СВ сжатие – СЗ растяжение;
- СЗ сжатие – СВ растяжение;
- Субмеридиональное сжатие – субширотное растяжение.

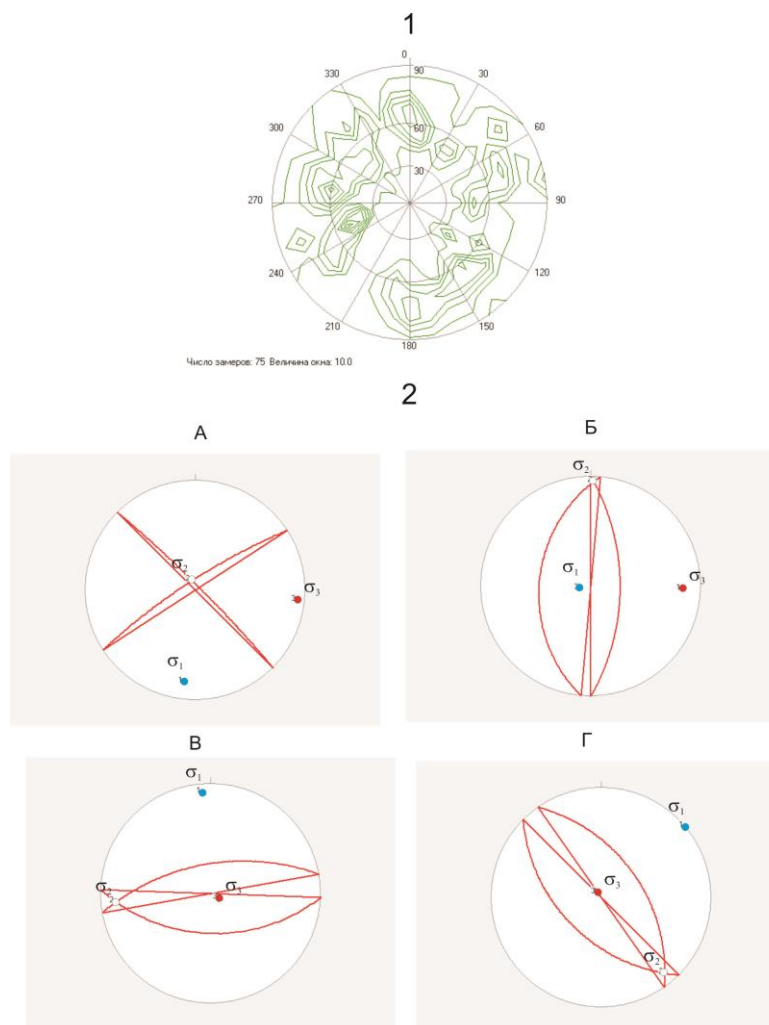


Рис. 28. Диаграмма, построенная по 75 замерам тектонических трещин в т.н. 1404 в кимберлитах (1) и полученные решения для сопряженных систем (2).

Наши данные позволяют уточнить ориентировку осей одного из приведенных полей (сжатие - ССЗ 340-350°, растяжение - ВСВ 70-80°), а также показывают наличие еще двух этапов сдвиговых полей с действием сил сжатия в субширотных (ЗСЗ 280-290° и ВСВ 60-80°), а растяжения в субмеридиональных (ССВ 10-20° и ССЗ 330-350°) направлениях.

Наиболее молодыми, являются поля №2 и №3 поскольку разрывы, связанные с ними сохранились в соляных толщах, в которых, как известно, в силу пластичности соли плохо сохраняют разрывные деформации. Поля № 4 и 5 можно отнести к наиболее древним по косвенному признаку - наименьшей относительной интенсивности максимумов на розах-диаграммах, что может свидетельствовать об их затухивании следами проявлений полей более молодых возрастов.

Вслед за А.С. Гладковым [2008] автор предполагает, что внедрение кимберлитовых тел происходило на этапе СЗ сжатия – СВ растяжения. Для этого предлагается модель активизации разрывной структуры участка связывающая внедрение кимберлитов с формированием структур растяжения в результате взаимодействия разрывных нарушений север-северо-восточного (субмеридионального) простирания и формирующихся или активизирующихся разрывов северо-западной ориентировки (рис. 29). Для проверки предложенной модели было выполнено поляризационно-оптическое моделирование.

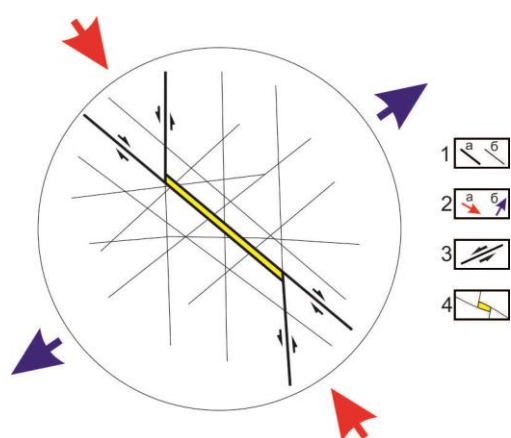


Рис. 29. Структурная модель формирования структуры локального растяжения, вмещающей кимберлитовую трубку Мир.

1 – Разломы 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.

3.4. Поляризационно-оптическое моделирование процесса активизации разрывной структуры кимберлитовмещающих разломных узлов Мало-Ботуобинского района

В трех сериях экспериментов по оптическому моделированию воспроизведены структурные ситуации, отображающие сочетание различно ориентированных разрывов Мирнинского кимберлитового поля на участках локализации трубки Мир и более мелких кимберлитовых тел (по данным других авторов) [Черемных и др., 2014]. Первая серия состояла из упрощенных схем взаимодействия различно ориентированных разрывов двух-трех систем. Во второй и третьей серии экспериментов, изучались модели с имитацией реальной природной картины разрывных нарушений, полученные как при анализе литературных и фондовых материалах, так и при полевых наблюдениях. Эксперименты отличались граничными условиями силового воздействия на модель – ориентировкой осей сжатия и растяжения.

3.4.1. Моделирование напряжённно-деформированного состояния в окрестностях узла пересечения разрывов кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского района

Проведено три эксперимента, в которых моделировалась структурная картина характерная для большинства мелких трубок Мало-Ботуобинского района. Рассматривались следующие сочетания нарушений: 1. разрыв северо-западного простирания и субмеридионального дизъюнктив (два эксперимента); 2. трех разрывов – северо-западной, субмеридиональной и субширотной ориентировки. Во всех экспериментах граничные условия воздействия на модель воспроизводили сдвиговое поле напряжений с северо-запад-юго-восточным сжатием и северо-восток-юго-западным растяжением. В первом эксперименте ось сжатия имела простирание – 320° , а во втором и третьем – 310° .

Первый показал, что участки локального растяжения на разломах северо-западного простирания возможно не только (даже не столько) из-за его ортогональности к оси растяжения, но и при внедрении в тело дизъюнктива клиновидных блоков (рис. 30, А). Клиновидная форма блоков формируется в результате сочленения разрывов северо-западной и субмеридиональной ориентировки. Последние активизируются как сдвиги с левосторонней компонентой перемещения крыльев, а наибольшие касательные напряжения и, соответственно, вторичные разрывные нарушения формируются на их дистальных северном и южном окончаниях.

Во втором эксперименте было воспроизведено напряженно-деформированное состояние в окрестностях У-образного сочленения разрывов северо-западного и субмеридионального простирания. По сравнению с первым опытом, в данном эксперименте изменились граничные условия воздействия на модель – ось сжатия простиралась 310° . При такой геометрии в модели исключается образование зон локального растяжения по северо-западному разрыву за счет внедрения в его тело клиновидных блоков (рис. 30, Б). Раздвиговое перемещение крыльев разрыва северо-западного простирания происходит в его центральной части и значительно уменьшается к дистальным окончаниям. Взаимодействие этого дизъюнктива с субмеридиональным разрывным нарушениям, проявляющим левостороннюю сдвиговую компоненту смещения крыльев, не вносит существенного искажения кинематики разрывов (рис. 30, Б). Высокие касательные напряжения, как и в первом эксперименте, фиксируются на

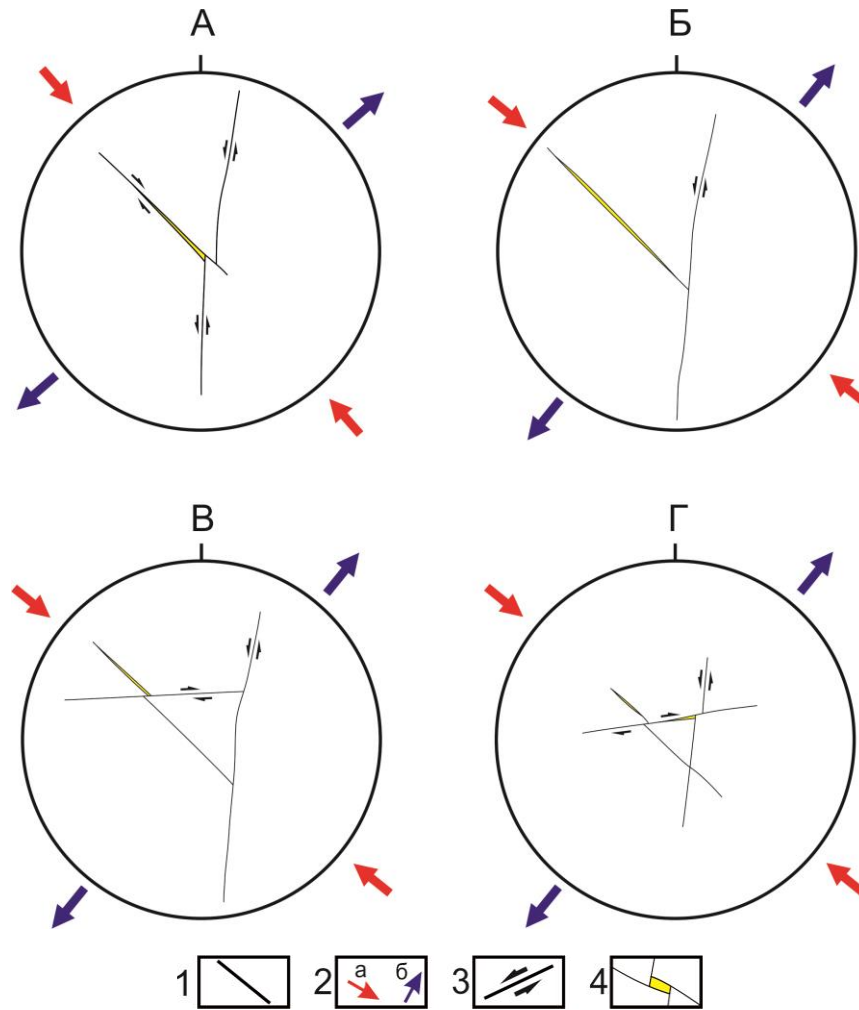


Рис. 30. Моделирование взаимодействия разрывов различной ориентировки.

1 - разломы; 2 - ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 - сдвиговые перемещения блоков модели; 4 - структура локального растяжения.

концах субмеридионального дизъюнктива, где и начинают формироваться вторичные отрывные дислокации. Добавление в модель еще одной неоднородности – сегмента разрыва субширотного простирания - способствует тому, что раздвиговая компонента наблюдается только у северо-западного сегмента рудовмещающего (северо-западного) разрыва (рис. 30, В). При этом наблюдаются увеличение амплитуды раздвиговых перемещений крыльев центрального сегмента субширотного разрыва с запада на восток, что происходит из-за вращения северного блока против часовой стрелки. Вращение, по-видимому, связано с повышенным трением на берегах северного сегмента субмеридионального разрыва.

Третий эксперимент был направлен на изучение напряженно-деформированного состояния в окрестностях узла пересечения разрывов трех направления: субширотного, субмеридионального и северо-западного. Все разрывы имели одинаковую длину и нарушали друг друга с обособлением трех сегментов на каждом из разрывов (рис. 30, Г). Расположение раздвиговых сегментов в пределах узла в целом подобно завершающей стадии предыдущего эксперимента (рис. 30, В). Также наблюдается вращение северного блока против часовой стрелки, которое, в данном случае, обусловлено спецификой взаимодействия субмеридионального и субширотного разрывов.

Полученные в первой серии экспериментов 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 напряжённого состояния [Шерман и др., 1986; Мирошниченко, 1989]. Согласно результатам моделирования, именно такие участки характеризуются наибольшим раскрытием при указанных условиях (действии северо-западного сжатия и северо-восточного растяжения) и, соответственно, являются наиболее благоприятными для внедрения кимберлитовых тел (рис. 30, 31).

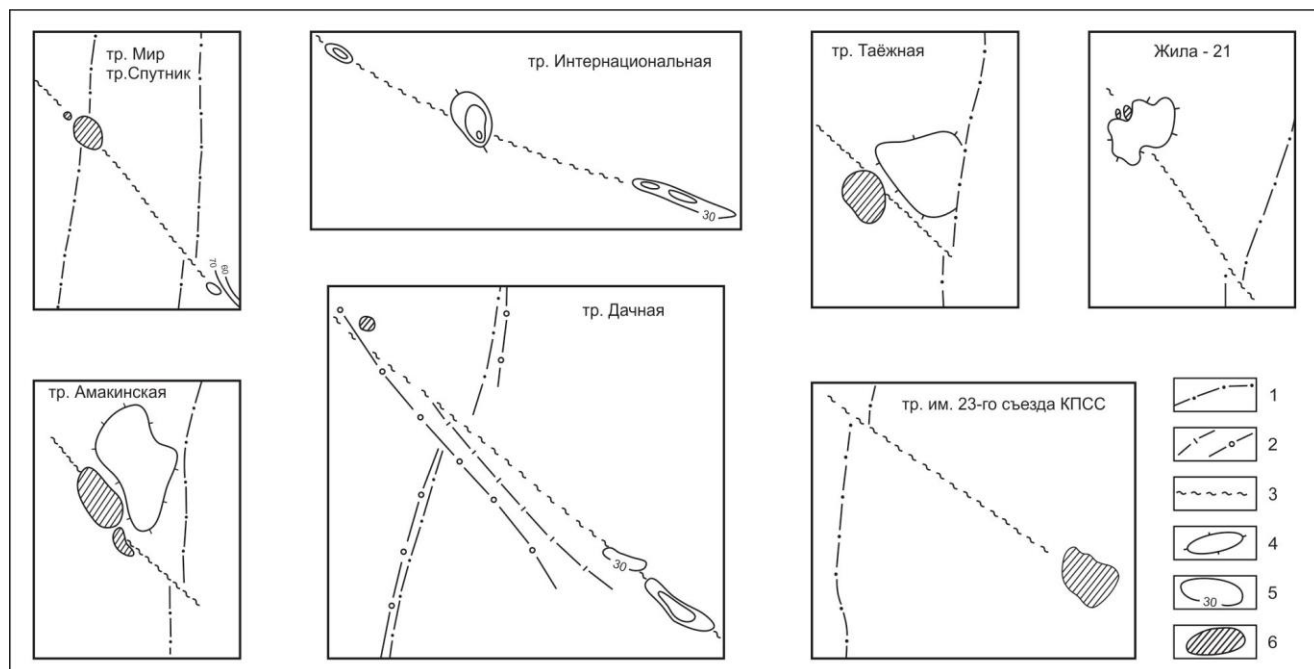


Рис. 31. Элементы гравимагнитных полей на участках внедрения кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района [Ваганов и др., 1995].

1 – оси положительных аномалий магнитного поля; 2 – оси отрицательных (а) и положительных (б) аномалий поля силы тяжести; 3 – рудовмещающие трещины по данным магниторазведки; 4 – гравитационные максимумы; 5 – изолинии магнитного поля, нТл; 6 – кимберлитовые тела.

3.4.2. Моделирование напряжённо-деформированного состояния разломно-блоковой структуры в окрестностях трубки Мир

В данной серии экспериментов более подробно воспроизводилось разломно-блоковое строение в окрестностях трубки Мир по данным различных авторов. Согласно схеме Г.А. Тирского [Тирский и др, 1993] строение разломного узла, вмещающего трубку Мир, определяют (рис. 32, А): серия сближенных нарушений север-северо-восточного простирания, а также северо-западного и северо-восточного направлений. Изучение бортов карьера Мир на космоснимках позволило предположить, что помимо нарушений север-северо-восточного и северо-западного направлений, которые выделяются практически всеми перечисленными выше авторами, строение участка осложняет дизъюнктив запад-северо-западной ориентировки (рис. 32, Б). И, наконец, результаты массовых замеров трещин, выполненные в карьере, дают основание предположить более сложное строение разломного узла, вмещающего трубку Мир: серия сближенных нарушений север-северо-восточной ориентировки, а также

дизъюнктивы восток-северо-восточного, северо-западного и север-северо-западного направлений (рис. 32, В). Мы предполагали, что разрывы последних трех направлений, также могут быть представлены сериями сближенных нарушений. Однако имеющихся данных недостаточно для определения местоположения каждого из нарушения той или иной серии.

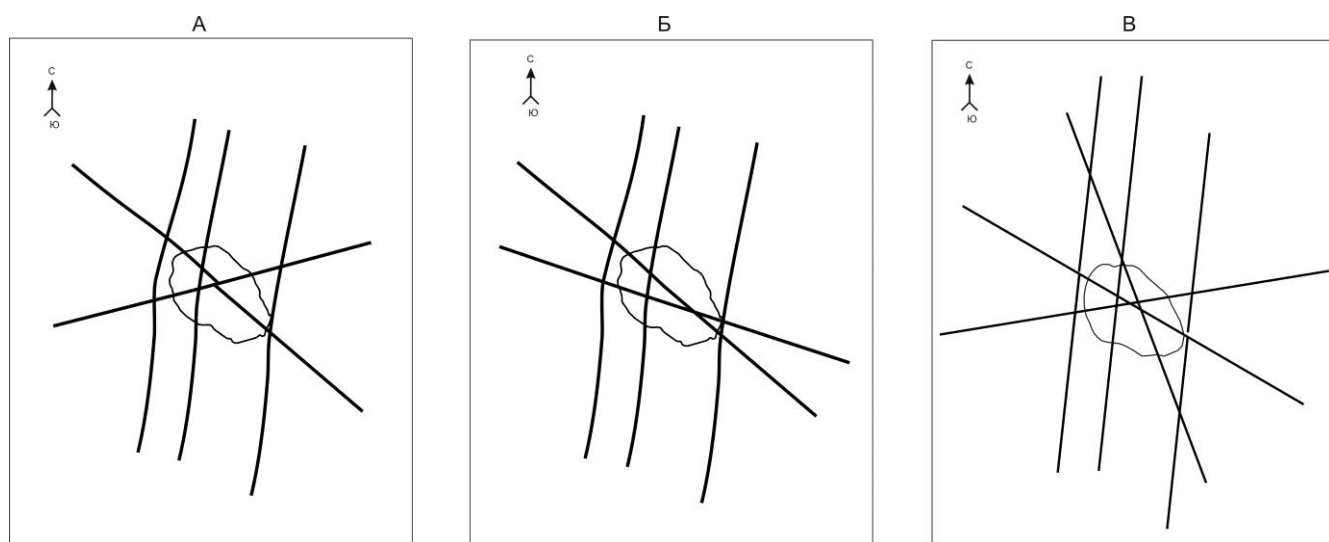


Рис. 32. Компильтивная схема строения разломного узла, вмещающего трубку «Мир» (по литературным и фондовым данным, а также по результатам массовых замеров трещиноватости в карьере).

Было проведено шестнадцать экспериментов, воспроизводящих те или иные элементы природной сети разрывных нарушений, и отличающихся граничными условиями нагружения модели. В ходе экспериментов на границах моделей заданы силовые воздействия соответствующие:

- 1) северо-восточному сжатию – северо-западному растяжению;
- 2) северо-западному сжатию – северо-восточному растяжению (с вариацией оси сжатия от 265° до 330° ;
- 3) субмеридиональному сжатию – субширотному растяжению.

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

Моделированию структурной ситуации в районе трубки Мир, обусловленной разрывами трех направлений (север-северо-восточное, северо-западное и восток-северо-восточное) и сдвиговым полем с ориентировкой оси сжатия 45° и оси растяжения 315° был посвящен один эксперимент. Моделирование показало, что при данных граничных условиях берега всех разрывов сомкнуты, а модельные аналоги дизъюнктивов характеризуются сдвиговыми перемещениями крыльев (рис. 33). Наиболее амплитудные смещения крыльев наблюдаются у системы разрывов субмеридионального простираения и имеют правосдвиговый характер.

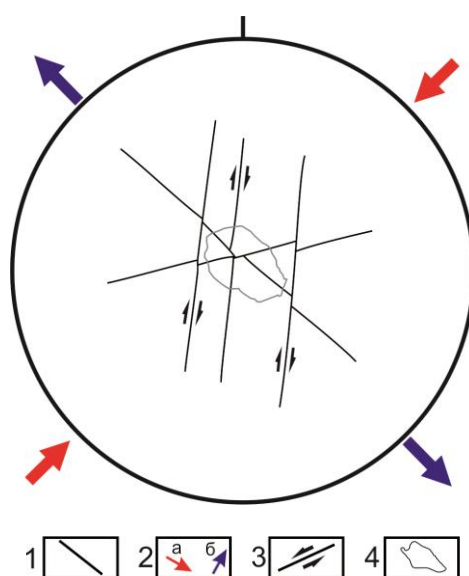


Рис. 33. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир», в условиях северо-восточного сжатия – северо-западного растяжения.

1 - разломы; 2 - ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 - сдвиговые перемещения блоков модели; 4 - контур кимберлитовой трубки.

Напряженно-деформированное состояние в окрестностях перечисленных разрывов (рис. 32, А) разломного узла, вмещающего трубку Мир при меридиональном сжатии и широтном растяжении изучено на основе двух экспериментов оптического моделирования, результаты которых совпадают. При данных граничных условиях раздвиговые перемещения крыльев характерны лишь для двух сегментов разрывов субмеридиональной ориентировки (рис. 34). Причем они раскрываются даже при простом их сочленении (рис. 34, А), а при более сложном сочетании разрывов и блоков кинематический тип этих нарушений не изменяется (рис. 34, Б).

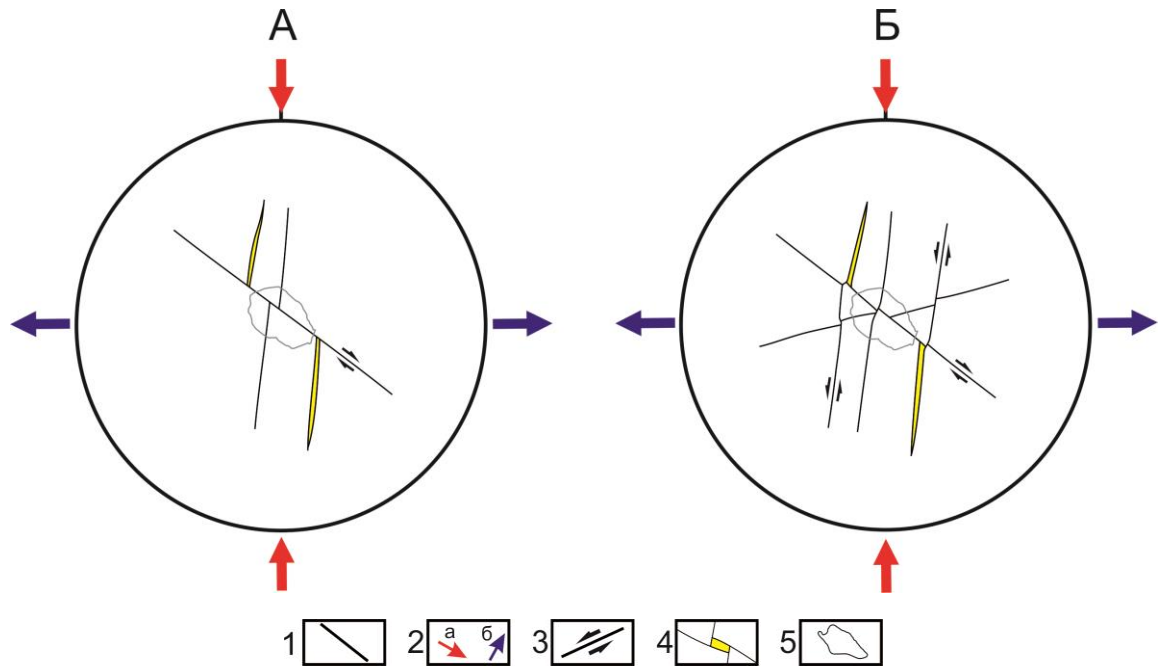


Рис. 34. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир», в условиях сдвига с субмеридиональной ориентировкой оси сжатия и субширотной – оси растяжения.

А – начальная стадия эксперимента: в модель внесены только некоторые разрывы, Б – конечная стадия эксперимента: изучается напряженно-деформированное состояние в окрестностях разломно-блоковой структуры участка. 1 - разломы; 2 - ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 - сдвиговые перемещения блоков модели; 4 - структура локального растяжения; 5 - контур кимберлитовой трубки.

Исследованию кинематического типа данного набора разрывов и напряженного состояния в их окрестностях при сдвиговом поле с ориентировкой оси сжатия северо-запад-юго-восток (соответственно оси растяжения – северо-восток-юго-запад) было посвящено 12 экспериментов. Как отмечалось выше ориентировка оси сжатия в экспериментах варьировала от субширотной – 265° до север-северо-западной – 330° . Моделирование показало (рис. 35, Б-Д), что благоприятные для формирования трубки структурные условия характерны при активизации разрывов (либо их сегментов) в сдвиговом поле напряжений с ориентировкой оси сжатия в интервале $\sim 290-310^\circ$ (ось растяжения $\sim 20-40^\circ$). При субширотной ориентировке оси сжатия (рис. 35, А), а также когда данная ось находится в интервале $311-330^\circ$ растяжения центральных сегментов разломов (район локализации трубки) не наблюдается (рис. 35, Е).

Поэтапное воспроизведение сегментов перечисленных направлений нарушений в окрестностях трубки Мир, позволило выявить следующие особенности. Условия благоприятные для формирования трубки появляются при взаимодействии северо-западного дизъюнктива с сегментами системы субмеридионального разлома (рис. 35, Б-Д). При этом наиболее благоприятные условия фиксируются при сдвиговом поле напряжений с ориентировкой оси сжатия близкой к 310° (рис. 35, Г). Однако, даже незначительное (на 2°) отклонение простирания оси сжатия к северу приводит к смыканию берегов сегментов разрывов центральной части (рис. 35, Е). Значительное отклонение ($320-330^\circ$) способствует почти полному закрытию разрывов в моделях.

Отдельного рассмотрения заслуживает изучение особенностей вероятных этапов развития структуры, проведенное в рамках данной серии экспериментов. Как уже говорилось выше, поэтапное добавление в модель разрывов в ходе эксперимента позволяет проследить специфику эволюции напряженно-деформированного состояния как в окрестностях относительно простых сочетаний разрывов, так и при достаточно сложной разломно-блоковой структуре. Весьма показательны в этом смысле следующие три опыта отличающиеся как граничными условиями нагружения модельного материала, так и последовательностью активизации неоднородностей - разрывов или их сегментов.

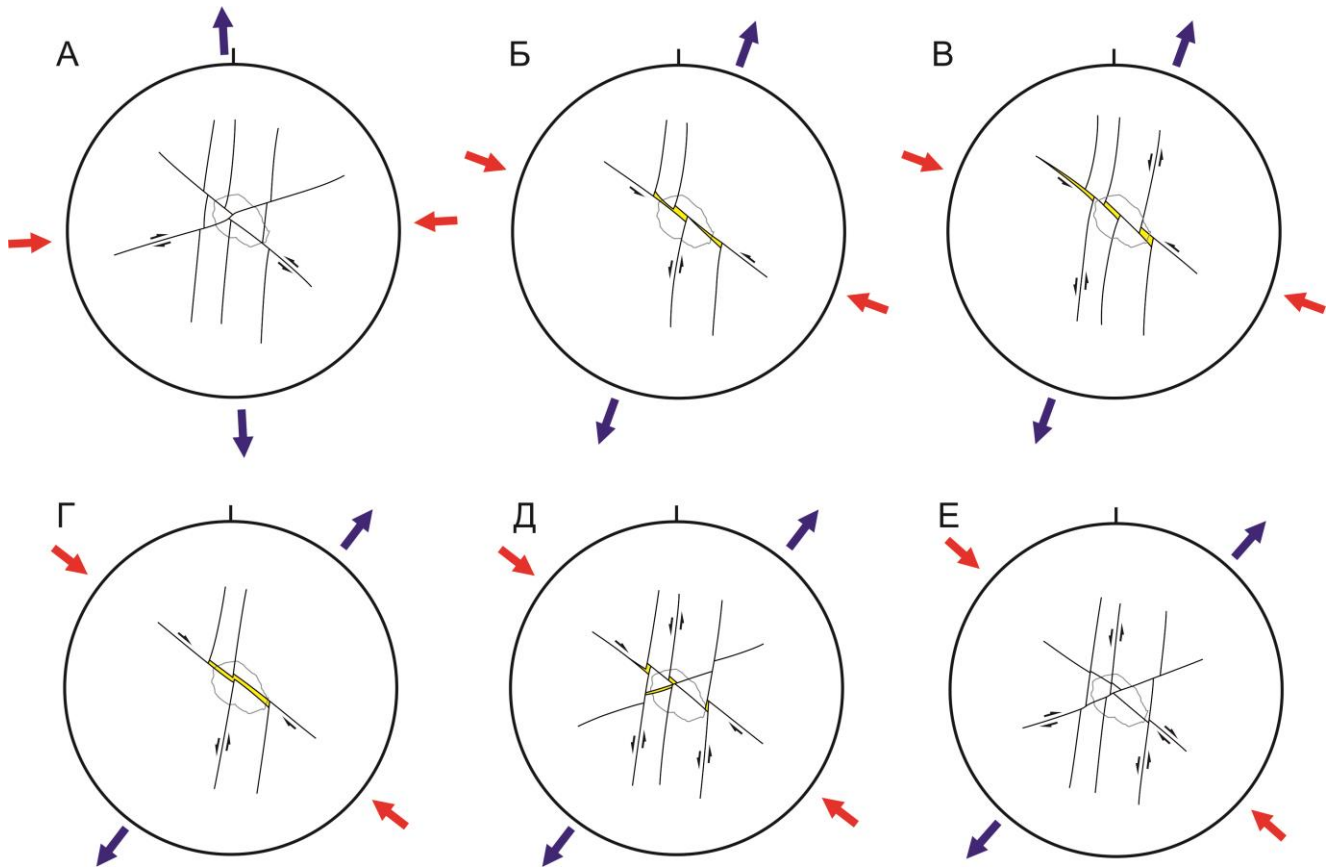


Рис. 35. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир» в условиях северо-западного сжатия – северо-восточного растяжения.

Граничные условия: А – сжатие 265° – растяжение 355° ; Б, В – сжатие 290° – растяжение 20° ; Г, Д – сжатие $\sim 310^\circ$ – растяжение $\sim 40^\circ$; Е – сжатие 312° – растяжение 42° . Условные обозначения смотри на рис. 34.

В рамках первого эксперимента (рис. 36, А-В), в сдвиговом поле с ориентировкой оси сжатия 317° (ось растяжения 47°), последовательно воспроизводилось предполагаемое строение разломного узла, представленное на рис. 32, Б. При этом, на первом этапе, в результате взаимодействия разрывов субмеридионального и северо-западного направлений происходит неравномерное, убывающее к дистальным окончаниям разрывов, раскрытие северо-западного и юго-восточного сегментов рудовмещающего дизъюнктива (рис. 36, А). Эта особенность, как и в первой серии экспериментов, связана с внедрением в тело северо-западного дизъюнктива блоков клиновидной формы.

Добавление в модель на втором этапе еще одного протяженного разрыва, относящегося к системе субмеридионального разлома, лишь частично снимает

напряжения, что выражается в незначительном уменьшении амплитуды раздвигового смещения дистальных сегментов северо-западного дизъюнктива (рис. 36, Б). Амплитуда раздвигового смещения дистальных сегментов рудовмещающего дизъюнктива еще более уменьшается при воспроизведении всех разрывов системы субмеридионального разлома. Однако даже при моделировании относительно сложной разломно-блоковой структуры дистальные сегменты рудовмещающего разрыва остаются открытыми, хотя амплитуды раздвигов и их протяженность уменьшаются (рис. 36, В). Следует отметить, что в ходе данного эксперимента не происходит раскрытие центральных сегментов нарушений.

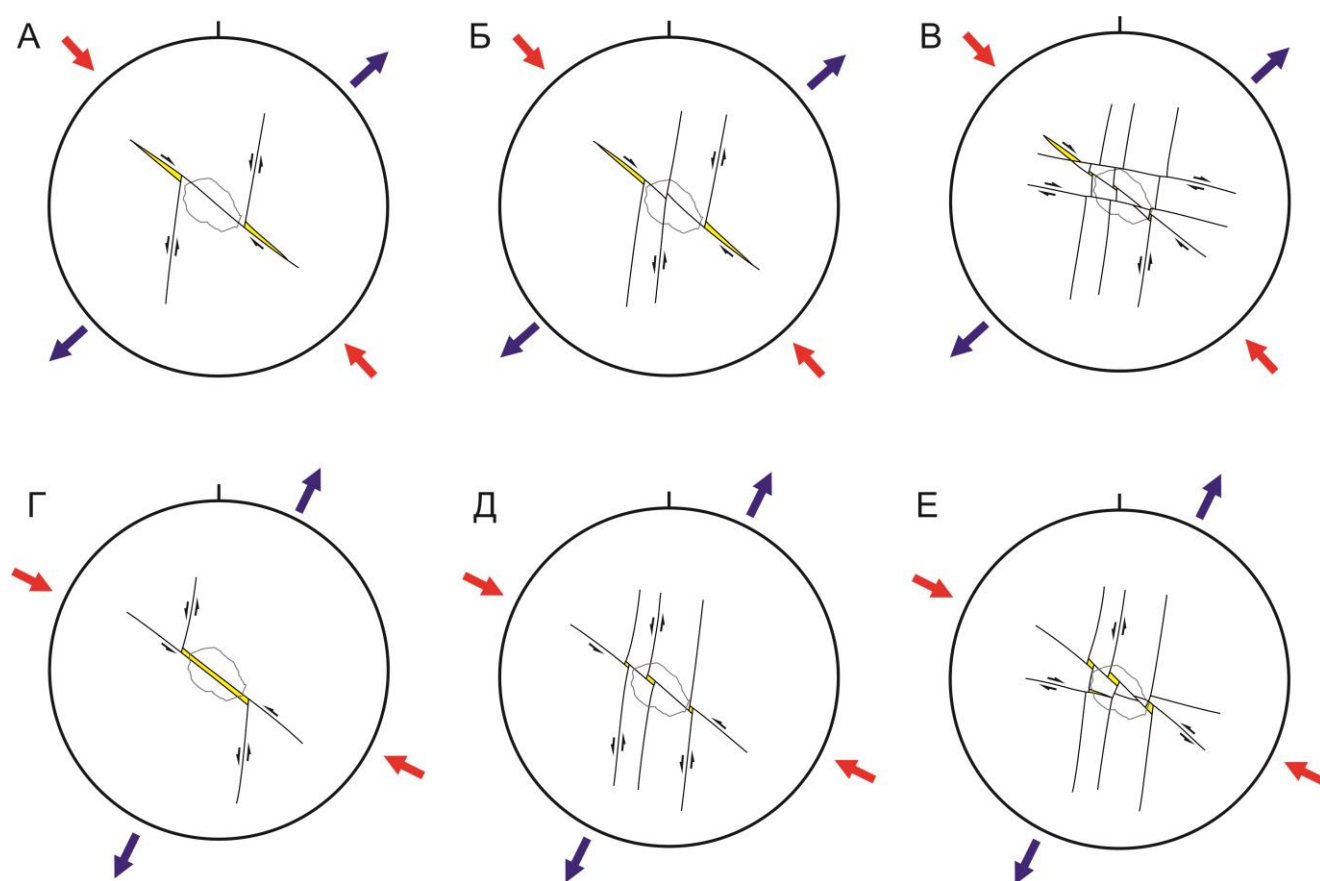


Рис. 36. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир» в условиях северо-западного сжатия, северо-восточного растяжения.

Условные обозначения смотри на рис. 34.

Во втором эксперименте также воспроизводилось строение разломного узла, показанное на рис. 32, Б, но уже в сдвиговом поле с ориентировкой оси сжатия 296° (ось

растяжения 26°). На первом этапе данного эксперимента при взаимодействии разрывов субмеридионального и северо-западного направлений, фиксируется открытие центрального сегмента дизъюнктива северо-западного простирания (рис. 36, Г). Кроме того, в моделях, дополнительно фиксируется раздвиговое смещение крыльев северо-западного сегмента рудовмещающего разрыва, хотя и со значительно меньшей амплитудой. В результате воспроизведения в модели на втором этапе всех трех разрывов системы субмеридионального нарушения, происходит изменение напряженно-деформированного состояния с образованием в X-образных сочленениях северо-западного дизъюнктива и субмеридиональных разрывов дислокаций раскрытия, напоминающих пулл-апарт структуры (рис. 36, Д). Эти дислокации и северо-западный сегмент одноименного дизъюнктива остаются «открытыми» и при значительной деформации разломно-блоковой структуры, образованной сетью разрывов различной ориентировки (рис. 36, Е).

Воспроизведение схемы построенной по результатам массовых замеров (рис. 32, В) при граничных условиях внешнего воздействия на модель в которой соответствовали северо-запад – юго-восточному сжатию (простирание оси 310°) и юго-запад – северо-восточному растяжению (прост. оси 40°) показало, что раскрытие благоприятной для локализации кимберлитов полости возможно при наличии пересечения двух разрывов северо-западного простирания и двух сегментов субмеридионального (север-северо-восточного) разрыва (рис. 37, А). Первые два нарушения характеризуются левосторонним сдвиговым кинематическим типом; при этом смещение по разрыву запад-северо-западной ориентировки несколько больше. С этой особенностью, по-видимому, и связано формирование в моделях открытой полости. Однако при увеличении деформации модели эта полость закрывается, т.к. активные перемещения крыльев сосредотачиваются в пределах разрыва север-северо-западного простирания (рис. 37, Б). Такое развитие в модели связано с повышенным трением на берегах разрывов при увеличении внешней нагрузки. При этом нарушение север-северо-западного простирания в сочетании с сегментами субмеридионального дизъюнктива имеет большую протяженность и, соответственно, подвижность. Если соотношение длин будет обратное, то возможен другой «сценарий».

Весьма интересны результаты моделирования напряженно-деформированного состояния при добавлении в модель разрыва северо-восточной ориентировки, который способствует высокой подвижности нарушений в пределах узла сочленения разрывов. В результате взаимодействия блоков образуются открытые полости, конфигурация которых зависит от величины деформации модели и параметров (длина, угол сочленения) разрывных нарушений, образующих узел (рис. 37, В-Д). Наиболее вероятно образование «открытых» полостей в районе трубки Мир в результате правостороннего смещения крыльев северо-восточного разрыва в сочетании с левосдвиговым перемещением по север-северо-восточному дизъюнктиву (рис. 37, Г, Д). При этом дальнейшая деформация модели способствует увеличению амплитуды смещения крыльев этого нарушения и участки локального растяжения благоприятных для формирования трубки (рис. 37, Д).

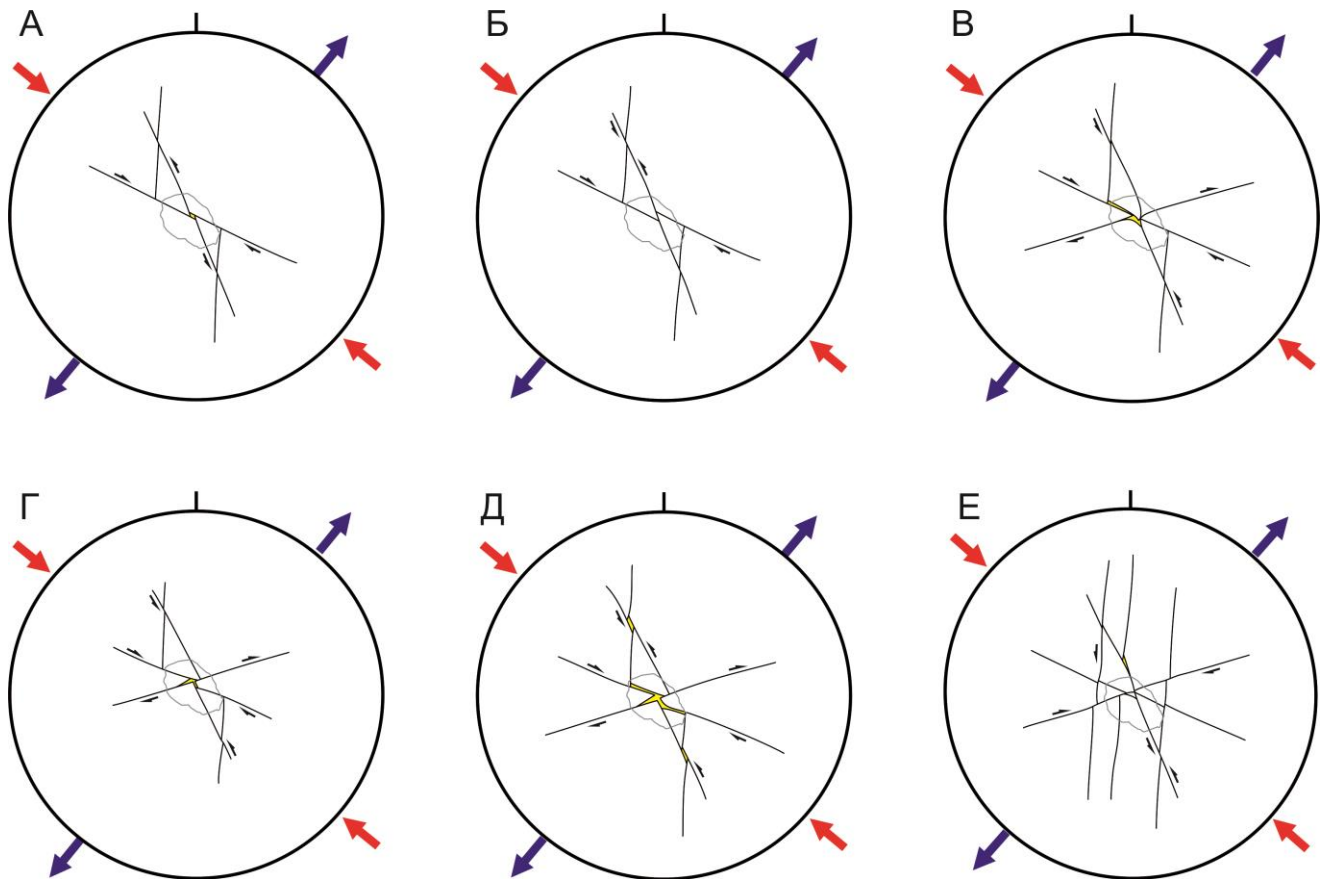


Рис. 37. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир» в условиях северо-западного сжатия, северо-восточного растяжения.

Условные обозначения смотри на рис. 34.

И, наконец, нанесение на модель всех нарушений образующих разломный узел приводит к зажатию плоскостей разрывов. То есть напряженно-деформированное состояние в узле сочленения разрывов при данных условиях не способствует формированию открытых полостей в центральной части разломно-блоковой структуры (рис. 37, Е).

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что раскрытие сегментов северо-западного разрыва, вмещающего трубку Мир, происходит только в условиях, когда имеют место напряжения сжатия ориентированные в северо-западном или запад-северо-западном направлении (соответственно, при северо-восточном или север-северо-восточном растяжении). При этом форма и размеры таких сегментов зависит от количества и направлений разрывов образующих разломный узел. Анализируя полученные результаты, мы исходили из того, что трубка Мир представляет собой сложное многофазное тело [Владимиров и др., 1981], а активизация разрывов в узле разрывных нарушений, вмещающем кимберлитовое тело, на том или ином этапе могла происходить не одновременно, в определенной последовательности.

Полученные данные дают основание предполагать, что под воздействием северо-западного сжатия и северо-восточного растяжения, прежде всего, происходит активизация северо-западного нарушения и субмеридиональных дизъюнктивов. При этом первые из них оказываются структурами растяжения, а по вторым происходят левосдвиговые смещения. В результате вдоль северо-западного нарушения наблюдается раскрытие узких протяженных участков, часть из которых представляет собой структуры типа пулл-апарт (рис. 35, Д и 36, Д). С данными структурными элементами связывается внедрение протяженных дайкообразных тел (первая фаза кимберлитов?).

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 (рис. 38). Также это приводит к возникновению участков раскрытия, но их размеры заметно меньше, чем на первом этапе (рис. 35, Г и 36, Г). Примерное расположение этих участков в пределах, нанесенных на модель контуров трубки, удовлетворительно коррелируют с известными данными [Владимиров

и др., 1981] по распределению различных магматических фаз кимберлитов в пределах трубки Мир (рис. 38).

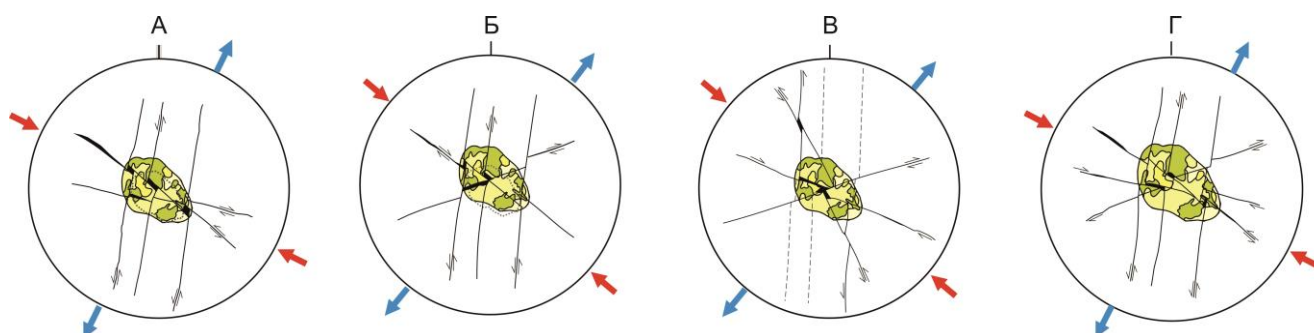


Рис. 38. Сводные результаты различных экспериментов по моделированию напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир» в условиях северо-западного сжатия, северо-восточного растяжения.

Условные обозначения смотри на рис. 34.

По соотношению структур растяжения, полученных в экспериментах и положению магматических фаз кимберлитов в контуре рудного тела 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. 38, А);

II – серия разрывов север-северо-восточной ориентировки совместно с дизъюнктивами северо-западного, северо-восточного и запад-северо-западного направлений (рис. 38, Г);

III - серия разрывов север-северо-восточной ориентировки совместно с дизъюнктивами северо-западного и северо-восточного направлений (рис. 38, Б);

IV – два сегмента разрывов север-северо-восточной ориентировки совместно с дизъюнктивами северо-западного, северо-восточного и запад-северо-западного направлений (рис. 38, В).

3.4.3. Моделирование напряжённо-деформированного состояния сегментов разрывов разломно-блоковой структуры в окрестностях трубки Мир

В данной серии было проведено три эксперимента по моделированию детальной разломно-блоковой схемы, полученной при изучении тектонических трещин и зон разрывных нарушений в пределах подземного рудника «Мир» (рис. 23). Поскольку в предыдущих экспериментах было установлено, что наиболее благоприятные для внедрения кимберлитового материала структуры растяжения образуются под действием северо-западного сжатия, ориентировки оси сжатия в представляемых экспериментах варьировали от северо-западной (310° , 325°) до север-северо-западной (340°).

Моделированию структурной ситуации на участке локализации трубки Мир, обусловленной разрывами различной комбинацией направлений (субмеридиональное, северо-западное, северо-восточное и субширотное) и сдвиговым полем с ориентировкой оси сжатия 325° и оси растяжения 55° было посвящено два эксперимента (рис. 39, 40). Поэтапное воспроизведение сегментов перечисленных направлений нарушений в окрестностях трубки Мир, позволило выявить следующие особенности. На первом этапе, моделировалось взаимодействие трёх разрывов северо-западного и сегментов субмеридионального направлений. В результате их взаимодействия, происходило раскрытия центрального северо-западного разрыва в пределах кимберлитовой трубки, а также структуры растяжения северо-западного и юго-восточного сегментов за пределами трубки северо-западного дизъюнктива (рис. 39, А). Тем самым модельные аналоги дизъюнктивов характеризуются сдвиговыми перемещениями крыльев с формированием локальных структур растяжения. Добавление в модель на втором этапе сегментов северо-восточного простирания, лишь частично изменяет картину напряженно-деформированного состояния в модели, выражаемое в незначительном уменьшении амплитуды раздвигового смещения, как в центральной, так и в дистальных частях северо-западных разрывов (рис. 39, Б). На юго-западной части контура трубки наблюдается раскрытия типа пулл-апарт структуры, образованной на Х-образном сочленении северо-западного и субмеридионального разрывов. После нарезания на третьем этапе сегментов субширотного и субмеридионального направлений, участки локальных раздвиговых структур, в целом, остаются на прежнем месте, но наблюдается замыкание южного сегмента одного из разрывов северо-западного простирания (рис. 39,

В). На четвёртом этапе на модели субмеридиональные сегменты соединялись в единые разрывы. Это также привело к закрытию одного из сегментов северо-западного дизъюнктива с одновременным увеличением амплитуды левостороннего сдвига на субмеридиональных разрывах (рис. 39, Г). Стоит отметить неизменное положение локальных радвиговых структур в пределах центрального северо-западного сегмента кимберлитовой трубки на всех этапах, кроме заключительного (рис. 39, Д). При добавлении на последнем этапе полной длины северного субширотного разрыва, привело к закрытию сегментов разрывов в пределах контура будущей кимберлитовой трубки.

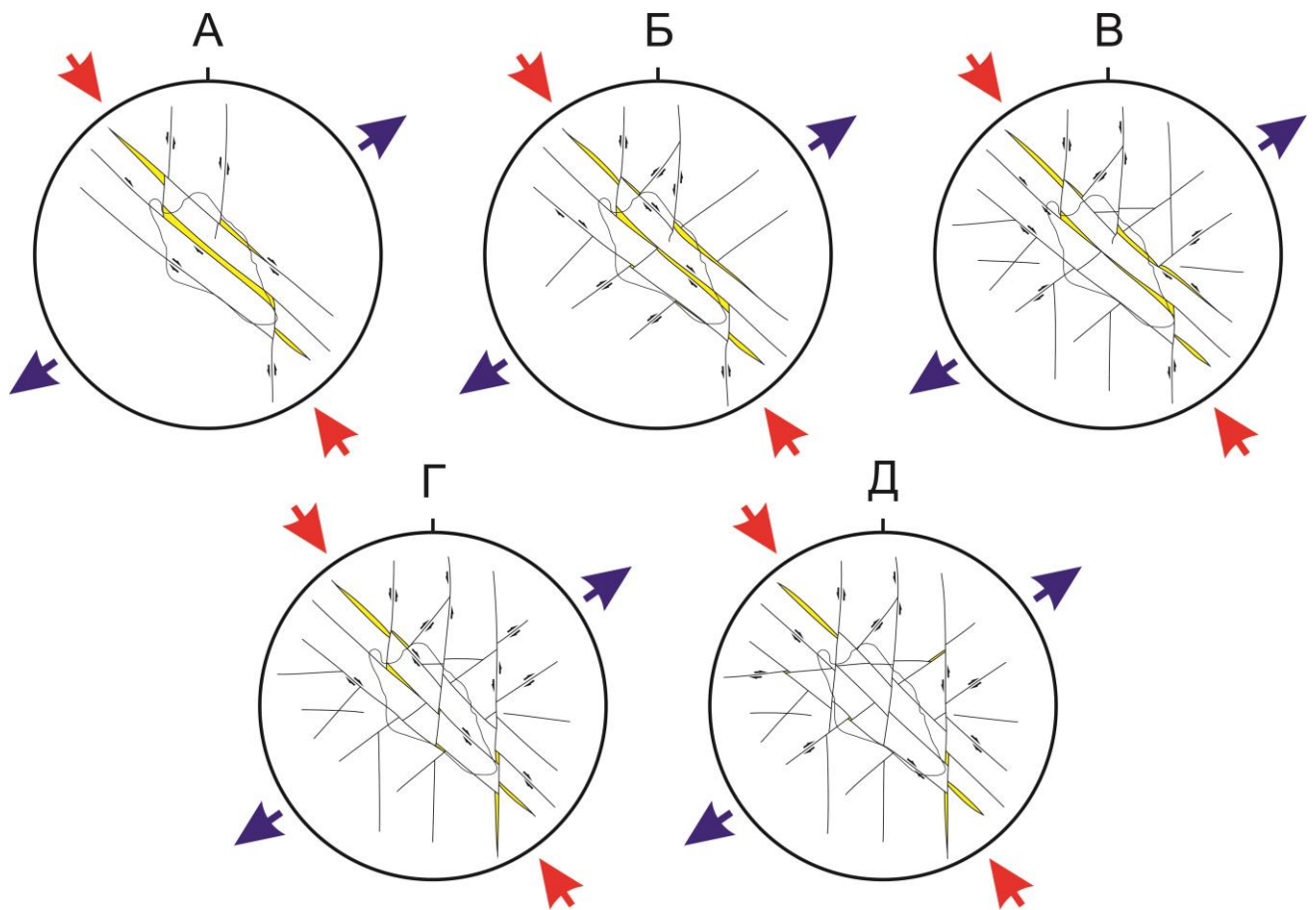


Рис. 39. Моделирование напряжённно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающую кимберлитовую трубку «Мир» при сжатии 325° , растяжении 55°

Условные обозначения смотри на рис. 34.

Во втором эксперименте воспроизводилось строение разломного узла (рис. 23), но уже в сдвиговом поле с ориентировкой оси сжатия 340° и растяжения 70° (рис. 40). На первом этапе в модели нарезались разрывы северо-западного и сегменты разрывов субмеридионального направлений. Возникающие при этом участки локального раскрытия фиксируются как в пределах контура будущей кимберлитовой трубки, так и за её пределами (рис. 40, А). Добавление на втором этапе сегментов разрывов субмеридионального и северо-восточного направлений, изменяет напряженно-деформированное состояние модели и приводит к дополнительному раскрытию субмеридионального и северо-западного сегментов (рис. 40, Б). На третьем этапе на модель добавлялись сегменты широтных нарушений. При этом, в отличие от предыдущего эксперимента, фланговые сегменты субмеридиональных разрывов не соединялись в единые дизъюнктивы. При нагружении модели, наблюдалось сочетание правосторонних сдвигов по субмеридиональным разрывам и левых – по северо-западным и широтным дизъюнктивам. В результате сдвиговых смещений формировались локальные участки растяжения (раскрытия) как северо-западного, так и субмеридионального направлений (рис. 40, В). Обращает на себя внимание, тот факт, что, в отличие от предыдущего эксперимента, на всех этапах моделирования имеют место участки структур растяжения северо-западных разрывов в пределах контура будущей трубки и дайки на ее северо-западном окончании.

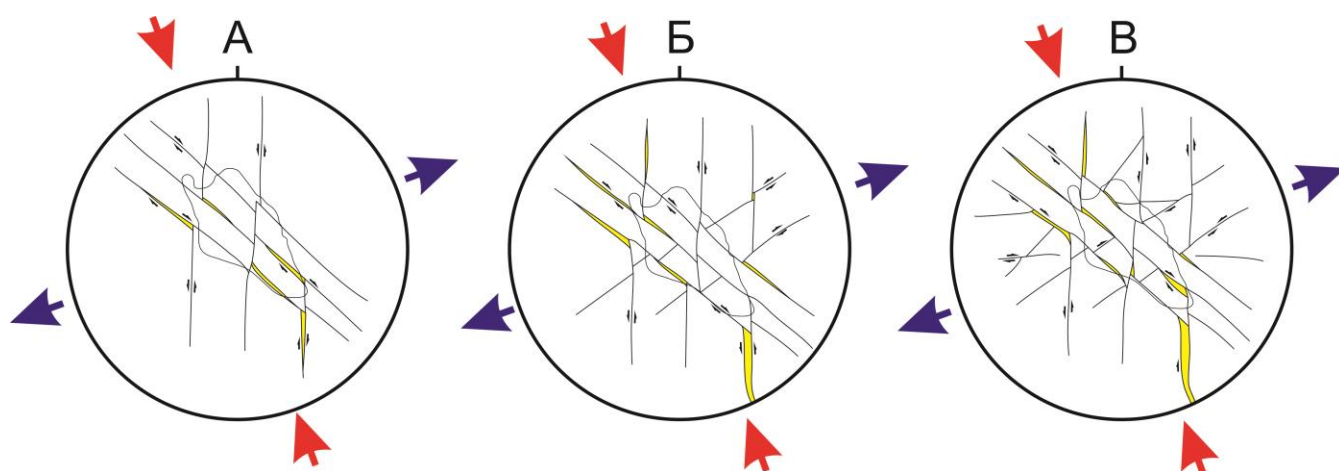


Рис. 40. Моделирование напряжённо-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающую кимберлитовую трубку «Мир» при сжатии 340° , растяжении 70°

Условные обозначения смотри на рис. 34.

Сочетание областей ослабления (боковые минимумы) с напряжённо-деформированными блоками, а также со структурами растяжения направленных перпендикулярно северо-западным разрывам, обеспечивает формирование кимберлитовой трубки Мир.

В третьем эксперименте воспроизводимая схема разломно-блокового строения месторождения трубка Мир несколько отличается от предыдущих. Прежде всего, отсутствием двух фланговых северо-восточных разрывов, а также прорезанием дизъюнктивов других направлений в каждом из этапов на всю длину (рис. 41). Внешнее воздействие на модель соответствовали северо-запад – юго-восточному сжатию (ось 310°) и юго-запад – северо-восточному растяжению (ось 40°). На первом этапе на модели были нанесены разрывы субмеридионального и северо-западного направлений, в результате взаимодействия которых наблюдается раскрытие отдельных сегментов преимущественно в пределах контура будущей кимберлитовой трубки (рис. 41, А). Субмеридиональные разрывы характеризуются левосторонним сдвигом, а дизъюнктивы северо-западного простирания правым. Добавление в модель на втором этапе серии субширотных разрывов (рис. 41, Б) меняет ее напряженно-деформированное состояние в центральной части (в пределах контура будущей трубки). Здесь наблюдается только небольшой по размерам раскрытый сегмент северо-западного разрыва. На третьем этапе в модель вносится разрыв северо-восточного направления. При этом состояние модели практически не изменяется, лишь добавляется раскрытие типа пулл-апарт структуры на X-образном пересечении субширотного и северо-западного разрывов (рис. 41, В). На всех этапах моделирования фиксируются раздвиговые смещения крыльев северо-западных сегментов.

Анализ полученных в третьей серии экспериментов результатов показывает, что максимально благоприятные структурные ситуации для внедрения 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 широтных нарушений практически сразу приводило к изменению напряженно-деформированного состояния и закрытию сегментов разрывов в пределах контура будущей кимберлитовой трубки (рис. 39 и 41).

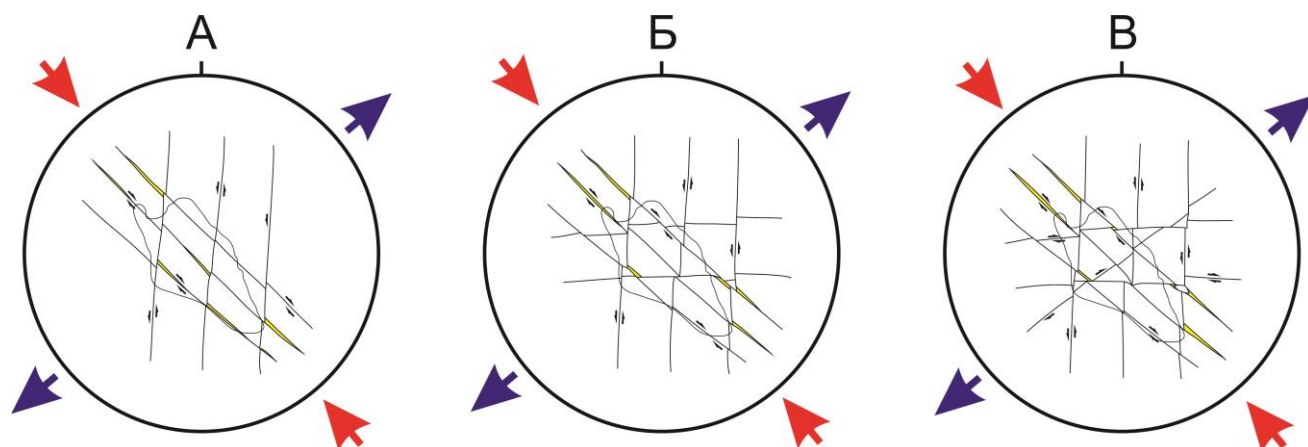


Рис. 41. Моделирование напряжённо-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающую кимберлитовую трубку «Мир» при сжатии 310° , растяжении 40°

Условные обозначения смотри на рис. 34.

Другим интересным результатом явился тот факт, что наибольшие величины раскрытий в контуре будущего тела возникали при нанесении субмеридиональных и северо-восточных разрывов в виде отдельных сегментов, в то время как протягивание дизъюнктивов данных направлений на всю длину приводило к уменьшению данного параметра.

Анализ траекторий позволил выявить специфику напряжённого состояния в окрестностях разломного узла при последовательном добавлении в модель разрывов и изменении силового поля на границах желатинового студня (рис. 42). При достаточно простой картине разломного узла раскрытие происходит только по северо-западным разрывам за счёт не только растяжения, направленные практически ортогонально, но и в результате блоковых перемещений, вызванным правосторонним сдвигом (рис. 42, А). После добавления в модель разрывов субмеридионального простирания, происходит перераспределение напряжений и деформаций, один из разрывов расположен на всю длину модели и два сегмента прорезаны на северо-западной и юго-восточной части (рис. 42, Б). Наблюдаются пять открытых полостей в пределах контура кимберлитовой трубки. Также как и на более простой модели раскрытия происходят на разрывах северо-западного простирания. Ось растяжения сдвигового поля в окрестностях этого сегмента практически перпендикулярна его простиранию. В центральной части трубки фиксируется раскрытие полости по типу пулл-апарт структур связанной с разломно-

блоковой делимостью участка исследования. При активации шести разрывов северо-западного и субмеридионального простирания, а также сегментов северо-восточного и субширотного направлений наблюдается более сложное напряжённо-деформированное состояние (рис. 42, В).

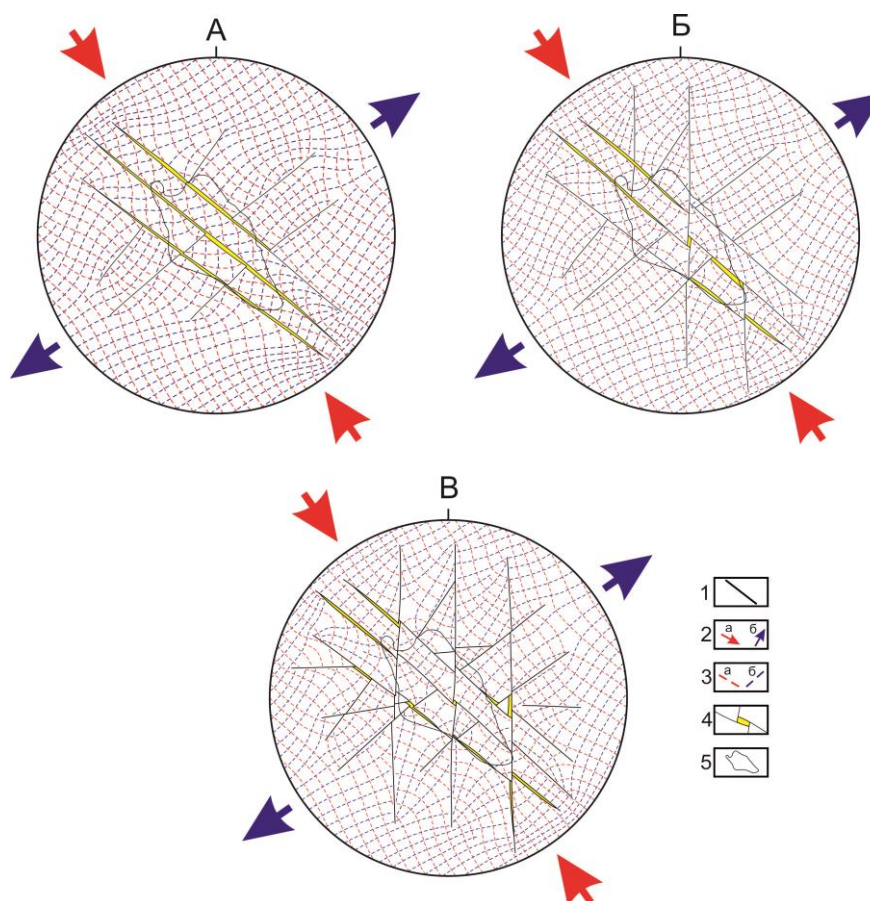


Рис. 42. Траектории главных напряжений в окрестностях разломного узла района трубки «Мир», представленного различным сочетанием разрывов.

А, Б, В - варианты экспериментов. 1 - разрывы в моделях; 2 - ориентировка внешних воздействий на границы модели: сжатие (а), растяжение (б); 3 - траектории осей сжатия (а) и растяжения (б); 4 - структура локального растяжения; 5 - местоположение кимберлитовой трубки; 6 - изотропные точки.

Таким образом, можно констатировать, что полученные результаты при проведении оптического моделирования полностью подтверждают сделанное предположение о том, что формирование структуры разломного узла, вмещающего кимберлитовую трубку Мир, определяется взаимодействием сегментов разрывных нарушений субмеридионального и северо-западного простираний. При этом, наряду с перечисленными разрывами, в образовании локальных структур растяжений, благоприятных для локализации кимберлитового тела, являются разрывы северо-

восточного простирания, в то время как широтные нарушения относятся к элементам, препятствующими формированию подобных структур.

Исходя из предположения, что разрывные нарушения 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

4.1. Выделение перспективных площадей на поиски кимберлитовых трубок на территории Мало-Ботуобинского района

На площади Мало-Ботуобинского района в 2002-2004 гг. были проведены площадные тектонофизические исследования, направленные на изучение разрывных нарушений и тектонической трещиноватости в разновозрастных породах платформенного чехла. Основными объектами изучения служили наиболее достоверно установленные по геофизическим данным разломы Вилуйско-Мархинской зоны: Западный, Параллельный, Центральный, Восточный и Аппаинский. Были выполнены площадные исследования на площади Мирнинского кимберлитового поля, маршрут по р. Малая Ботуобия от п. Алмазный до п. Светлый, а также изучение карьеров трубок Дачная, Таежная и Мир. Всего в процессе работ создано 78 точек тектонофизических наблюдений (рис. 43) в отложениях палеозоя и мезозоя в пределах которых охарактеризовано, в общей сложности, около 6000 тектонических трещин и разноранговых разрывных нарушений.

Было установлено, что определяющую роль в тектоническом строении осадочного чехла играют субвертикальные и субгоризонтальные разрывные нарушения различных рангов. Первые, как правило, представлены зонами повышенной трещиноватости, грубого расщепления 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 ориентировок, с тенденцией разделения последних на восток-северо-восточные и запад-северо-западные.

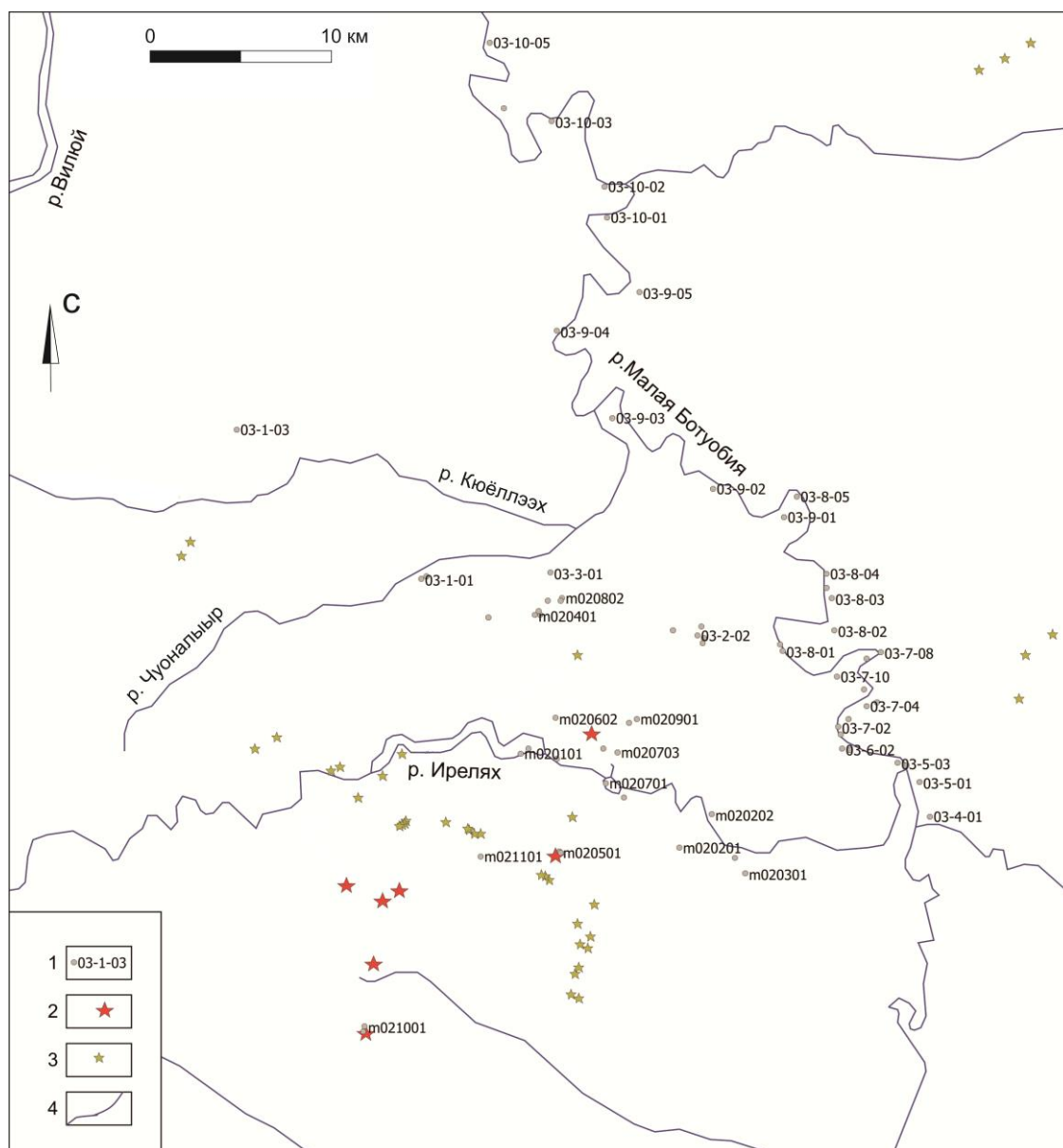


Рис. 43. Схема расположения точек тектонофизических наблюдений на площади Мало-Ботубинского района.

1 – точки наблюдения и их номера; 2 – кимберлитовые тела; 3 – туфовые трубки; 4 – речная сеть.

Субгоризонтальные нарушения представлены зонами межслоевых срывов и послонных нарушений (зоны повышенной трещиноватости и дробления пород) мощностью от первых сантиметров до нескольких метров. Основной тип смещений по ним – надвиговой. Надвиговой характер субгоризонтальных разрывов чаще всего устанавливался по наличию характерных структур – приразломных заворотов слоев и складок, а также надвиговых дуплексов. Немногочисленные прямые наблюдения надвигов позволяют выделить среди них две основные системы северо-восточного и

запад-северо-западного простирания с углами падения сместителей от 5 до 15°. Амплитуды смещений по субгоризонтальным разрывам колеблются (в зависимости от ранга структур) от первых см до первых десятков м. Отмечены структурные признаки взаимодействия субвертикальных и послонных разрывных нарушений, свидетельствующие об их синхронном “срабатывании”.

Выполненные структурные построения показали хорошую сходимость зафиксированных разломных зон с результатами геофизических работ Ботуобинской экспедиции АК АЛРОСА ПАО. Были восстановлены поля тектонических напряжений, и их относительная последовательность проявления во времени. Итогом работы, проделанной в 2002-2004 гг. 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 ориентировок.

Результаты исследований, проведенных на эталонном объекте – месторождении трубка Мир позволяют переосмыслить и дополнить сделанные ранее выводы. Так, результаты геолого-структурного картирования участка локализации месторождения и моделирования на оптически активных материалах, показывают, что формирование структур растяжения, с которыми может быть связано внедрение кимберлитовых тел, 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 сложно построенного разломного узла.

При этом были сформулированы структурные критерии для выделения участков, перспективных на обнаружение кимберлитового тела типа трубки Мир. Это узловое сочленения разломных зон север-северо-восточного (должна быть представлена серией

сближенных нарушений), северо-западного, северо-восточного и широтного простираний.

Выявленные критерии были использованы для повторной оценки центральной части Мало-Ботубинского 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 была дополнена линеаментами, выделенными автором в результате структурного дешифрирования топографических карт масштабов 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 11, 12, 17, 18 и серии Р50, номера 7, 8, 13, 14) масштабов (рис. 44)

При проведении анализа были рассмотрены взаимоотношения разноранговых разрывных структур на территории охватывающих Мирнинское кимберлитовое поле и часть площади к северу от него. Обязательным условием для отнесения разломного узла к перспективной структуре являлось наличие в его строении протяженной зоны восток-северо-восточного (субмеридионального) направления, а также зон северо-западной (примерным простиранием 310) и северо-восточной ориентировок.

Как видно из рисунка, критериям, установленным в результате изучения эталонного участка, отвечают далеко не все пересечения разломных зон. На современном уровне знаний о тектоническом строении площади Мало-Ботубинского района (рис. 44) можно выделить девять перспективных участков.

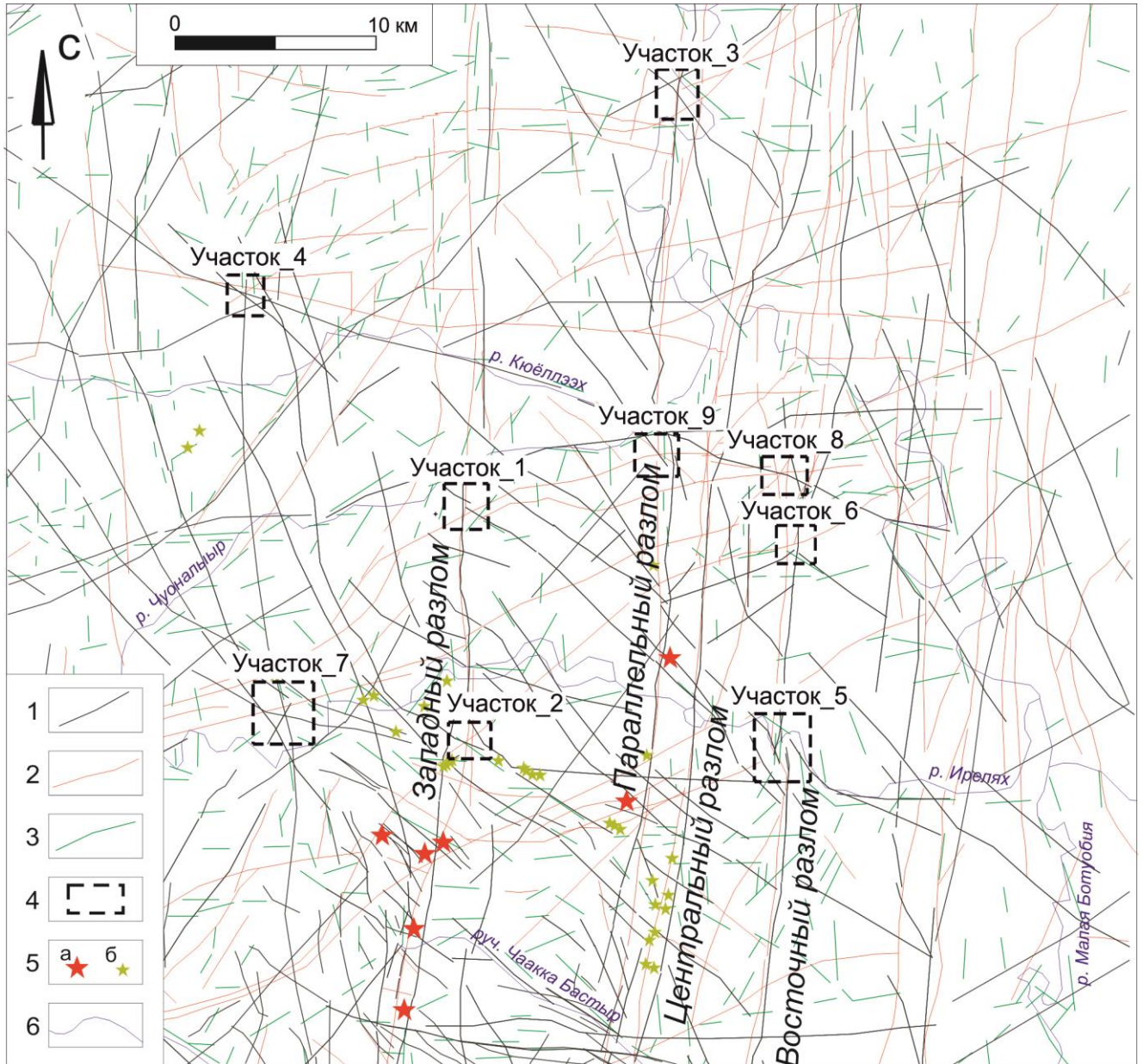


Рис. 44. Схема разломной тектоники Мало-Ботубобинского района [Матросов, 2006], с дополнением результатов структурного дешифрирования.

1 – разломы, выделенные по данным интерпретации потенциальных полей; 2 – разломы, выделенные по данным сейсморазведки; 3 – линейaments, выделенные в результате структурного дешифрирования; 4 – участки, перспективные по геолого-структурным признакам, на обнаружение кимберлитовых тел типа трубки Мир и их номера; 5 – трубки: кимберлитовые (а) и туфовые (б); 6 – речная сеть.

Учитывая достаточно мелкий масштаб схемы и тот факт, что линии разломов, проведенные на основе геофизических данных, могут иметь некоторое отклонение от реальных сместителей, размеры выделенных участков колеблются от $1,8 \times 2,0$ до $2,8 \times 3,0$ км.

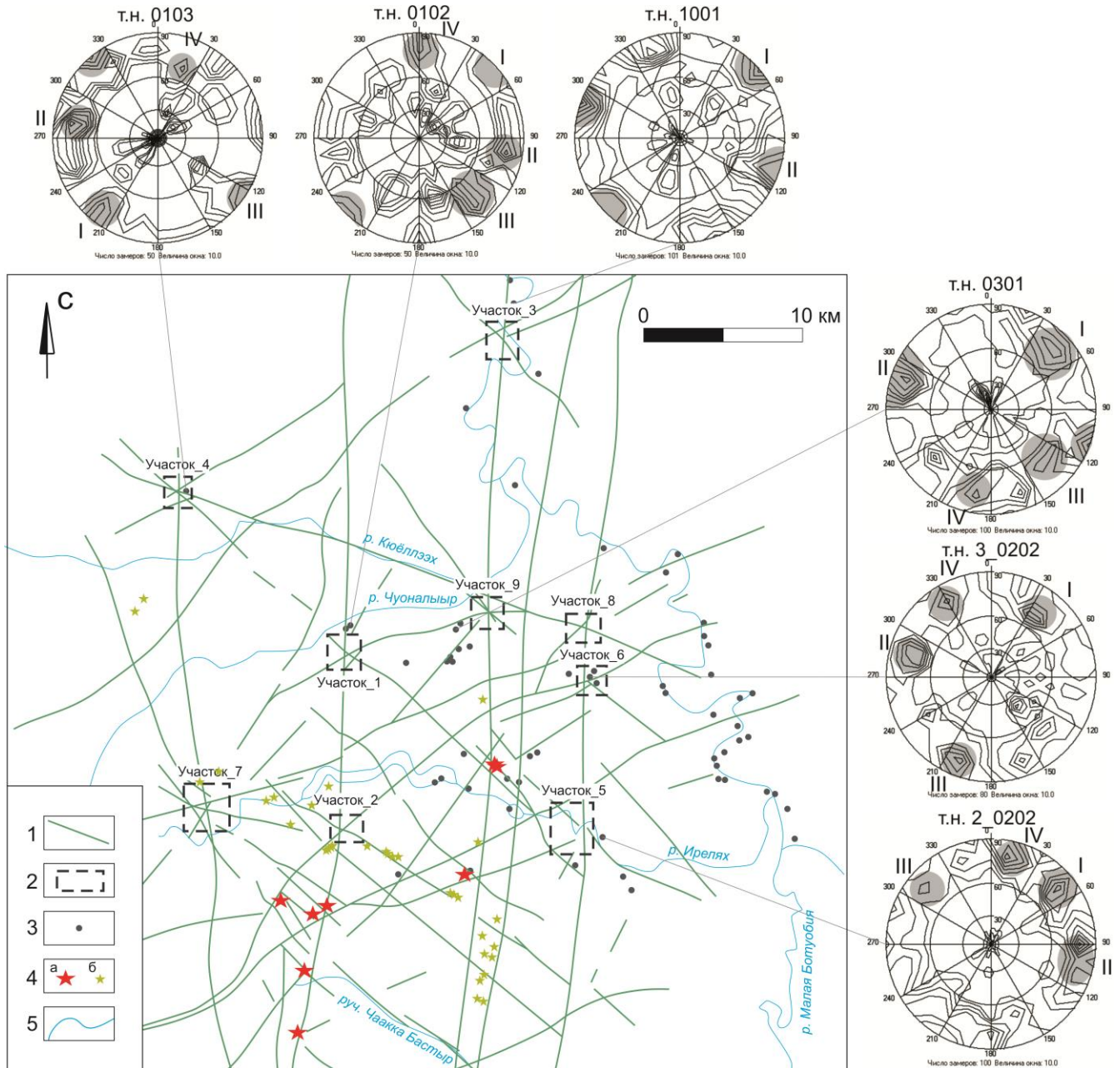


Рис. 45. Схема расположения перспективных участков для обнаружения кимберлитовых тел типа трубки Мир по геолого-структурным признакам в пределах центральной части Мало-Ботубинского района.

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.

Схема, на которой показаны одни разломы, образующие разломные узлы, выделенные в качестве перспективных участков, представлена на рис. 45. Она свидетельствует, что практически все из выделенных участков представлены узлами протяженных (региональных) структур восток-северо-восточного, северо-западного,

северо-восточного и запад-северо-западного направлений. В непосредственной близости от границ или непосредственно в пределах шести из показанных на схеме участков, имеются точки тектонофизических наблюдений. Данные, собранные в этих точках, в большинстве своем, подтверждают наличие или близость узла разломных зон (см. рис. 45). В части из них (т.н. 0103, 0102, 1001, 0301 и 3_0202) зафиксированы субвертикальные локальные нарушения север-северо-восточного и северо-западного, реже северо-восточного простираний. Весьма показательны круговые диаграммы, построенные по результатам массовых замеров, выполненных в точках (рис. 45, диаграммы по периферии). На пяти из них (т.н. 0103, 0102, 0301, 2_0202 и 3_0202) присутствуют интенсивные максимумы, соответствующие четырем, интересующих нас разломных направлений: I – северо-западному, II – север-северо-восточному, III – северо-восточному и IV – запад-северо-западному. Полученный результат определенным образом подтверждает высказанное выше предположение, что нарушения запад-северо-западной (широтной) ориентировки не всегда устанавливаются геофизическими методами, однако отражаются в тектонической трещиноватости.

4.2. Результаты оптического моделирования процесса активизации разрывной структуры Мало-Ботубинского района

Для того чтобы подтвердить выделение перспективных участков было проведено оптическое моделирование напряжённно-деформированного состояния разломных узлов в пределах центральной части Мало-Ботубинского района при различных действиях тектонического сжатия. Всего проведено девятнадцать экспериментов, отличающиеся граничными условиями нагружения модели. Из них только в семи опытах фиксируется локальные раздвиговые структуры в районах местоположения известных кимберлитовых трубок. В этих семи экспериментах на границах моделей заданы силовые воздействия соответствующие:

- 1) Субмеридиональному сжатию – субширотному растяжению;
- 2) Северо-восточному сжатию – северо-западному растяжению;
- 3) Северо- западному сжатию – северо-восточному растяжению.

Поэтапное добавление неоднородностей в виде разрывов в модели, позволяет изучить напряжённно-деформированное состояние в окрестностях более простых узлов

сочленения разломов, а также при сложной разломно-блоковой структуре. Моделированию подвергались субмеридиональные, северо-западные и север-северо-западные разломы для выяснения взаимоотношений друг с другом. Разрывы северо-восточного направления не наносились, так как картина становилась очень сложной для восприятия и мелкие блоки при небольшом приложении горизонтального сжатия выпирали, что делает эксперимент не удавшимся, а также ввиду их сложной нарезки.

Моделированию разломно-блоковой схемы Мирнинского поля проведено пятнадцать экспериментов при приложении горизонтального сжатия в диапазоне от запад-северо-западного (295°) до север-северо-западного (350°) направлений. Наиболее приемлемые результаты моделирования относятся к интервалу от 335° до 350° , являющиеся благоприятными для внедрения кимберлитового тела типа трубки Мир.

В первом эксперименте при моделировании серий субмеридиональных и северо-западных разрывов зафиксировано две структуры локального растяжения напоминающая структуру типа пулл-апарт (рис. 46, А), связанная с разломно-блоковой делимостью участка исследования. В одной из такой структуры находится трубка «Мир». На концах разрывов субмеридионального простирания в северной и южной частях модели наблюдаются наибольшая концентрация максимальных касательных напряжений. С помощью изоклин были построены траектории главных напряжений (рис. 46, В). Оси растяжения в пределах открытой полости в северо-западной части практически ортогональны. Расположение раскрытой полости не в области кимберлитовой трубки «Мир» объясняется тем, что для получения данных по траекториям главных напряжений, модель подвергалась меньшему воздействию горизонтального сжатия. В центральной части не отрисовались траектории главных нормальных напряжений из-за отсутствия изоклин, что может быть связано с очень сложной разломно-блоковой схемой.

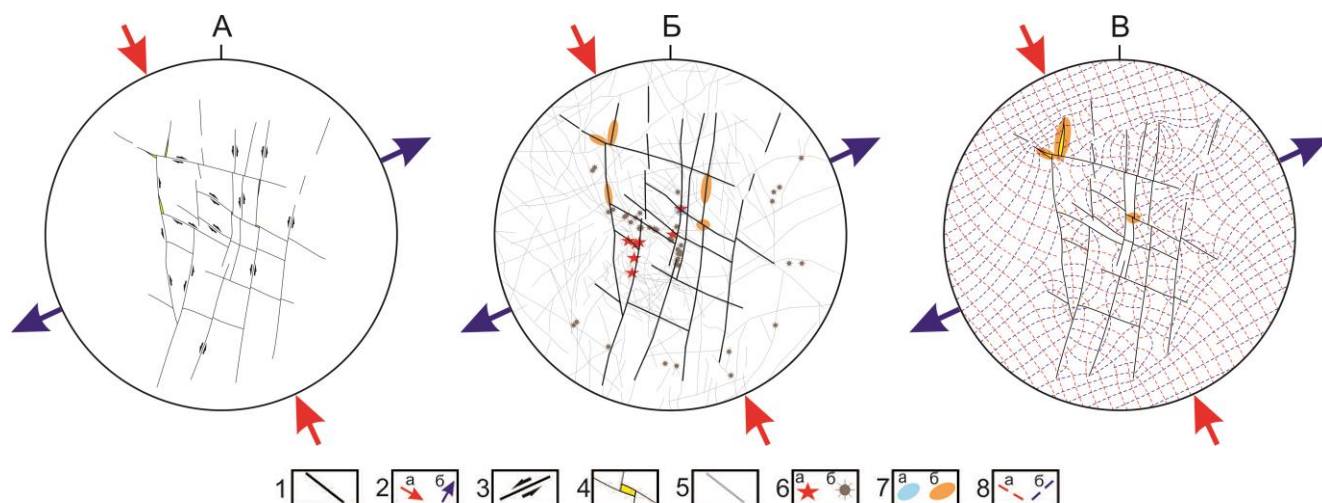


Рис. 46. Моделирование напряжённо-деформированного состояния разломных узлов Мирнинского кимберлитового поля при сжатии 335° , растяжении 65° .

1 - разломы; 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 - раскрытия разломов: в пределах кимберлитовых трубок (а), в других местах (б); 8 - траектории осей сжатия (а) и растяжения (б).

При горизонтальном сжатии на втором опыте (ось простирания 345°) реакция разрывной сети уже на первом этапе существенно отличается от предыдущего эксперимента. Открытые полости благоприятные для внедрения кимберлитовых тел наблюдаются в окрестностях кимберлитовых трубок «Интернациональная» и «Амакинская» (рис. 47, А, В). После нарезания сегментов север-северо-западного направления, добавляется раскрытие в районе трубки «Дачная» (рис. 47, Б, Г), за счёт правого сдвига северо-западного разрыва. На места распространения максимальных касательных напряжений угол поворота горизонтального сжатия не повлияло, а изменилась лишь площадь за счёт приложения более большой нагрузки.

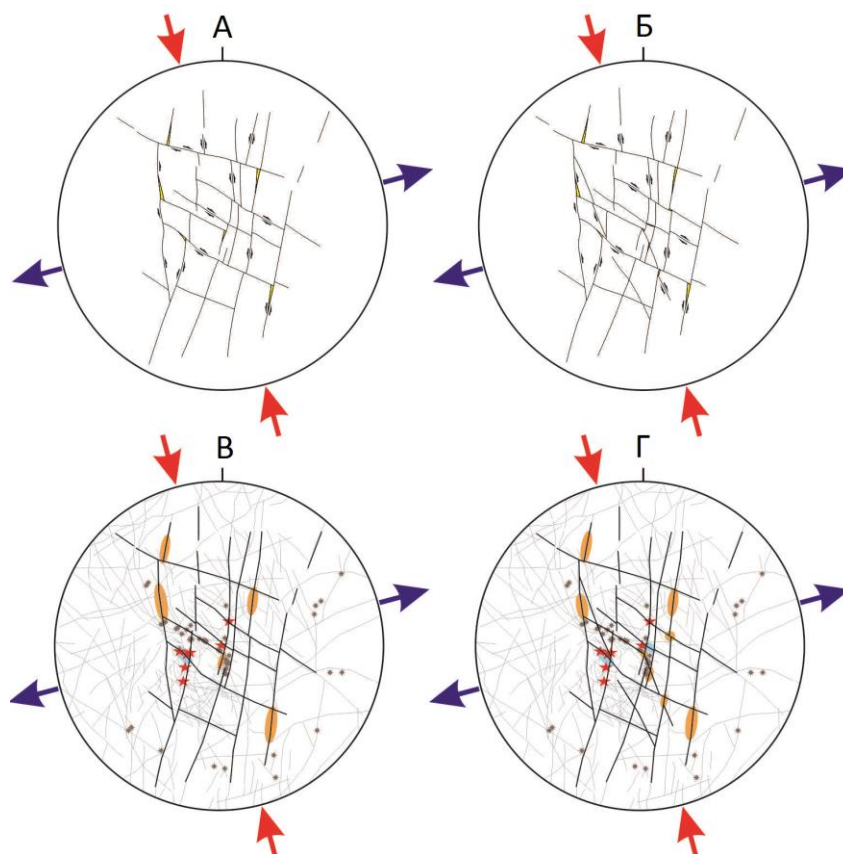


Рис. 47. Моделирование напряжённо-деформированного состояния разломных узлов Мирнинского кимберлитового поля при сжатии 345° , растяжении 75° .
Условные обозначения смотри на рис. 46.

Моделирование структурной ситуации в пределах центральной части Мало-Ботуобинского района с субмеридиональным сжатием и субширотным растяжением посвящено два эксперимента, отличающиеся порядком прорезания разрывов. На начальном этапе первого опыта (рис. 48, А, Г), воспроизводились нарушения двух направлений (субмеридионального и северо-западного) с приложением на модель небольшой силы сжатия наблюдается локальная раздвиговая структура сегмента субмеридионального дизъюнктива в районе кимберлитовой трубки «Мир» (рис. 48, Г). Разломы северо-западного простирания характеризуются правосторонним сдвигом. При дальнейшей нагрузке на модель наблюдается структура растяжения по северо-западному сегменту на пересечении с Параллельным разломом субмеридионального простирания (рис. 48, Б, Д). При добавлении на модель нарушений север-северо-западного направления картина практически не изменится (рис 48, В, Е), кроме амплитуды раздвигового смещения дистальных сегментов разрывов субмеридионального простирания, которая увеличиваются при большом воздействии

сил сжатия (рис. 48, Г, Д, Е). Раскрывающийся сегмент субмеридионального нарушения на всех этапах эксперимента в районе кимберлитовой трубки «Мир» может быть увязан с внедрением дайки долеритов.

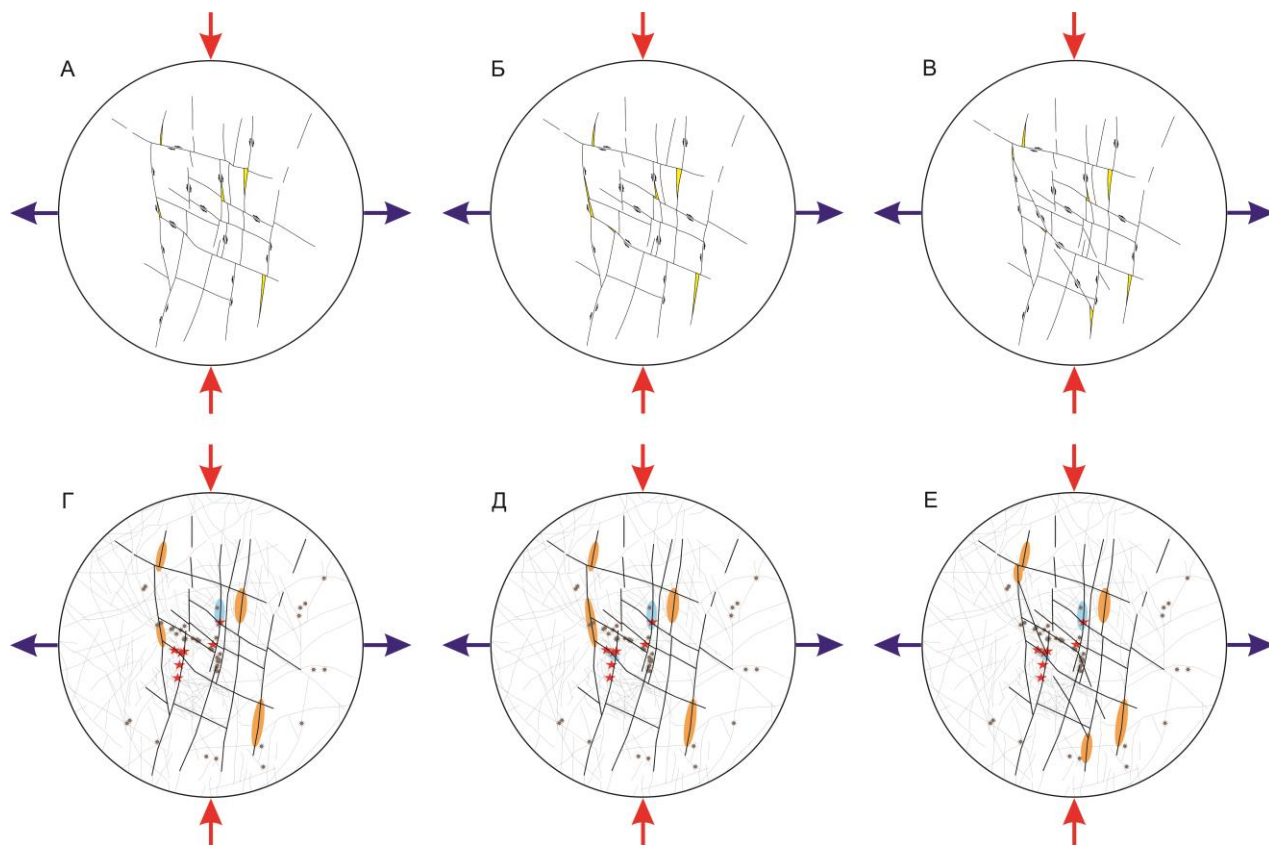


Рис. 48. Моделирование напряжённо-деформированного состояния разломных узлов Мирнинского кимберлитового поля при сжатии 0° , растяжении 90° .

Условные обозначения смотри на рис. 46.

Второй эксперимент проведён с целью уточнения раскрытия в районе трубок «Интернациональная» и «Амакинская» при иных комбинациях разломов (рис. 49). На всех этапах, в районе трубки «Мир» происходят раздвиговые смещения (рис. 49, Г, Д, Е). Добавление в модель на втором и третьем этапах разрывов, относящегося к системе север-северо-западного и северо-западного направления, выражается в незначительном увеличении амплитуды раздвигового смещения дистальных сегментов субмеридиональных дизъюнктивов (рис. 49, А, Б, В). Эксперимент показал, что раскрытия в окрестности трубок отсутствуют.

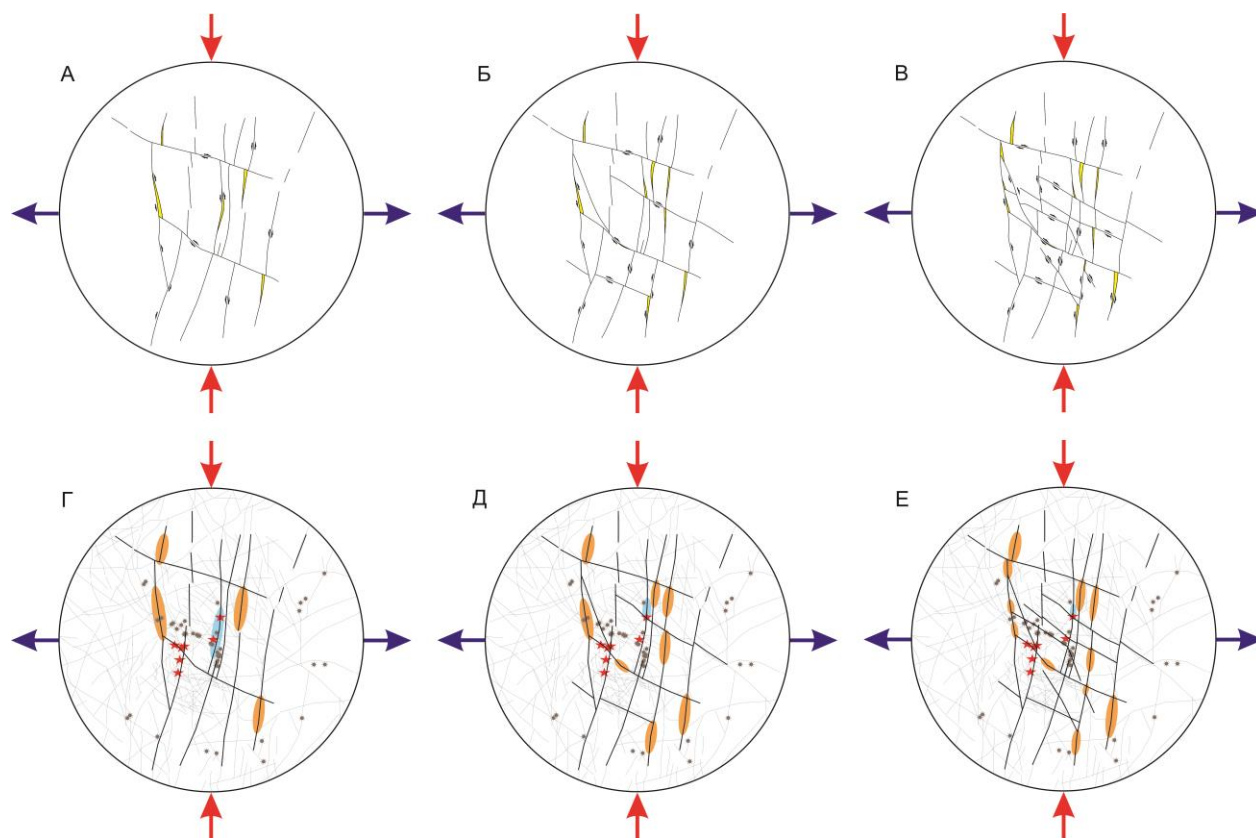


Рис. 49. Моделирование напряжённо-деформированного состояния разломных узлов Мирнинского кимберлитового поля при сжатии 0° , растяжении 90° .

Условные обозначения смотри на рис. 46.

Следующий эксперимент отражал условия соответствующие северо-восточному направлению оси сжатия и северо-западному оси растяжения. В центральной части наблюдаются локальные структуры растяжения, одно из которых находится в пределах кимберлитовой трубки «Мир» по субмеридиональному разрыву, а другие на X-образном пересечении субмеридионального и северо-западного нарушений наблюдаются структуры типа пулл-апарт (рис. 50). При небольшом сжатии, дистальные сегменты, расположенные на северо-восточном и юго-западном окончании субмеридиональных разломов начинают рваться параллельно оси сжимающих сил. Подобное их поведение может быть отнесено к краевым эффектам.

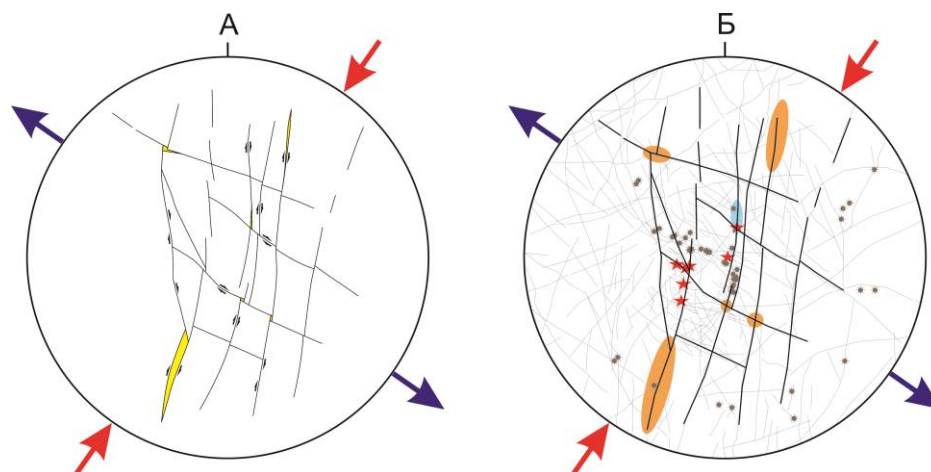


Рис. 50. Моделирование напряжённо-деформированного состояния разломных узлов Мирнинского кимберлитового поля при сжатии 35° , растяжении 305° .

Условные обозначения смотри на рис. 46.

Таким образом, эксперименты показали, что максимально приближенная картина получается при двух экспериментах север-северо-западном сжатии (соответственно, восток-северо-восточном растяжении).

Выполненные исследования позволяют провести качественную оценку перспективности участков (рис. 45). Для этого предлагается показатель класса перспективности, который определяется на основании суммирования геолого-структурных данных и результатов оптического моделирования. Для отнесения участка к тому или иному классу перспективности предлагаются следующие критерии:

1 класс - наличие в разломной сети района узла пересечения из 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 - наличие узла пересечения состоящего из четырёх направлений (субмеридионального, северо-западного, северо-восточного и субширотного) – т.е., максимально повторяющего по направлениям структуру, вмещающую месторождение трубка Мир;

3 - наличие узла пересечения состоящего из трёх направлений (субмеридионального, северо-западного и северо-восточного).

В таблице 4 приведены координаты центров выделенных участков и результаты отнесения их к тому или иному условному классу перспективности. Всего к первому классу отнесено 2 участка, расположенных на северо-западной (участок №4) и в 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. Участки второго и третьего класса должны привлечь к более тщательному исследованию для повышения класса перспективности.

Таблица 4

Участки с условным классом перспективности

№ участка	Координаты центра участка (UTM WGS84)		Условный класс перспективности
	X	Y	
1	643 967	6 946 959	3
2	644 132	6 935 365	3
3	654 408	6 967 387	3
4	633 032	6 957 420	1
5	659 242	6 935 525	1
6	660 242	6 945 058	3
7	634 912	6 936 725	2
8	659 730	6 948 496	3
9	653 394	6 949 508	2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1) Построена трёхмерная 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 следующая 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. При активизации полной длины

субширотных нарушений привело к закрытию сегментов разрывов в пределах контура кимберлитового тела.

6) Созданная трёхмерная разломно-блоковая схема, послужила основой для создания поискового объекта вмещающая 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, отвечающим всем требованиям геолого-структурных данных и результатам моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Научные

1. Амурский, Г.И. Дистанционные методы изучения тектонической трещиноватости пород нефтегазоносных территорий / Г.И. Амурский, Г.А. Абраменок, М.С. Бондарева, Н.Н. Соловьев. – Москва: Недра. – 1988. – 164 с.
2. Александров, А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов. – Москва: Наука, 1973. – 576 с.
3. Арсеньев, А.А. О закономерности размещении кимберлитов в восточной части Сибирской платформы / А.А. Арсеньев // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 137, № 5. – С. 1170-1173.
4. Арсеньев, А.А. Трещинная тектоника и алмазоносность восточной части Сибирской платформы / А.А. Арсеньев // Геология алмазных месторождений. Серия геологическая – 1963. – № 9. – С. 39-44.
5. Афонькин, А.М. Разломы и кимберлитовые тела Мало-Ботуобинского района: проблемы и перспективы / А.М. Афонькин // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXV Всероссийской молодежной конференции г. Иркутск 23-28.04.2013 г. – Иркутск, ИЗК СО РАН, 2013. - С. 10-11.
6. Бабаян, Г.Д. Отражение разломной тектоники Мало-Ботуобинского района в гравитационном поле / Г.Д. Бабаян, Ю.Д. Молчанов, Д.И. Саврасов // Применение геофизических методов при поисках кимберлитовых тел в Якутской провинции. – 1976. – С. 97-100.
7. Белоусов, В.В. Тектонические разрывы, их типы и механизм образования / В.В. Белоусов. – Москва: Труды Геофиз. ин-та АН СССР, №17 (144), 1952. – 147 с.
8. Биезайс, Я.Я. Геолого-геофизическая модель Мирнинского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции / Я.Я. Биезайс, Е.И. Борис, Л.В. Максимкина // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. - Воронеж: Воронежский государственный университет, - 2001. – С. 606.

9. Биезайс, Я.Я. Глубинная сейсмогеологическая модель кимберлитобразующей системы (на примере Мирнинского кимберлитового поля Якутии) / Я.Я. Биезайс. – Воронеж: ВГУ, - 2002. – С. 104.
10. Биланенко, В.А., Структурно-тектонические критерии размещения кимберлитовых полей в южной части Якутской провинции / В.А. Биланенко, Г.Д. Балакшин, В.А. Побережский, В.М. Ушаков // Геология, петрография и геохимия магматических образований северо-востока Сибирской платформы. – 1976. – С. 5-12.
11. Борис, Е.И. О закономерностях размещения кимберлитовых тел в Мало-Ботуобинском районе (Западная Якутия) / Е.И. Борис, Е.В. Францесон // Геология и разведка. – 1992. - №5. - С. 68-74.
12. Брахфогель, Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы / Ф.Ф. Брахфогель. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. – 128 с.
13. Ваганов, В.И. Алмазные месторождения России и мира / В.И. Ваганов. – М.: Геоинформмарк. – 2000. – 371 с.
14. Ваганов, В.И. Прогнозно-поисковые системы для месторождений алмазов / В.И. Ваганов, В.А. Варламов, А.А. Фельдман, Ю.К. Голубев, Н.А. Прусакова, Л.Н. Олофинский, А.Н. Бойко // Отечественная геология. – 1995. – № 3. – С. 42- 53.
15. Варламов, В.А. Поисковые модели и геологические обстановки нахождения алмазоносных кимберлитов и лампроитов / В.А. Варламов. - Москва: ЦНИГРИ, 1989.
16. Владимиров, Б.М. Классификация кимберлитов и внутреннее строение кимберлитовых трубок / Б.М. Владимиров, С.И. Костровицкий, Л.В. Соловьева [и др.] – Москва: Наука, 1981. – 136 с.
17. Владимиров, Б.М. Глубинный кимберлитовый магматизм и вопросы его структурного контроля / Б.М. Владимиров, М.М. Одинцов // Геология и геофизика Восточной Сибири. Инф. сборник № 2, Иркутск. – 1971. – С. 131-142.
18. Вольфсон, Ф.И. Структуры рудных полей и месторождений: [Учебное пособие для геол. специальностей вузов] / Ф.И. Вольфсон, П.Д. Яковлев. - Москва: «Недра», - 1975. – С. 271.

19. Геология и генезис алмазных месторождений. – Москва: Мингео СССР. ЦНИГРИ. – 1989. ч. 1. – С. 242.
20. Гзовский, М.В. Основы тектонофизики / М.В. Гзовский. – М.: Наука. – 1975. – 536 с.
21. Гладков, А.С. Тектонофизические исследования при алмазопроисловых работах. Методическое пособие / А.С. Гладков, С.А. Борняков, А.В. Манаков, В.А. Матросов. – М.: Научный мир. – 2008. – 175 с.
22. Гладков, А.С. Тектонофизический подход к анализу структурного контроля алмазоносных кимберлитовых трубок (на примере трубки Айхал) / А.С.Гладков, К.Ж. Семинский, С.А.Борняков [и др.] // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. – Воронеж. – 2003.
23. Гладков, А.С. Оценка структурно-тектонического строения глубоких горизонтов трубки “Айхал” для постановки гидрогеомеханического мониторинга / А.С. Гладков, А.В. Дроздов, Д.А. Кошкарев, И.А. Потехина, А.М. Афонькин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. - 2015. - № 2 (51). - С. 46-56.
24. Гладков, А.С. Нетрадиционный анализ поясов трещиноватости при картировании субгоризонтальных разломных зон (на примере окрестностей г. Иркутска) / А.С. Гладков, К.Ж. Семинский // Геология и геофизика. – 1999. - №2. - С. 213-220.
25. Гольбрайх, И.Г. Морфоструктурные методы изучения тектоники закрытых платформенных нефтегазоносных областей / И.Г. Гольбрайх, В.В. Забалуев, А.Н. Ласточкин, Г.Р. Миркин, И.В. Рейнин. – Л.: Недра. – 1968. – 152 с.
26. Горев, Н. И. Кимберлитоконтролирующие зоны северо-востока Сибирской платформы / Н.И. Горев // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. – Мирный: - 1998, - С. 246-248.
27. Горев, Н.И. Тектонические аспекты строения Вилюйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей / Н.И. Горев, А.В. Герасимчук, Е.В. Проценко, А.В. Толстов // Наука и образование. - 2011. - №3. - С. 5-10.
28. Гусев, Г.С. Новые представления о закономерностях размещения кимберлитовых тел на севере-востоке Сибирской платформы / Г.С. Гусев, К.Н.

Никишев, А.Ф. Петров // Корреляция эндогенных процессов Сибирской платформы и её обрамления. – Новосибирск: Наука, - 1982, - С. 37-43.

29. Данилович, В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями / В.Н. Данилович. – Иркутск: - 1961. – 48 с.

30. Дукардт, Ю.А. Авлакогенез и кимберлитовый магматизм / Ю.А. Дукардт, Е.И. Борис. – Воронеж: Изд-во Воронежского ГУ, 2000.

31. Дьяков, А.Г. О номенклатуре алмазоносных территорий / А.Г. Дьяков // Геология и геофизика. – 1967. - №4.

32. Зайцев, Н.С. / Вопр. геологии Азии. – 1954. – № 1.

33. Зинчук, Н.Н. Особенности минерации алмазов в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы) / Н.Н. Зинчук, Е.И. Борис, Ю.Т. Яныгин. – Мирный: - 2004. – 172 с.

34. Ковальский, В.В. Кимберлитовые породы Якутии и основные принципы их петрогенетической классификации / В.В. Ковальский. – М. Изд-во АН СССР. – 1963. – 184 с.

35. Колодезников, И.И. Геология и перспективные алмазоносности юго-восточной окраины Сибирской платформы и Сетте-Дабана. / И.И. Колодезников, К.К. Левашов, В.К. Маршинцев [и др.] – ЯГУ: «Недра», 1996. – 160 с.

36. Краснов, И.И. Материалы ВСЕГЕИ / И. И. Краснов, В. Л. Масайтис, нов. сер., в. 7, 1955.

37. Масайтис, В.Л. Вулканизм и тектоника Патомско-Виллюйского среднепалеозойского авлакогена / В.Л. Масайтис, М.В. Михайлов, Т.В. Селивановская. – М., «Недра». – 1975. – 183 с.

38. Матросов, А.В. Особенности строения кимберлитовых полей Виллюйско-Мархинской зоны разломов по геофизическим данным: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Матросов Вячеслав Александрович – Иркутск, 2006. – 144 с.

39. Методическое руководство по геологической съёмке масштаба 1:50000. Издание второе. Ред. А.С. Кумпан. – Л.: Недра, 1978. – 287 с.

40. Мирошниченко А.И. Условия активизации и поля напряжений зон сочленения разломов: Дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.04. - Новосибирск, 1989. - 150 с.
41. Милашев, В.А. Структуры кимберлитовых полей / В.А. Милашев. - Л.: Недра, 1979. - 183 с.
42. Милашев, В.А. Трубки взрыва / В.А. Милашев. - Л.: Недра, 1984. - 268 с.
43. Милашев, В.А. Кимберлиты и глубинная геология / В.А. Милашев. - Л.: Недра, 1990. - 167 с.
44. Милашев, В.А. Петрохимия кимберлитов Якутии и факторы их алмазоносности / В.А. Милашев // Труды Научно-исследовательского института геологии Арктики Государственного геологического комитета СССР. - 1965. - том 139.
45. Милашев, В.А. Трещиноватость, блоковое строение платформенного чехла и локализация диатрем / В.А. Милашев. - СПб: ВНИИОкеангеология, 1997. - С. 145.
46. Мокшанцев, К.Б. Структурный контроль проявлений кимберлитового магматизма на северо-востоке Сибирской платформы / К.Б. Мокшанцев, В.В. Еловский, В.В. Ковальский [и др.]. Новосибирск: Наука, 1974. - 98 с.
47. Мокшанцев, К.Б. Структурно-тектонические условия и геофизические критерии локализации кимберлитового магматизма восточной части Сибирской платформы / К.Б. Мокшанцев, Г.Д. Бабаян, Г.И. Штех, Ф.Ф. Брахфогель // Применение геофизических методов при поисках кимберлитовых тел в Якутской провинции. - 1976. - С. 16-39.
48. Молчанов, Ю.Д. Физико-геологическая характеристика кимберлитоконтролирующих разломов Мирнинского кимберлитового поля / Ю.Д. Молчанов, Д.И. Саврасов // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. - 1985. - Новосибирск: Наука. - С. 78-91.
49. Молчанов, Ю.Д. Физико-геологическая характеристика разломов Вилуйско-Мархинской тектонической зоны в пределах Мирнинского кимберлитового поля / Ю.Д. Молчанов, Д.И. Саврасов // Геология, алмазоносность и металлогения Сибирской платформы и ее обрамления. - 1981. - Иркутск., изд. ИЗК СО АН СССР. - С. 37-39.

50. Николаев, П.Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических напряжений / П.Н. Николаев // Изв. вузов. Геол. и разв. – 1977. - № 12. – С. 103-115.
51. Николаев, П. Н. Методика тектонодинамического анализа / П. Н. Николаев. – М., Недра, 1992. – 295 с.
52. Никонов, А.И. Тектонофизические аспекты структурного дешифрирования линеаментных систем / А.И. Никонов // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы Второй молодежной школы-семинара. - М.: ИФЗ, 2011. - Т. 2. - С. 78-93.
53. Одинцов, М.М. Некоторые общие закономерности пространственного размещения кимберлитов и алмазных месторождений в земной коре / М.М. Одинцов, Б.М. Владимиров // Вопросы генезиса и закономерности размещения эндогенных месторождений – М. Наука. – 1966. – С. 34-51.
54. Одинцов, М. М. Основные черты геологии Сибирской алмазоносной провинции / М.М. Одинцов // Изв. вост. фил. АН СССР, № 1, 1957.
55. Осокина, Д.Н. Пластические и упругие низко модульные оптически активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования / Д.Н. Осокина. – М.: Изд-во АН СССР. – 1963. – 196 с.
56. Расцветаев, Л.М. Структурные рисунки трещиноватости и их геомеханическая интерпретация / Л.М. Расцветаев // ДАН СССР. 1982. - Т. 267, - №4. - С. 904-909.
57. Сарсадских, Н.Н. Структурный фактор размещения кимберлитов на Сибирской платформе и прогнозирование коренной алмазоносности / Н.Н. Сарсадских // Прогнозирование и методы поисков месторождений никеля, олова и алмазов в Советской Арктике. – 1968. – С. 72-76.
58. Сарсадских, Н. Н. Региональные и локальные закономерности размещения эндогенных месторождений алмаза / Н.Н. Сарсадских. - Л.: «Недра», 1973. - 69 с.
59. Семинский, К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости / К.Ж. Семинский // Геология и геофизика. – 1994. - № 9. – С. 112-130.

60. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. – Новосибирск: СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 244 с.

61. Семинский, К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект / К. Ж. Семинский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 243 с.

62. Семинский, К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект / К.Ж. Семинский, А.С. Гладков, О.В. Лунина, М.А. Тугарина - Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2005. - 293 с.

63. Серокуров, Ю.Н. Использование материалов космического зондирования при прогнозе и поисках коренных месторождений алмазов / Ю.Н. Серокуров // Руды и металлы. Методы и методики прогноза, поисков, оценки и разведки месторождений. – 1995. – С. 30-38.

64. Серокуров, Ю.Н., Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов / Ю.Н. Серокуров, В.Д. Калмыков, В.М. Зувев. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». – 2001. – 198 с.

65. Смехов, Е.М. Методика изучения трещиноватости горных пород и трещинных коллекторов нефти и газа / Е.М. Смехов, М.Х. Булач, И.А. Волков и др. – Л.: Недра, 1969. – 129 с.

66. Структурное дешифрирование при геологической съемке. Методические рекомендации / Сост-ль Е.С. Кутейников. Науч. ред. А.С. Кумпан, В.М. Немцович. – Л. – 1981. – 25 с.

67. Трофимов, В.С. Геология месторождений природных алмазов / В.С. Трофимов. – М.: Недра, 1980. – 304 с.

68. Трофимов, В.С. Некоторые закономерности размещения алмазных месторождений на Сибирской платформе / В.С. Трофимов // Алмазы Якутии. – 1961. – № 6. – С. 142-153.

69. Трофимов, В.С. Основные закономерности размещения и образования алмазных месторождений на древних платформах и в геосинклинальных областях / В.С. Трофимов. – 1967.

70. Францессон, Е.В. Роль авлакогенов в формировании кимберлитов на древних платформах / Е.В. Францессон // Геология рудных месторождений, - 1986, -№5, - 91-93 с.

71. Харьков, А.Д. К характеристике трубок взрыва Мало-Ботуобинского района / А.Д. Харьков, Е.И. Борис, И.Н. Иванив, В.Н. Щукин // Советская геология. – 1972. – №8. – С. 51-65.

72. Харьков, А. Д. Коренные месторождения алмазов мира / А. Д. Харьков, Н. Н. Зинчук, А. И. Крючков. – М.: «Недра». – 1998. – 555 с.

73. Фрохт, М.М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений / М.М. Фрохт. – М.; Л, - 1948. - С. 432.

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

75. Шерман, С.И. Условия активизации зон сочленения разломов / С.И. Шерман, А.Н. Адамович, А.И. Мирошниченко // Геология и геофизика. – 1986. - №3. – С.10-18.

76. Шерман, С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры / С.И. Шерман. – Новосибирск: Наука, 1977. – 102 с.

77. Щукин, В.Н. Тектонический контроль, стадийность формирования и алмазоносность кимберлитов Мало-Ботуобинского района / В.Н, Щукин, В.Е. Минорин, А.Д. Харьков // Рудообразование и его связь с магматизмом. – М.: Наука, 1972. – С. 171-177.

78. Эринчек, Ю.М. Структура литосферы в районах проявления алмазоносных кимберлитов (Сибирская платформа) / Ю.М. Эринчек, Е.Д. Мильштейн, А.В. Егоркин // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. – Мирный: 1998а. - С. 78-81.

79. Эринчек, Ю.М. Структура среднепалеозойского дайкового пояса (Сибирская платформа) / Ю.М. Эринчек, Е.Д. Мильштейн, О.Г. Салтыков // Докл. РАН. – 1998б. – Т. 359, № 2. – С. 231–234.

Фондовые

80. Борис, Е.И. Отчет о научно-исследовательской работе “Изучение структуры и свойств околотрубочного пространства с целью разработки критериев локального прогноза и совершенствования методов поисков месторождений алмазов” / Е.И. Борис, В.И. Ваганов, В.А. Варламов и др. ЦНИГРИ, 1985.

81. Ивашин, В.А. Составление крупномасштабных структурных планов эксплуатируемых кимберлитовых трубок / В.А. Ивашин и др. - Мирный, МГРЭ. 1993.

82. Сафьянников, В.И. Отчет о результатах детальной разведки глубоких горизонтов трубки Мир (1977-1981гг.) / В.И. Сафьянников, В.М. Судаков и др. - Мирный. БГРЭ. 1981.

83. Тирский, Г.А. Изучить вещественный состав кимберлитов глубоких горизонтов трубки Айхал, оценить ее положение в пространстве методом радиоволнового просвечивания, составить структурные карты карьерных полей месторождений Мир и Удачная. Отчет по теме за 1991-1993 гг. / Г.А. Тирский и др. Объект Мирнинский. ЯФ ЦНИГРИ, 1993.

84. Тирский, Г.А. Отчет по теме: Произвести картирование кимберлитовых пород средних горизонтов трубки Мир с целью получения всесторонней вещественной и структурной характеристики месторождений на этих горизонтах для практических и научных целей / Г.А. Тирский, Ю.М. Мельник, Е.Н. Борковец. Мирный. ЯФ ЦНИГРИ. 1989.

85. Тирский, Г.А. Отчет по теме: Изучить вещественный состав кимберлитов и вмещающих пород и структурных особенностей с-з фланга трубки Мир (Спутник-2) / Г.А. Тирский, Ю.М. Мельник, В.И. Вуйко. - Мирный. ЯФ ЦНИГРИ. 1990.