

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

На правах рукописи

Серебряков Евгений Валерьевич

**РАЗРЫВНАЯ СТРУКТУРА КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗА
НАКЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ
(на основе трехмерных моделей)**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель –
к. г.-м. н. А.С. Гладков

Иркутск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	8
1.1. Обзор литературных данных по проблеме контроля кимберлитового магматизма	8
1.2. Геолого-структурная характеристика Накынского кимберлитового поля	30
Глава 2. КОМПЛЕКС МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ	39
2.1. Тектонофизические методы.....	40
2.2. Тектонофизические методы реконструкции полей тектонических напряжений	43
2.3. Методы структурного дешифрирования	45
Глава 3. СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК НАКЫНСКОГО ПОЛЯ	48
3.1. Трубка «Нюрбинская».....	49
3.1.1. Особенности вещественного строения трубки «Нюрбинская»	58
3.1.2. Особенности проявления и распределения разрывных нарушений.....	63
3.1.2.1. Разломные зоны	63
3.1.2.2. Тектоническая трещиноватость	70
3.1.2.3. Реконструкция полей тектонических напряжений	74
3.1.3. Модель разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Нюрбинская»	84
3.1.4. Структурно-вещественная модель формирования кимберлитовой трубки «Нюрбинская»	86
3.2. Трубка «Ботуобинская».....	96
3.2.1. Особенности вещественного строения трубки «Ботуобинская»	98
3.2.2. Особенности проявления и распределения разрывных нарушений.....	104
3.2.2.1. Разломные зоны	104
3.2.2.2. Тектоническая трещиноватость	107
3.2.2.3. Реконструкция полей тектонических напряжений	110
3.2.3. Модель разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Ботуобинская»	111
3.2.4. Структурно-вещественная модель формирования кимберлитовой трубки «Ботуобинская»	112
3.3. Прогнозно-поисковая модель кимберлитовой трубки Накынского поля	116

Глава 4. РАЗРЫВНАЯ ТЕКТОНИКА И СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НАКЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ	122
4.1. Разломная сеть Накынского кимберлитового поля.....	122
4.1.1. Разрывные нарушения, выделяемые по результатам геофизических исследований	122
4.1.2. Результаты структурного дешифрирования Накынского кимберлитового поля	126
4.2. Локальный прогноз коренных месторождений Накынского кимберлитового поля...	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Последние десятилетия в алмазопромышленной геологии ознаменовались резким сокращением количества вновь открываемых коренных месторождений алмазного сырья. Причиной тому является значительное усложнение геологической обстановки на поисковых площадях. Большие мощности перекрывающих отложений, а также широкое развитие трапповых интрузий в пределах исследуемых территорий вводят ограничения на применение стандартного геолого-геофизического комплекса методов опробования, с помощью которого в 50-60-х годах XX-го столетия был открыт целый ряд кимберлитовых трубок («Зарница», «Мир», «Удачная» и др.), часть из которых и по настоящее время составляют основу минерально-сырьевой базы России. Выходом из сложившейся ситуации является введение в практику геолого-разведочных работ прогнозно-поисковых моделей, базирующихся на предпосылках и признаках, доступных для выявления в условиях «закрытости» территории. К числу таковых относят структурные признаки, как наиболее устойчивые для всех прогнозных таксонов и, в частности, для локальных кимберлитоконтролирующих структур. Их выделение возможно посредством детального изучения конкретных кимберлитовых месторождений, играющих роль эталонных объектов для исследуемой территории. В пределах Накынского кимберлитового поля эталонными объектами являются трубки «Нюрбинская» и «Ботубинская», вовлеченные в настоящее время в промышленную отработку. Это делает возможным сбор необходимого объема информации для разработки качественно новой прогнозно-поисковой модели. Проведенное с ее помощью районирование территории Накынского поля позволит локализовать площади, перспективные на обнаружение коренных месторождений-аналогов эталонных объектов, что в значительной степени снизит трудоемкость и повысит эффективность геологоразведочных работ.

Цель работы заключалась в создании модели кимберлитоконтролирующей структуры Накынского кимберлитового поля для решения задач локального прогноза коренной алмазоносности.

Согласно поставленной цели решались следующие **задачи**:

1) Провести детальное изучение разноранговых разрывных нарушений в пределах участков локализации кимберлитовых трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская» с построением схем разломно-блокового строения.

2) На основе построенных схем и данных о распределении фазовых составляющих создать трехмерные структурно-вещественные модели для трубок «Нюрбинская» и «Ботубинская».

3) Разработать прогнозно-поисковую модель кимберлитовой трубки Накынского кимберлитового поля.

4) Используя приемы структурного дешифрирования уточнить разломную схему Накынского поля и установить главные факторы структурного контроля коренных месторождений алмазов.

5) Провести районирование территории Накынского кимберлитового поля с выделением прогнозных участков.

Фактический материал. В основу представляемой диссертационной работы положены результаты полевых и камеральных исследований, выполненные автором и его предшественниками в период с 2005 по 2017 гг. Они включают детальную геолого-структурную документацию стенок карьеров, ведущих промышленную отработку кимберлитовых трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская», тектонофизический анализ полученных данных, а также структурное дешифрирование разномасштабных топографических карт по площади Накынского кимберлитового поля. В работе также использованы фондовые литературные материалы по геологическому строению исследуемой территории, предоставленные геологической службой Ботуобинской геологоразведочной экспедиции АК «АЛРОСА» (ПАО) (далее – БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО)).

Защищаемые положения.

1) Локализация дискретных порций кимберлитового расплава многофазных трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская» происходила в структурах присдвигового растяжения, образованных на участках сопряжения Диагонального рудовмещающего разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного и северо-западного направлений.

2) В качестве структурных ловушек на территории Накынского поля выступают узлы разрывных нарушений платформенного чехла север-северо-восточного и восток-северо-восточного направлений, пространственно сопряженные с разломами фундамента.

3) Разработана прогнозно-поисковая модель, с помощью которой оценены остаточные перспективы коренной алмазоносности Накынского поля и выделены восемь участков перспективных по структурным предпосылкам на обнаружение новых кимберлитовых тел.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1) На основе анализа результатов полевых тектонофизических исследований на действующих карьерах «Нюрбинский» и «Ботуобинский» разработаны объемные модели разломно-блокового строения участков их локализации.

2) Применение технологии трехмерного компьютерного моделирования для анализа данных по распределению фазовых комплексов в пределах рудных тел позволило построить вещественные модели исследуемых объектов.

3) С помощью комплексного анализа результатов трехмерного моделирования разрывной структуры и особенностей вещественного строения кимберлитовых трубок созданы структурно-вещественные модели их формирования.

4) Путем обобщения полученной информации по эталонным объектам разработана прогнозно-поисковая модель кимберлитовой трубки Накынского поля.

5) Анализ результатов геофизических исследований в совокупности с результатами структурного дешифрирования топографических материалов позволил уточнить особенности строения сети разрывных нарушений развитых в пределах фундамента и осадочного чехла изучаемой территории.

6) Используя разработанную прогнозно-поисковую модель, проведено районирование площади Накынского поля и прилегающей территории на возможность обнаружения трубок типа «Нюрбинская» и «Ботубинская».

Практическая значимость. Результаты проведенных исследований позволяют решать ряд практических задач. Модели вещественных комплексов, слагающих трубки «Нюрбинская» и «Ботубинская», содержат необходимую информацию о распределении полезного компонента в пределах рудных тел, которая может использоваться при планировании горно-проходческих и добычных работ на месторождениях. Схемы разломно-блокового строения участков локализации указанных трубок, созданные по результатам геолого-структурного картирования, в настоящее время используются специалистами АК «АЛРОСА» (ПАО) при проектировании горных выработок, а также для организации мероприятий по обеспечению безопасного ведения горных работ. Помимо этого, на основе разработанной прогнозно-поисковой модели обосновано выделение локальных участков, перспективных на обнаружение коренных месторождений алмаза.

Публикации. По теме диссертации автором лично и в соавторстве опубликовано 6 работ, в том числе 2 статьи в российских рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались на XXVI и XXVII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2015, 2017); XX Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г.

Томск, 2016); V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, 2017).

Объем и структура работы. Диссертация общим объемом 150 страниц состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 4 таблицы, иллюстрирована 64 рисунками. Список литературы включает 169 наименований.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует как минимум трем пунктам (1, 3, 4) Паспорта специальности:

1) Условия образования месторождений твердых полезных ископаемых:

-геология и генетические модели, геодинамические и формационно-магматические условия образования и закономерности пространственного размещения эндогенных месторождений.

2) Металлогения и минерагения: общая, региональная и специальная, цели и задачи.

3) Прогнозирование, поиски, разведка и геолого-экономическая оценка месторождений:

-методология прогнозирования и оценки ресурсов полезных ископаемых;

-современные методы поисков и разведки полезных ископаемых.

Благодарности. За постановку темы исследования, общее научное руководство, предоставленный полевой материал автор выражает глубокую признательность к.г.-м.н. А.С. Гладкову. За ценные советы, своевременные консультации и предоставленный фактический материал автор благодарен к.г.-м.н. Д.А. Кошкареву. За помощь в организации полевых работ автор признателен сотрудникам геологического отдела Нюрбинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) М.А. Карпенко, В.Г. Мухоплеву, А.Л. Цвелодубу, а также руководству БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) В.М. Фомину, М.В. Мальцеву, А.Н. Разумову. За полезные обсуждения, критические замечания автор благодарен сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН д.г.-м.н. К.Ж. Семинскому, к.г.-м.н. А.В. Черемных, к.г.-м.н. И.А. Потехиной, к.г.н. Д.Д. Перевозникову, а также сотруднику Научно-исследовательского геологоразведочного предприятия АК «АЛРОСА» (ПАО), д.г.-м.н. К.М. Константинову.

Глава 1. ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Обзор литературных данных по проблеме контроля кимберлитового магматизма

Исследования кимберлитовых трубок взрыва проводятся на протяжении более 100 лет геологами разных стран. Однако за этот период единой точки зрения как на происхождение, так и на факторы локализации алмазных месторождений не выработано. Определены лишь общие закономерности условий их образования, представленные эмпирическим правилом Клиффорда, которое гласит: промышленно-алмазоносные кимберлиты и лампроиты приурочены к кратонам, где развита кора континентального типа с возрастом стабилизации более 2,5 млрд. лет, т.е. областям архейской консолидации. Признавая приуроченность кимберлитового магматизма к древним консолидированным участкам платформ, многие исследователи выдвигают несколько, подчас диаметрально противоположных версий о структурных факторах локализации кимберлитовых тел.

Первые данные о наличии структурного контроля кимберлитовых трубок появились уже в начале XX-го века после геологических исследований Южноафриканской алмазоносной провинции. По мнению исследователей данного региона в пространственном размещении обнаруженных коренных месторождений алмазов ведущая роль принадлежала крупным разрывным нарушениям, которые протягивались на многие сотни километров. Точка зрения, высказанная африканскими геологами, уже долгое время остается одной из ведущих и имеет широкую поддержку многими исследователями: И.П. Атласовым, В.М. Владимировым, М.М. Одинцовым, Л.Н. Зведером, Ю.М. Шейнман, А.И. Пономаренко, Н.Н. Сарсадских, А.М. Абельским, В.А. Биланенко, Г.Д. Бабаяном, К.Б. Мокшанцевым, Ю.Д. Молчановым, Я.Я. Биезайсом, А.Д. Харьков, В.Н. Шукиным, М.И. Лелюхом, В.Е. Минориным, С.И. Костровицким, И.И. Божевольным, М.А. Крутоярским, В.М. Зуевым, П.А. Игнатовым, А.А. Потуроевым, А.С. Гладковым, А.А. Духовским, Г.Д. Балакшиным, С.М. Колдаевым, В.М. Ивановым, В.А. Цыгановым и др. Однако в процессе изучения мировых алмазоносных провинций появилось множество альтернативных версий касаясь структурно-тектонического положения кимберлитов. В первую очередь это идеи о кимберлитоконтролирующей роли крупных платформенных структур, развиваемые Л.Г. Страховым, А.В. Пейве, В.В. Ковальским, В.И. Никулиным, А.А. Духовским, Ю.М. Фоминым и др. Не менее важными выглядят представления о связи кимберлитовых таксонов с авлакогенами и рифтогенными структурами,

высказанные впервые В.Л. Масайтисом и впоследствии получившие развитие в трудах многих авторов: Н.А. Логачева, К.Н. Никишова, В.Г. Кушева, Е.В. Францессона, Б.Г. Лутца, В.С. Шкодзинского, Ю.А. Дукардта, Е.И. Бориса, И.Г. Коробкова, К.К. Левашова, Ю.Г. Кутинова и др. Помимо перечисленного к устойчивым структурным факторам контроля алмазоносности в последнее время относят радиально-концентрические структуры. Приверженцами данной идеи являются Ю.Н. Серокуров, В.И. Ваганов, П.Ф. Иванкин, В.Д. Калмыков и др.

Контроль размещения кимберлитов разрывными нарушениями. Проведенный приблизительно в одно время В.С. Соболевым [Соболев, 1951], М.М. Одинцовым и Г.Г. Моором сравнительный анализ строения Сибирской платформы и Южноафриканской провинции позволил им сделать предположение о наличии коренных месторождений алмазов на территории Сибирской платформы, который подтвердился в 1948 г., когда в аллювиальных отложениях центральных районов платформы были найдены первые алмазы и затем в 1954 г. открытием Попугаевой Л.А. кимберлитовой трубки «Зарница».

Начиная с момента открытия первых коренных месторождений алмаза на территории Сибири, некоторые советские геологи отмечали существование тектонического контроля локализации кимберлитовых трубок разрывными нарушениями. Так на первой предварительной карте прогноза эндогенной алмазоносности Сибирской платформы масштаба 1:2 500 000, составленной под редакцией Краснова И.И. и Масайтиса В.Л., были выделены предполагаемые зоны глубинных разломов, к которым могли быть приурочены «небольшие тела ультраосновных пород, в том числе алмазоносные кимберлиты» [Краснов, Масайтис, 1955].

В дальнейшем взгляды исследователей по поводу кимберлитоконтролирующей роли дизъюнктивов разделились: одни считали разломы только подводящими каналами, которые в образовании кимберлитов не принимали никакого участия, другие связывали с ними и само формирование кимберлитовых расплавов.

Сторонником первой точки зрения был основоположник алмазопромышленных работ на Сибирской платформе М.М. Одинцов. В своих ранних работах он писал, что структурные особенности фундамента платформы определяют появление кимберлитов, а зоны и расколы древнего фундамента, нередко скрытые под ненарушенным осадочным чехлом, непосредственно влияют на их пространственное размещение в общей структуре платформы [Одинцов, 1957; Одинцов, Владимиров, 1966]. В совместных работах с Б.М. Владимировым ими определены основные положения структурного контроля кимберлитопоявлений, которые сводятся к следующему: проявление кимберлитовой магмы предопределяется крупными глубинными деформациями фундамента, которые чаще представляют собой определенно

ориентированные зоны нарушений, либо имеют форму кальдер и овалов оседания [Владимиров, Одинцов, 1971].

Изучая Далдыно-Алакитское кимберлитовое поле, Л.Н. Зведер пришел к выводу, что наличие на исследуемой территории попеременно чередующихся флексур, крупных валообразных поднятий и участков слабонаклонного и горизонтального залегания пород, осложненных брахискладками и депрессиями, позволяет считать флексуры и поднятия отражением глубинных разломов в кристаллическом фундаменте [Зведер, 1959]. Эти разрывные нарушения, представленные структурами покрова, совпадают с ориентировкой субвертикальной тектонической трещиноватости и фиксируются выходами трапповых даек.

В работе 1960 года [Зведер, Щукин, 1960] проведенные цитируемым автором совместно с В.Н. Щукиным дополнительные исследования в Далдынском районе позволили выделить систему субширотных разрывов в кристаллическом фундаменте, с которой связаны кимберлитовые трубки.

Ю. М. Шейнманн [Шейнманн, 1956] указывал на то, что кимберлитовые тела проявлены на участках затухания региональных глубинных разломов, на значительном удалении от окружающих платформу геосинклинальных областей, в тектонически стабильных условиях, но при этом само развитие магматической щелочно-ультраосновной формации связывал именно с геосинклиналями.

Изучением пространственного положения кимберлитового магматизма на севере Сибирской платформы занимался М. А. Крутоярский. Он установил, что все выявленные кимберлитовые поля исследуемого района располагаются в пределах широкой полосы между Анабарской антеклизой и Верхоянской складчатой областью и связывал ее с зоной глубинных расколов, возникших на флексуорообразном перегибе фундамента платформы и расположенных на большей части Суханского прогиба [Крутоярский и др., 1959].

Э.Н. Эрлих считал противоречащими действительности данные Ю.М. Шейнмана и М.А. Крутоярского. Он поставил под вопрос доводы Ю.М. Шейнмана о развитии щелочно-ультраосновной формации в зависимости от движений в геосинклиналях, а также подверг сомнению пространственное положение зоны глубинных разломов в северной части Сибирской платформы, выделенной М.А. Крутоярским. В свою очередь Э.Н. Эрлих, обобщивший фактические данные о пространственном размещении кимберлитовых тел в Анабаро-Оленекском районе, выделил четыре зоны, вдоль которых имеются проявления кимберлитового магматизма: субмеридионального, северо-восточного, северо-западного и северо-западного, постепенно сменяющегося на субмеридиональное простирание. Кимберлитовые тела в пределах этих зон связаны со сколами фундамента, а в платформенном чехле проявлены в виде

узких зон повышенной трещиноватости, разломов трещинного типа и многочисленных складок [Эрлих, 1963].

Идею о закономерной связи формирования кимберлитовых расплавов с глубинными разломами поддерживали группа авторов [Леонтьев, Каденский, 1957; Сарсадских, 1968 и др.]. Они, являясь приверженцами представлений о том, что кимберлит является продуктом дифференциации трапповой магмы, считали, что глубинный разлом это не только транспортный канал для подвода магмы из глубин в верхние ярусы земной коры, но и место формирования кимберлита, которое происходит в прямой связи с развитием разлома.

Наиболее благоприятными для внедрения кимберлитовой магмы согласно зарубежных и отечественных геологов являются участки пересечения разрывных нарушений. Эта достаточно популярная точка зрения нашла отражение в работах многих авторов. Одним из первых в этом направлении начал работать Т.Н. Спижарский. Проводя минерагенический анализ территории Сибирской платформы, он отмечал, что все кимберлитовые трубки располагаются вне Тунгусской синеклизы и приурочены к зонам разрывных нарушений, а в большинстве своем к местам пересечения разрывов различного простирания [Спижарский, 1958].

А.А. Арсеньев, занимаясь геологическим изучением северо-восточной части Сибирской платформы, предпринял попытку наметить региональные зоны разломов, соответствующие проявлениям кимберлитового вулканизма [Арсеньев, 1961; Арсеньев, 1963]. Опираясь на данные Н.С. Зайцева [Зайцев, 1954], И.И. Краснова, В. Л. Масайтиса [Краснов, Масайтис, 1955], Т.Н. Спижарского [Спижарский, 1958], В.И. Гоньшаковой (1959) указанный автор составил схему расположения основных дизъюнктивных структур восточной части Сибирской платформы (рис. 1), на которой все известные кимберлитовые поля Якутии были объединены в линейные зоны северо-западного (Мархинско-Котуйская, Молодо-Попигайская и Муно-Анабарская) и северо-восточного (Ангаро-Мунская, Котуй-Попигайская, Мархино-Оленекская, Чугино-Ленская и Чарская) простирания. Анализируя взаимное положение кимберлитов с намеченными зонами разрывных нарушений, А.А. Арсеньев приходит к следующему выводу: «Особенно благоприятными областями для проникновения магматических и гидротермальных образований с их комплексом полезных ископаемых являются области пересечения дизъюнктивных зон северо-восточного и северо-западного простирания» [Арсеньев, 1963, с. 43]. Алакит-Далдынский алмазоносный район по его мнению расположен на пересечении Мархинско-Оленекской и Мархинско-Котуйской дизъюнктивных зон, а в области пересечения Мархинско-Оленекской и Молодо-Попигайской разломных зон выделена Куойкско-Мэрчимдэнская группа кимберлитовых трубок и даек. Стоит отметить, что на подобную закономерность указывал и А.М. Абельский, который высказал предположение о

приуроченности кимберлитовых тел северо-востока Сибирской платформы к участкам пересечения зон северо-восточного и северо-западного простирания [Абельский, 1968].

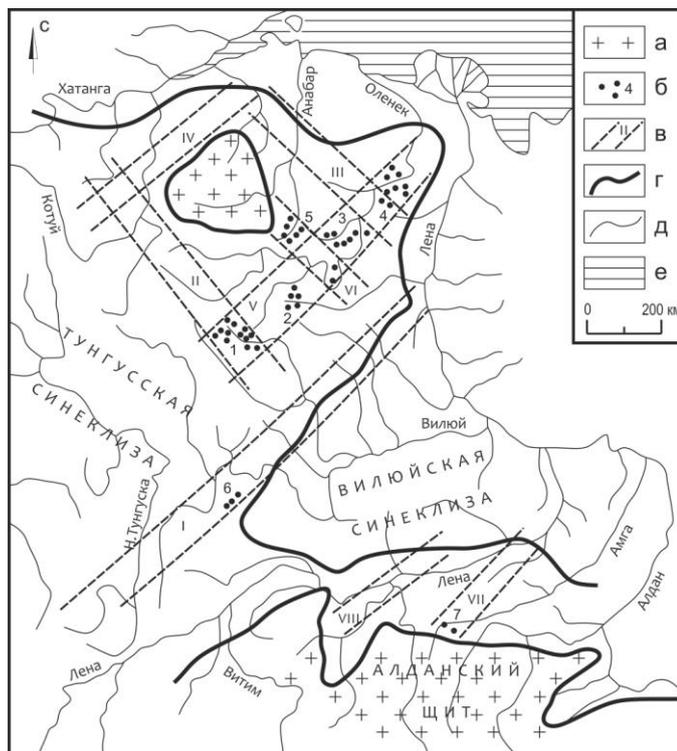


Рисунок 1. Схема расположения дизъюнктивных структур восточной части Сибирской платформы [Арсеньев, 1963]. а – выходы на поверхность кристаллического фундамента платформы; б – кимберлитовые трубки и дайки: 1 – Алакито-Далдынская группа, 2 – Мунская группа, 3 – Средне-Оленекская группа, 4 – Куойско-Мэрчимдэнская группа, 5 – Анабарская группа, 6 – группа трубки «Мир», 7 – Алданская группа; в – дизъюнктивные зоны разломов: I – Ангаро-Мунская, II – Мархинско-Котуйская, III – Молодо-Попигайская, IV – Котуй-Попигайская, V – Мархинско-Оленекская, VI – Мунско-Анабарская, VII – Чугино-Ленская, VIII – Чарская; г – границы крупных платформенных структур; д – гидросеть; е – территория, занятая морем.

Позднее сходные кимберлитоконтролирующие зоны выделила группа исследователей во главе с К.Б. Мокшанцевым [Мокшанцев и др., 1976]. Опираясь на материалы детальных геолого-геофизических исследований и результаты среднемасштабных съемок по территории восточной части Сибирской платформы, они наметили пять широких зон дробления земной коры с разломами субмеридионального (Вилюйско-Котуйская), северо-восточного (Далдино-Оленекская, Вилюйско-Жиганская), субширотного (Куонапско-Жиганская) и северо-западного (Куойско-Эбеляхская) простираний (рис. 2). Ими замечено, что большая часть алмазоносных кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции располагаются на участках пересечения описанных разломных зон. К такому же выводу авторы пришли после изучения пространственного положения отдельных кимберлитовых тел или их кустов внутри кимберлитовых полей: «Многие тела и их кусты находятся на узлах пересечения разломов с различными простираниями» [Мокшанцев и др., 1976, с. 35].

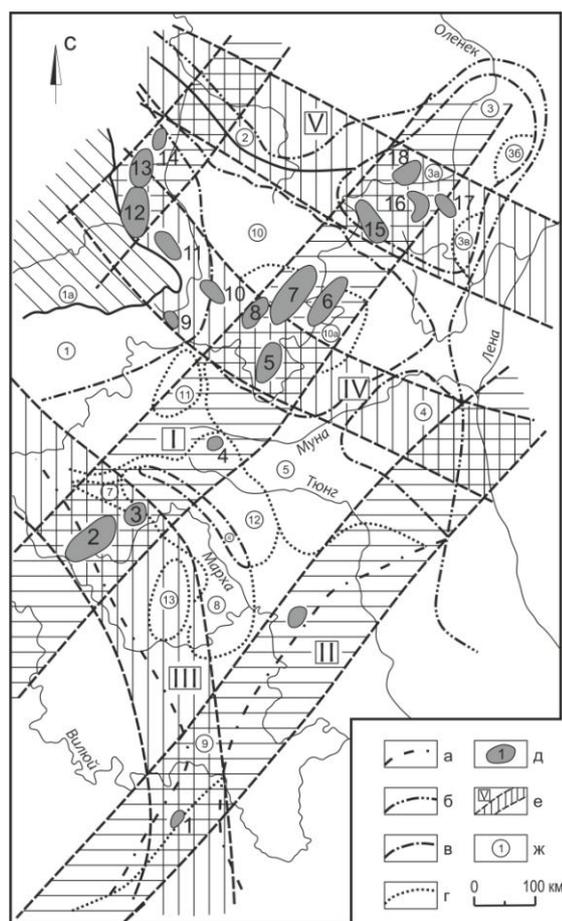


Рисунок 2. Схема расположения основных зон разломов (дробления земной коры) Якутской кимберлитовой провинции на тектонической основе [Мокшанцев и др., 1976]: а – границы синеклиз; б – границы прогибов; в – границы крупных сводов, валов и впадин; г – границы прочих структур; д – кимберлитовые поля: 1 – Мало-Ботуобинское, 2 – Алаakitское, 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-Яргинское, 15 – Мерчимденское, 16 – Молодинское, 17 – Толоупское, 18 – Куойкское; е – основные зоны разломов (дробления земной коры): I – Далдыно-Оленекская, II – Виллойско-Жиганская, III – Виллойско-Котуйская, IV – Куонамско-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, 6 – Мархинский вал, 7 – Далдынский вал, 8 – Силигир-Моркокинское поднятие, 9 – Ботуобинская седловина, 10 – Суханская впадина, 10а – Биректинская котловина, 11 – Верхне-Силигирская впадина, 12 – Верхне-Мунская впадина, 13 – Бай-Юряхская котловина.

Идея о пространственной приуроченности кимберлитовых тел к узлам пересечения разноориентированных дизъюнктивов получила дальнейшее развитие в работе В.А. Цыганова с коллегами. Исследуя Далдынское и Мало-Ботуобинское кимберлитовые поля, ими установлено, что «...в обоих случаях сближенные группы кимберлитовых тел приурочены к узлам пересечений тектонических структур» [Цыганов и др., 1988, с. 44]. К подобным выводам пришли А.И. Пономаренко и И.И. Божевольный, которые в разное время занимались

исследованием юго-восточной части Сибирской платформы. Первый указывал на то, что подавляющее большинство кимберлитовых тел приурочено к участкам пересечения северо-западного и северо-восточного простирания [Пономаренко и др., 1970]. В работе второго автора обращается внимание на приуроченность известных и прогнозируемых полей Сибирской платформы к участкам пересечения Вилюйско-Мархинской зоны (ВМЗ) северо-восточного простирания зонами глубинных разломов северо-западного направления [Божевольный, 1997].

Широкое применение геофизических методов для изучения тектонического строения Сибирской платформы, начиная с 70-х годов 20-го века, привело к появлению новых данных о разрывных структурах, контролирующих кимберлитовые тела Якутской провинции. В результате проведения наземной магнитометрии в Мало-Ботуобинском районе прослежены три глубинных разлома – Западный, Мирнинский и Восточный, которые служили подводными каналами для кимберлитовой магмы, а также разломы северо-западного простирания, являющиеся кимберлитовмещающими (рис. 3) [Харьков и др., 1972].

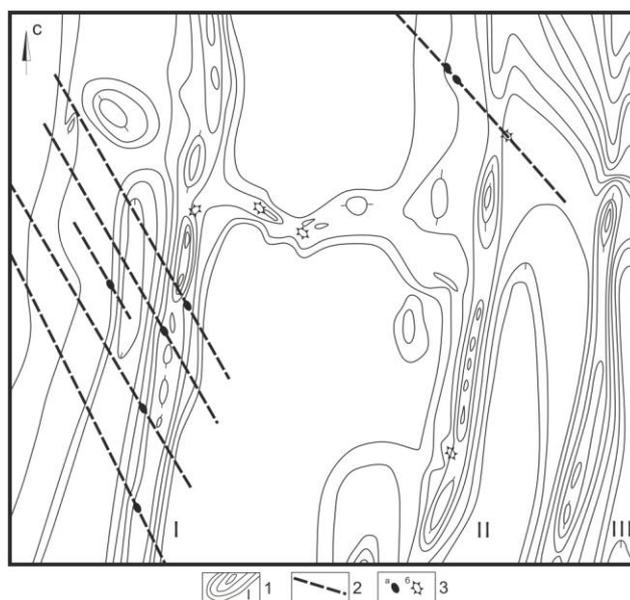


Рисунок 3. Тектоническая схема центральной части Мало-Ботуобинского района [Харьков и др., 1972]. 1 – изолинии магнитного поля, подчеркивающие глубинные разломы (I – Западный, II – Мирнинский, III – Восточный); 2 – предполагаемые оперяющие разломы; 3 – трубки взрыва (а – кимберлитовых пород, б – туфов траппового состава).

Данные о разломной тектонике Мало-Ботуобинского района были дополнены результатами проведения крупномасштабной высокоточной гравиметрической съемки. С ее помощью выявлено большое количество новых разломов, к которым приурочены известные кимберлитовые трубки [Бабаян и др., 1976; Биланенко и др., 1976]. М.И. Лелюх с соавторами, используя данные детальных сейсмо- и электроразведочных исследований в Айхальском районе, установили, что «... кимберлитовмещающие зоны состоят из серии разнонаправленных

разрывных нарушений, к узлам пересечения которых приурочены трубки» [Лелюх и др., 1989, с. 94].

Во многих районах в качестве кимберлитоконтролирующих стали выделять разломы закрытого типа или скрытые разломы, которые в большинстве своем устанавливались геофизическими методами. Согласно [Томсон, 1962], скрытые разломы – это «своеобразные линейные ослабленные зоны, фиксирующиеся цепочками интрузивных тел, поясами даек, согласными перегибами складчатых серий, фациальными «коридорами», гравитационными ступенями и другими признаками». Они представляют собой разновидность глубинных разломов, которые в фундаменте представлены зонами пластических деформаций, а по мере продвижения к верхним структурным этажам расщепляются на серии мелких разрывных нарушений, флексур и др. [Колдаев, 1976]. Характерным примером таких разломов является Алакит-Оленекская зона северо-восточного простирания, которая контролирует целый ряд кимберлитовых полей: Алакитское, Далдынское, Мунское, Чомурдахское, Омонос-Укукитское, Огоньорское, Моторчунское, Нижне-Укукитское, Мерчимденское, Верхне-Молодинское и Куойкское (рис. 4) [Ваганов, 2000].

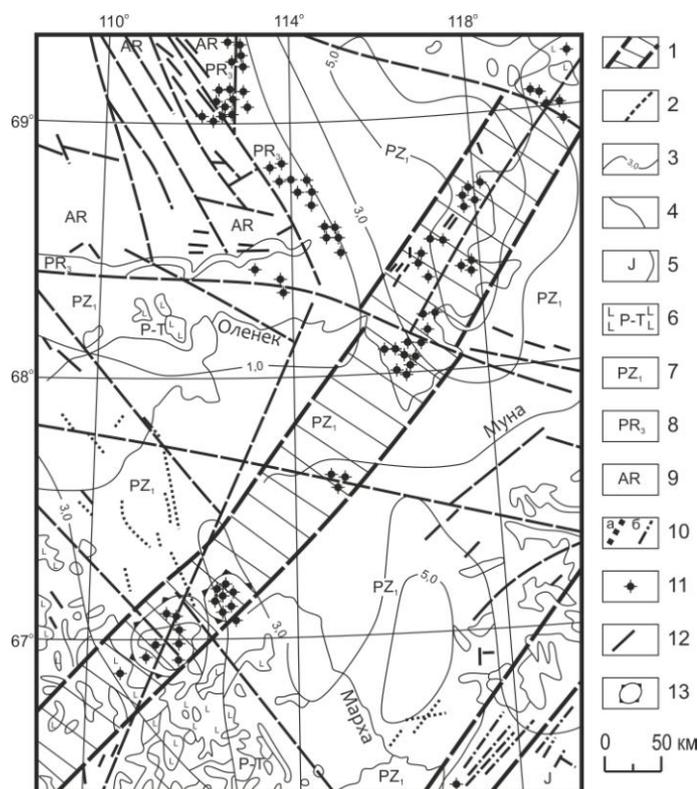


Рисунок 4. Геолого-структурная схема Алакит-Оленекской зоны скрытых глубинных разломов [Ваганов, 2000]: 1 – зона скрытых глубинных разломов; 2 – разломы; 3 – изогипсы поверхности фундамента; 4 – геологические границы; 5 – юра - песчаники; 6 – пермь-триас - траппы; 7 – нижний палеозой - известняки, доломиты; 8 – верхний протерозой - песчаники, алевролиты; 9 – архей – метаморфические породы; 10 – дайки долеритов на поверхности (а) и погребенных (б); 11 – кимберлитовые трубки взрыва; 12 – кимберлитовые дайки; 13 – купола.

Анализируя особенности строения кимберлитовых полей Якутской провинции, Е.И. Борис пришел к выводу, что кимберлиты приурочены только к скрытым глубинным разломам [Борис, 1991]. Такие разломы были выделены практически во всех алмазоносных районах Якутии. Так к разряду скрытых отнесены субмеридиональные разрывы Вилуйско-Мархинской тектонической зоны (Западный и Параллельный), расположенные в центральной части Мало-Ботуобинского района [Молчанов, Саврасов, 1981, 1985]. Иной точки зрения по этому поводу придерживался Я.Я. Биезайс, который скрытыми считал не разломы Вилуйско-Мархинской системы северо-восточной ориентировки, а разломы северо-западного простирания [Биезайс и др., 2001]. По его мнению, размещение кимберлитовых тел зависит как от первых, так и от вторых.

Для Далдыно-Алакитского района выделены три системы внутриплатформенных глубинных разломов: субмеридиональная, субширотная и Вилуйско-Котуйская зона, преимущественно северо-западного простирания. Первые две отнесены к скрытым, с ними пространственно связывают кимберлитовые поля Далдыно-Алакитского района, а также Мунское кимберлитовое поле. Разломы последней зоны считаются сквозными [Потуроев, 1975]. Этот вывод вступал в противоречие с данными, полученными немногим ранее Г.Д. Балакшиным и др. Они считали, что кимберлитовый магматизм Далдыно-Алакитского района «связан с глубинным магмоподводящим разломом север-северо-восточного направления, от которого по системе субширотных разломов шло образование дайкообразных периферических очагов, где и происходило заложение кимберлитовых диатрем» [Балакшин, Пляскина, 1970, с. 103]. Причем ни магмоподводящие, ни магмоконтролирующие разломы не отнесены к типу скрытых.

В Средне-Мархинском районе в качестве главной рудовмещающей структуры по мнению В.М. Зуева выступает скрытый разлом северо-восточного простирания, в составе которого выделяется два тектонических шва [Зуев и др., 1998]. Ботуобинское месторождение локализовано во флексурном перегибе одного из них, а Нюрбинское – в узле пересечения мелких швов субпараллельных Вилуйско-Мархинскому дайковому поясу и зоны север-северо-восточного простирания.

Начиная с 90-х годов 20-го века вкупе с геолого-геофизическими методами для выявления кимберлитоконтролирующих разломов стали применять геолого-структурные и тектонофизические методы. С их помощью удалось установить не только пространственное положение таких разрывов, но и их кинематику. Так некоторые исследователи указывают на то, что кимберлиты располагаются в зонах сдвигов [Игнатов, Штейн, 1997, Игнатов и др., 2006; Божевольный и др., 1998, Гладков, 2006]. Помимо этого выделены модельные условия

локализации кимберлитовых тел для некоторых алмазоносных районов Якутской провинции. Предполагается, что в структурах pull-apart (пулл-апарт) локализованы трубки «Айхал», «Мир», «Юбилейная» [Гладков и др., 2003; Гладков, 2006], а также трубка «Нюрбинская» [Игнатов и др., 2004, 2006]. В зонах дуплексов растяжения располагаются месторождения «Ботуобинское», «Майское», «Мархинское» [Бушков, 2006; Игнатов и др., 2008].

Иными смотрятся доводы В.А. Милашева касаясь контроля кимберлитов дизъюнктивными структурами. Широко распространенная идея о кимберлитоконтролирующей роли глубинных разломов на региональном уровне является с его точки зрения ошибочной: «Подавляющая часть таких зон (региональные зоны глубинных разломов – прим. автора) не подтверждается ни геологическими, ни геофизическими данными, в связи с чем рисовка их в значительной мере определяется представлениями авторов» [Милашев, 1979, с. 12]. В более поздней своей работе он пишет: «Размещение подавляющего большинства кимберлитовых полей Сибири и Южной Африки не зависит от крупных разломов ...» [Милашев, 1984, с. 93]. Эти разломы, по его мнению, разграничивали крупные блоки фундамента, различающиеся по физико-механическим свойствам пород, и не являлись кимберлитоконтролирующими. Также им отрицаются данные о приуроченности кимберлитовых полей к зонам пересечения глубинных разломов. «Широко распространенное мнение о подъеме и кристаллизации кимберлитовых расплавов в узлах пересечения сети крупных тектонических зон отражает представление объективно желаемое, но не подтверждаемое фактическими данными, а частично и противоречащее наблюдениям» [Милашев, 1990, с. 122]. Отрицая связь кимберлитовых полей с глубинными разломами и будучи приверженцем гипотезы зонной плавки В.А. Милашев указывает: «...наиболее благоприятными для проявления кимберлитового вулканизма являются участки платформы, характеризующиеся пониженной толщиной земной коры и минимальным расстоянием между подошвой коры и кровлей «линзы» поднявшегося с глубины субстрата» [Милашев, 1979, с. 15].

Что касается локальных факторов размещения кимберлитов, то в качестве таковых автор выделяет глубинные разломы и места их пересечения: «Кимберлитовые тела в основном располагаются в виде цепочек вдоль зон глубинных разломов и нередко концентрируются на небольших участках, образуя либо «кусты» трубок, располагающиеся, вероятно, в узлах повышенной трещиноватости и на пересечениях разломов, либо субпараллельно или кулисообразно расположенные полосы линейно вытянутых тел» [Милашев, 1965, с. 9].

Обобщая приведенный материал, можно сделать следующий промежуточный вывод. Несмотря на то, что представления о ведущей роли глубинных разломов развивается уже более 100 лет и находит сторонников в настоящее время, до сих пор не разработана единая модель

кимберлитоконтролирующих разломов, а также не выяснена геотектоническая обстановка появления таких дизъюнктивов. Для решения этих проблем в последнее время привлекаются новые данные о тектонической позиции известных алмазных месторождений, получаемые при непосредственном исследовании трещиноватости в горных выработках, использовании новых геофизических методов и переинтерпретации уже имеющейся информации. Комплексное использование перечисленных методов должно обеспечить получение качественно новых прогнозно-поисковых моделей алмазоносных месторождений.

Контроль размещения кимберлитов крупными платформенными структурами. Вслед за гипотезой о кимберлитоконтролирующей роли разрывных нарушений в геологической среде появилась идея пространственной приуроченности кимберлитовых районов/полей/кустов/отдельных тел крупным структурам платформы. В их число входят пликативные структуры: синеклизы, антеклизы, флексуры, а также поднятия, прогибы, причем выделяются они как в чехле и фундаменте платформы, так и в мантийной ее части.

Одними из первых кто обратил внимание на наличие пространственной связи кимберлитовых таксонов с крупными элементами платформы, был И.П. Атласов. Изучая кимберлитовые тела северо-востока Сибирской платформы, он установил, что кимберлиты этого района располагаются в пределах нижнепалеозойской Средне-Оленекской синеклизы [Атласов, 1960]. Также им высказано предположение о связи проявлений кимберлитового вулканизма с синеклизами для всех алмазоносных провинций, которое не нашло широкой поддержки в геологическом обществе.

При детальном исследовании геологического положения кимберлитовых тел в осадочном чехле Якутской алмазоносной провинции В.В. Ковальским и И.С. Рожковым выяснено, что кимберлитовые тела приурочены к наиболее ослабленным частям крупных платформенных структур – крыльям антиклиналей, синклиналей, флексурным перегибам и т.д. [Ковальский, 1963; Рожков, Ковальский, 1965]. В качестве примера В.В. Ковальский приводит трубки «Мир» и «Спутник», которые находятся «в области незначительного воздымания нижнепалеозойских пород», а также, ссылаясь на данные М.В. Сулова, В.Г. Горшкова, С.Ф. Духанина, К.С. Забурдина и др., говорит о приуроченности группы трубок к Куойскому поднятию и замковым частям антиклиналей в Средне-Оленекском районе. Для подтверждения своих предположений им построена структурная карта чехла платформы по кровле среднего кембрия (рис. 5), на которой отражено пространственное положение кимберлитовых трубок относительно структуры осадочного чехла. Пространственная связь кимберлитовых тел с наиболее ослабленными областями крупных структур по мнению цитируемых авторов показывает, что «... наряду с глубинными разломами структуры осадочного чехла играют

значительную роль в контроле пространственного распределения кимберлитовых тел» [Рожков, Ковальский, 1965, с.176].

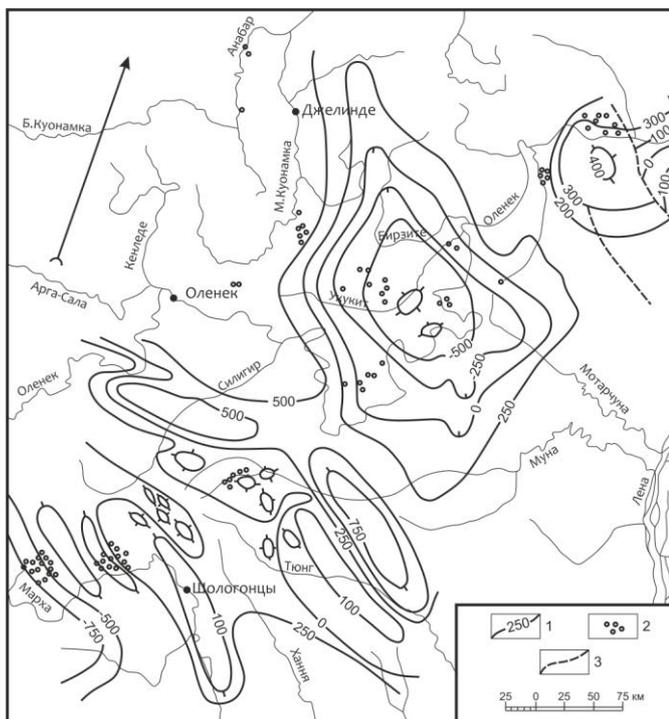


Рисунок 5. Схема размещения кимберлитовых тел относительно структуры осадочного чехла платформы по кровле среднего кембрия [Ковальский, 1963]. Структурная основа дана по тектонической карте Якутской АССР масштаба 1:2 500 000, составленной геологами Якутского филиала СО АН СССР и ЯГУ, под редакцией Ю. А. Косыгина, К. Б. Мокшанцева и В. В. Еловских). 1- изогипсы кровли среднего кембрия; 2 — кимберлитовые тела; 3 — тектонические нарушения.

Схожую точку зрения высказывала группа геологов во главе с А.П. Бобриевичем, занимавшаяся исследованием кимберлитов в бассейне р. Далдын [Бобриевич и др., 1961]. Они отмечали, что левобережные трубки - «Зарница», «Невидимка», «Осенняя», «Малютка», «Соседняя» приурочены к флекуре северо-западного простирания и частично к группе мелких куполов и депрессий, в то время как правобережные - «Молодежная», «Ленинградская», «Геофизическая» и «Долгожданная» приурочены к разлому восток-северо-восточного направления.

Л.Г. Страхов, используя данные геофизических исследований на Сибирской платформе, сделал предположение о приуроченности всех кимберлитовых районов Сибирской платформы к крупным депрессиям и поднятиям верхней мантии, образованным зонами перегиба и наклона поверхности Мохоровичича. В своей более поздней работе он пишет: «Наибольшее количество кимберлитовых проявлений приурочено к области, для которой характерно воздымание поверхности Мохоровичича и, соответственно, значительное уменьшение мощности земной коры (40-27 км)» [Страхов, 1971, с. 112].

Сторонники мобилизма связывали формирование кимберлитовых тел с дрейфом континентов [Пейве и др., 1976]. Они считали, что кимберлит образуется в зоне крупной субгоризонтальной тектонической поверхности. Его формирование сопровождается процессами флюидизации, что позволяет вновь образованным тектонитам внедряться в земную кору.

В.И. Никулин, рассматривая разноранговые кимберлитовые таксоны, указывал на площадное, а не линейное развитие кимберлитов в ряде регионов: Оленекское поднятие Якутии, Южная Африка, Канадский щит. По его мнению кимберлитовые таксоны приурочены к брахиформным поднятиям во фланговых частях синеклиз: «...структурный контроль кимберлитовых районов и обособленных полей в пределах алмазоносных провинций осуществляют линейные предкимберлитовые компенсационные поднятия, приуроченные к дальним флангам трапповых впадин синеклиз соответствующих эпох тектоно-магматической активизации» [Никулин и др., 1988, с. 38]. Все среднепалеозойские кимберлиты пространственно отождествлялись им с дальними флангами Виллюйской трапповой гемисинеклизы [Никулин, 1989].

Иную точку зрения по этому вопросу высказывал А.С. Барышев, согласно которому «...кимберлитовые тела равноудинаково могут размещаться как в положительных, так и отрицательных структурах осадочного чехла» [Барышев, 1998, с. 234]. Высокоалмазоносные кимберлиты среднепалеозойского возраста пространственно располагаются в прогибах подошвы земной коры и воздыманиях поверхности фундамента, а низкоалмазоносные мезозойские кимберлиты тяготеют к воздыманиям подошвы земной коры и поверхности фундамента.

С мантийными структурами связывал пространственное распределение кимберлитовых полей по территории Сибирской платформы Ю.М. Фомин. Ссылаясь на результаты сейсморазведки, проведенной в южной части Якутской провинции [Суворов, Шарапов, 1991] на поверхности мантии им выделена флексурообразная структура, западное крыло которой контролирует региональное размещение кимберлитовых полей исследуемой территории [Фомин, 1992]. Изучая отдельные кимберлитовые поля, цитируемый автор пришел к выводу, что кимберлитовые трубки внутри полей контролируются грабенообразными структурами. Подобная структура была выделена в Ботуобинском кимберлитовом поле по результатам обработки среднемасштабных космофотоснимков.

В заключение хотелось бы отметить работы А.А. Духовского с коллегами. Они, опираясь на данные гравиразведки, выделили на территории Сибирской платформы так называемый Анабарский мегаблок, к которому приурочены все достоверно известные проявления кимберлитового магматизма [Духовский и др., 1986]. Внутри выделенного мегаблока

продуктивные поля локализуются в узлах пересечения северо-восточных зон растяжения и северо-западных зон смятия фундамента. Установлено, что 4 наиболее алмазоносных среднепалеозойских кимберлитовых поля Якутской провинции находятся в узле выделенных ими зон.

Контроль размещения кимберлитов тектонической трещиноватостью. Идея о приуроченности кимберлитовых тел тектонической трещиноватости зародилась довольно давно, еще в 70-е годы 20-го столетия. Однако широкого развития она не получила и имела малочисленных сторонников, в то время как две другие точки зрения о приуроченности к зонам глубинных разломов и крупным платформенным структурам, развивались достаточно интенсивно. Одним из основных приверженцев этой идеи был В.С. Трофимов. Согласно его исследованиям в различных районах распространения кимберлитовых пород все тела приурочены к разного рода трещиноватости: а) радиальная трещиноватость, возникающая при образовании купольных структур; б) трещиноватость, сопровождающая образование грабенов (трубки Мерчимдэнского района ЯАП и трубки Анголы); в) трещиноватость, возникающая в пределах флексур (трубки Далдынского района ЯАП); г) трещиноватость, оперяющая региональные глубинные разломы (трубка Мир) [Трофимов, 1967]. Наиболее благоприятными местами локализации кимберлитовых тел являются места пересечения разломов и зон трещиноватости или разных направлений трещиноватости, что доказано горными работами на трубках «Кимберлей» и «Де-Бирс». Что касается распространения более крупных алмазных таксонов, таких как кимберлитовое поле или район, то по мнению автора пространственно они могут быть приурочены либо к областям сопряжения крупных структурных элементов платформы [Трофимов, 1961], либо к глубинным разломам, возникающим на окраинах континентов или в краевых зонах наложенных структур [Трофимов, 1967].

В.Н. Щукин и коллеги, проводя исследования Мало-Ботуобинского района, пришли к выводу о связи отдельных кимберлитовых тел с тектонической трещиноватостью. Они предположили, что кимберлитовые тела исследуемого района приурочены не к самим глубинным разломам, выделяемой большинством исследователей субмеридиональной Вилуйско-Мархинской зоны, а «... внедрились по трещинам отрыва, оперяющим региональные глубинные разломы ССВ простирания» [Щукин и др., 1972, с. 173]. В качестве примера они приводят трубку Мир и Спутник, и соединяющую их жилу, которые по их мнению локализовались в трещине, оперяющей Мирнинский глубинный разлом.

В.Е. Минорин и А.Д. Харьков, не отрицая наличие пространственного контроля кимберлитовых полей (районов) пересечениями разноориентированных систем разломов заключили, что отдельные кимберлитовые тела могут быть приурочены не только к разломам и

узлам их пересечения, но и к оперяющим глубинные разломы трещинам [Минорин, Харьков, 1977].

В работах В.А. Милашева [Милашев, 1979, 1984] также достаточно широко рассмотрена связь кимберлитового магматизма с тектонической трещиноватостью. Опираясь на данные о количественной характеристике мегатрещиноватости и плотности гидросети, которые указывают на степень проницаемости земной коры, автор заключил, что кимберлитовые тела в большинстве своем располагаются на тектонически ослабленных участках. Они представляют собой «...блоки с густой и изометричной по ориентировке тектонической трещиноватостью горных пород, а в их пределах – наиболее трещиноватые зоны и места пересечения дизъюнктивных дислокаций» [Милашев, 1984, с. 258]. Данные о характере трещиноватости также позволили В.А. Милашеву провести структурное районирование участков с известными кимберлитовыми телами и определить на основе анализа площадных схем роз-диаграмм границы некоторых кимберлитовых полей (Омонос-Укукитское, Чомурдахское и др.), для которых установлена пространственная связь со спирально-вихревыми структурами.

Трещиноватость и разлом в плане механического разрушения горных пород практически идентичны. Это два составляющих понятия «тектонический разрыв», которые отличаются размерами и амплитудой смещения [Семинский, 2003]. Разлом в широком смысле понимается как протяженная линия, по которой происходит смещение геологических толщ. Однако уже давно установлено, что разлом включает в себя некоторый объем горной породы, в котором происходят тектонические процессы, который был назван областью или зоной динамического влияния разлома [Шерман и др., 1983, 1991]. Эта область характеризуется повышенной раздробленностью и наличием большого количества различных систем трещин. Именно с ней сторонники рассматриваемой точки зрения связывают пространственное положение кимберлитовых тел. Часть из них говорят о приуроченности трубок непосредственно к центральным частям зон разломов, другие – к оперяющим трещинам или разломам. Но в целом идея кимберлитоконтролирующей роли тектонической трещиноватости, как составной части области динамического влияния разломов, прослеживается во всех рассмотренных работах.

Контроль размещения кимберлитов рифтовыми структурами и авлакогенами. Идея о приуроченности кимберлитового магматизма к авлакогенам и рифтовым структурам имеет достаточно большую историю и берет начало с работ зарубежных геологов по территории юго-восточной Африки. Однако долгое время она не находила сторонников среди советских геологов и поэтому в нашей стране практически не разрабатывалась. И лишь после открытия кимберлитов на Восточно-Европейской платформе, где сеть авлакогенов хорошо изучена, данная идея получила широкое развитие и на сегодняшний момент является одной из ведущих.

Термины «рифт» и «авлакоген» по-разному трактуются разными авторами. Так в работе Е.В. Францессона и Б.Г. Лутца под термином авлакоген понимается палеорифт, завершивший свое развитие и представленный в виде сквозной структуры основания платформы. А рифты в их представлении - это «... интракратонные подвижные пояса, на всем протяжении контролируемые глубинными разломами и отвечающие зонам глубокой перестройки земной коры и верхней мантии Земли» [Францессон, Лутц, 1995, с. 157]. По мнению К.К. Левашова рифт (или рифтовая впадина) - это «... протяженный полосовидный участок земной коры, развитый на сводовом поднятии и ограниченный сбросовыми или сбросо-сдвиговыми дислокациями» [Левашов, 1975, с. 49]. В работах Е.Е. Милановского эти два термина отождествляются. По существу рифты (рифтовые структуры) можно считать зачаточными формами древних авлакогенов и их более молодыми боковыми ответвлениями, которые образуют области/зоны динамического влияния [Дукардт, Борис, 1999, 2000].

Первыми кто указал на возможную пространственную связь авлакогенов и кимберлитов Якутской провинции были В.Л. Масайтис, М.В. Михайлов и Т.В. Селивановская. По их мнению «... среднепалеозойские кимберлиты Мало-Ботуобинского, Далдыно-Алакитского и Мунского районов, принадлежащих к формации ультраосновных - щелочных пород, располагаются либо непосредственно в пределах Вилюйско-Мархинской зоны разломов, отграничивающей Патомско-Вилюйский авлакоген с северо-запада, либо на удалении (100—150 км) от этой зоны, на борту авлакогена» [Масайтис и др., 1975, с. 148]. В работе Левашова К.К. того же 1975 года постулируется очень близкая точка зрения с той лишь разницей, что автор указывает на приуроченность кимберлитов не к Патомско-Вилюйскому авлакогену, а к Патомско-Вилюйской рифтовой системе [Левашов, 1975]. Магматические тела, связанные с палеорифтами по его мнению контролируются глубинными рифтоограничивающими разломами [Левашов, 1980].

А.С. Гринсон также поддерживал точку зрения о наиболее благоприятном тектоническом режиме древнего рифтогенеза для проявления кимберлитового магматизма и считал, что кимберлиты внедряются по скрытым трещинам, которые образуются в области пересечения зон растяжения (разуплотнения) и зон трансформных разломов [Гринсон, 1984].

Достаточно широко проблема связи кимберлитового магматизма с рифтообразованием освещена в работе Б.Р. Шпунта [Шпунт, 1991]. Кимберлитоконтролирующими структурами он считал зоны краевых дислокаций (коллизийные зоны) рифтовых систем позднеархейского возраста, которые имеют единое с рифтом простирание, ширину до 30 км и располагаются от осей рифтов на расстоянии 80-200 км (рис. 6). Расположение отдельных кимберлитовых полей контролируется узлами пересечения таких зон друг с другом, либо с глубинными разломами,

ориентированными вкрест их простирания. Рифтогенные системы рассматриваются в качестве источников энергии для создания необходимого геодинамического режима преобладающего сжатия, который по мнению автора является благоприятным для образования кимберлитов.

Со временем введенный Б.Р. Шпунтом термин «зона краевых дислокаций» или «коллизонная зона» претерпел некоторые изменения и стал употребляться в работах последователей, как «зона динамического влияния авлакогена» (ЗДВА), либо «область динамического влияния авлакогена» (ОДВА).

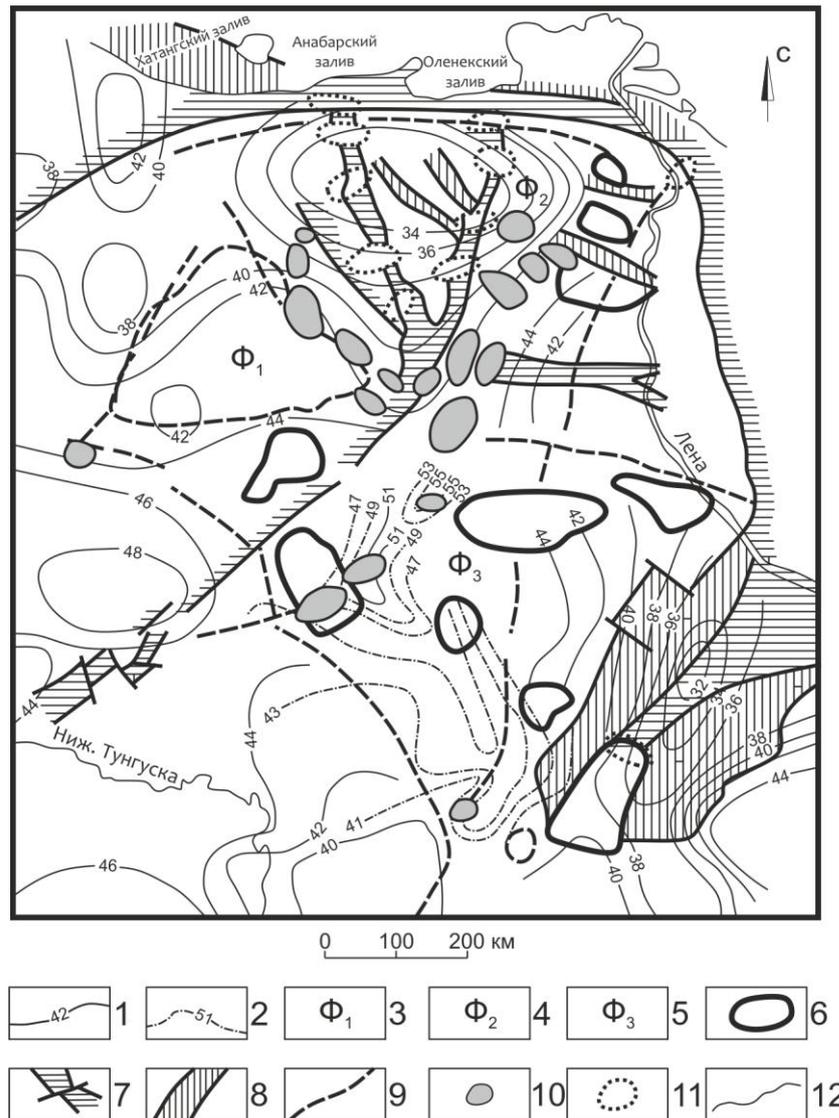


Рисунок 6. Кимберлитоконтролирующие минерагенические зоны Сибирской платформы [Шпунт, 1991]. 1,2 – изогипсы залегания границы Мохо земной коры: 1 – по Н.М. Чернышеву, 2 – по В.Д. Суворову; 3-5 – мегаблоки фундамента: 3 – гранито- и гранулитово- (эндербитово)-гнейсовый, 4 – серогнейсово-зеленокаменный, 5 – гранулит-базитовый; 6 – локальные выступы фундамента; 7-8 – палеорифтовые зоны: 7 – позднеархейско-позднекембрийские, 8 – среднепалеозойские; 9 – коллизонные зоны; 10 – кимберлитовые поля; 11 – поля развития лампроитов, пикритов; 12 – гидросеть.

Ряд доказательств связи авлакогенов с кимберлитами приведен в работе Е.В. Францессона и Б.Г. Лутца [Францессон, Лутц, 1995]. Во-первых, это конкретные примеры сопряженности, в качестве которых ими приводятся некоторые кимберлитовые районы и поля на Восточно-Европейской и Сибирской платформах. Во-вторых, авторы указывают на синхронность эпох кимберлитообразования с эпохами и стадиями становления и регенерации авлакогенов. В-третьих, это «... связь во времени и пространстве кимберлитовой формации с парагенезисом авлакогенных магматических формаций» [Францессон, Лутц, 1995, с. 160]. Кимберлитоконтролирующими структурами являются пересеченные разломами (преимущественно сбросовой и сдвиговой кинематики) сопряженные с авлакогенами поднятия, а также узлы пересечения этих разломов.

Проводя структурно-тектоническое исследование Сибирской платформы с использованием данных МОГТ (метод общей глубинной точки), Ю.А. Дукардт и Е.И. Борис приходят к выводу, что все кимберлитовые районы ЯАП пространственно приурочены к ЗДВА, которые образованы боковыми затухающими грабенами, микрограбенами и другими структурами горизонтального растяжения [Дукардт, Борис, 1996]. На исследуемой территории ими выделен ряд ЗДВА: Вилючанская, сквозная Алакит-Моркокинская, Нижнеморкокинская, Лахарчан-Батарская, Ботуобинская, Далдыно-Мунская, Ыгыатинская. На пересечении последней с Вилюйско-Мархинским даечным комплексом располагается Мирнинское поле. Дальнейшее исследование закономерностей размещения кимберлитовых полей на разных платформах мира позволило авторам сформулировать следующее эмпирическое правило: «... алмазонасные кимберлиты внутри авлакогенов не встречаются, но располагаются по их перифериям, характеризующимися определенной спецификой своего структурно-тектонического строения, позволяющего выделять как области динамического влияния авлакогенов (ОДВА)» [Дукардт, Борис, 2000, с. 30]. В пределах ОДВА поля магматитов контролируются линейно вытянутыми структурами повышенной проницаемости. К их числу авторы относят зоны доавлакогенных и поставлакогенных рифтовых разломов, а также пояса даек. По результатам работ ими установлено, что «... кимберлитовые поля располагаются по краям, в целом, авлакогенной области Сибирской платформы» [Дукардт, Борис, 2000, с. 154].

Те же выводы встречаются в работе якутского геолога И.Г. Коробкова. Обобщая геолого-геофизические данные по территории ЯАП, автором установлено, что «... основными структурными элементами осадочного чехла в пределах всех изученных кимберлитовых полей являются грабенообразные линейные депрессии» [Коробков, 2014, с. 343]. Эти депрессии входят в ЗДВ Патомско-Вилюйского и Вилюйско-Котуйского авлакогенов и контролируют основные кимберлитовые поля Сибирской платформы.

Достаточно широко распространенная на данный момент идея о связи кимберлитов с авлакогенами и рифтами имеет некоторые спорные моменты. Большинство авторов, придерживающихся этой точки зрения, пишут о приуроченности кимберлитовых тел ЯАП Патомско-виллюйскому авлакогену, а точнее его «плечевым (бортовым) частям». Но сопоставив размеры авлакогена с размерами площади, на которой встречаются кимберлитовые тела, В.И. Ваганов пришел к следующему выводу: «... можно сказать, что все среднепалеозойские кимберлитовые поля Якутии приурочены к бортовой части Патомско-Виллюйского авлакогена, однако, учитывая, что эта «бортовая часть» охватывает чуть ли не половину территории Сибирской платформы, очевидно, что в прогнозном отношении в данном случае взаимосвязь кимберлитов и авлакогенов практического значения не имеет» [Ваганов, 2000, с. 89]. Не установлена связь рифтов (авлакогенов) с проявлениями кимберлитов для Архангельской субпровинции. «Там рифты имеют СЗ простирание, а ориентировка кимберлитовых полей – северо-восточная» [Савко, Шевырев, 2002, с. 8]. Имеется и ряд других работ, в которых оспариваются выводы этой концепции.

Рифты, авлакогены, ОДВА, ЗДВА – это основные структуры, с которыми приверженцы данной гипотезы связывают проявления кимберлитового магматизма. В строении каждой из этих структур ведущую роль занимают разрывные нарушения: это могут быть контролирующие, либо ограничивающие разломы для рифтов и авлакогенов, либо совокупность разрывов, образующих ОДВА или ЗДВА. Многие авторы указывают на расположение отдельных кимберлитовых полей или тел в участках пересечения разломов с выделенными структурами. Эти данные больше свидетельствуют о генетической связи кимберлитов с разрывными нарушениями, нежели с рифтовыми структурами.

Контроль размещения кимберлитов кольцевыми структурами. Использование материалов космического зондирования при геологических изысканиях разных масштабов, начиная с 60-х годов XX-го века, позволило геологам получить большой объем новой информации о строении земной поверхности. С ее помощью были выделены разноранговые тектонические структуры, линеаменты, минерагенические зоны и др. Совершенствование методов космического зондирования и использования их, в частности, при исследовании площадей кимберлитового магматизма, привело к появлению новых взглядов на пространственное расположение и контроль кимберлитов. Некоторые исследователи стали говорить о приуроченности кимберлитов к овоидно-кольцевым структурам или нуклеарам.

Так в результате дешифрирования космических снимков В.И. Вагановым с коллегами в пределах фундамента Сибирской платформы было выделено шесть крупных кольцевых структур (нуклеаров) со сложным внутренним строением: Алдан-Становая, Хета-Оленекская,

Вилуйская, Оленекская, Тюнгская, Ангарская, а также фрагменты Обской и Витимо-Олекминской. Они осложнены радиальными линеаментами и кольцевыми структурами меньших размеров, которые образуют узлы тектонической интеграции – места пересечения радиальных и дуговых разломов. Такие узлы по мнению авторов являются основными кимберлитоконтролирующими структурами Сибирской платформы [Ваганов и др., 1985].

Ю.Н. Серокуров [Серокуров, 1995], развивая работы В.И. Ваганова по дешифрированию космоснимков на территории Сибирской платформы, выделил пять наиболее крупных овоидно-радиальных и восемь рифтогенных структур, которые влияют на размещение мантийных пород (рис. 7).



Рисунок 7. Специализированная схема дешифрирования кольцевых и линейных элементов, отражающих глубинные структуры Сибирской платформы [Серокуров, 1995]. 1 – радиальные линеAMENTы и кольцевые структуры; 2 – границы Сибирской платформы; 3 – гидросеть.

Возникновение первых он связывает с одиночными мантийными плюмами, которые, при подъеме к верхней части мантии, формировали над собой крупные радиально-концентрические структуры. Элементы этих структур, диаметром более 1500 км, имеют наиболее очевидную связь с кимберлитами. По подсчетам автора 85 % известных полей контролируется сгущениями зон дуговых элементов, 65 % — пучками линеAMENTов, входящих в систему их радиусов, более 50 % полей тяготеет к узлам пересечения этих образований, 88 % полей находятся в пределах протяженных зон линеAMENTов, проявляющих ограничения рифтов, 76 % полей пространственно совмещены с кольцевыми структурами диаметром 150 - 250 км.

Дальнейшее исследование этой проблемы позволило Ю.Н. Серокурову с коллегами [Серокуров и др., 2001] выделить разноранговые факторы контроля размещения алмазоносных кимберлитов, которые зависят прежде всего от размеров контролирующих структур, а также разрешения космоснимков. Так в качестве трансконтинентальных (планетарных) факторов контроля предлагается рассматривать радиально-концентрические системы, размером до 10 тыс. км в диаметре, выделяемые по сгущениям линеаментов в пределах континентов. Центральные части таких систем считаются наиболее перспективными для формирования алмазоносных провинций. Региональными факторами считаются овоидно-радиальные структуры диаметром 1-2 тыс. км, расположенные в пределах древних платформ и устанавливаемые по космическим снимкам среднего и малого разрешения. Их краевые части являются границей алмазоносной субпровинции. В качестве районных факторов предложены радиально-кольцевые структуры, диаметром 180-220 км, наиболее эффективно выделяемые по космоснимкам среднего разрешения. Районы кимберлитового магматизма располагаются в узлах пересечения радиальных и дуговых элементов более низкого порядка, а также в краевых зонах дислокаций рифтов. Кимберлитовые поля приурочены к центральной или средней зоне таких структур. Наконец, локальные факторы – это «... конические ограничения внутренней и средней зон структуры ранга район, радиальные их составляющие в сфере влияния тектонических элементов более низкого масштаба» [Серокуров и др., 2001, с. 151]. Диаметр их достигает 30-50 км, выделяются по снимкам детального разрешения (1:200 000). Перечисленные факторы по мнению авторов соответствуют таксономическому ряду алмазоносных площадей и обуславливают их региональное положение, либо особенности внутреннего строения.

Данная концепция имеет несколько очень схожих признаков с гипотезой о кимберлитоконтролирующей роли разломов. Прежде всего, это наличие основных выделяемых структур - нуклеаров, которые представляют собой дуговые разрывные нарушения разных рангов. По большому счету это те же разломы, только имеющие округлую в плане форму. Помимо них выделяются еще радиальные разломы, пересекающие нуклеары. Именно узлам пересечений дуговых и радиальных элементов авторы отдают ведущую кимберлитоконтролирующую роль. Подобные доводы о приуроченности кимберлитов узлам пересечения разрывных нарушений встречаются во многих работах приверженцев гипотезы кимберлитоконтролирующей роли разломов. Отсюда можно сделать вывод, что в основе рассматриваемой концепции используются данные о генетической связи кимберлитов с узлами пересечения разломов.

Обзор литературных источников по проблеме контроля кимберлитового магматизма характеризует сложившуюся на данный момент неоднозначную ситуацию. В разработке у исследователей алмазных месторождений находится целый ряд концепций, которые подчас взаимоисключают друг друга. Проведенный анализ работ приверженцев разных гипотез позволил выявить одну достаточно четкую закономерность: большинство рассмотренных концепций пусть не напрямую, но косвенно указывают на связь кимберлитового магматизма с разрывными нарушениями. Так в теории контроля кимберлитов платформенными структурами положение кимберлитов отождествляют либо с краевыми частями структур, где расположены структуроограничивающие разломы, либо с ослабленными участками, образованными зонами влияния разломов. Сторонники идеи кимберлитоконтролирующей роли тектонической трещиноватости говорят о приуроченности кимберлитов к участкам с повышенной раздробленностью земной коры. Эти участки, при определенном подходе, можно считать зонами динамического влияния разломов. Широко упоминаются разломы и в рифтовой теории контроля кимберлитов. Некоторые авторы указывают на прямой контроль кимберлитов рифтовыми разломами, другие приводят данные о нахождении кимберлитов в узлах пересечения рифтов и разломов, третьи говорят о приуроченности кимберлитов к зонам динамического влияния авлакогенов или его бортовым частям, которые также образованы оперяющими разломами. Нуклеарная гипотеза содержит много данных о связи кимберлитов и разломов. Кольцевые структуры (нуклеары) состоят из дуговых и радиальных разломов, которые играют первоочередную роль в контроле кимберлитового магматизма.

Каждая из представленных концепций по своему объясняет закономерности локализации кимберлитовых тел в зависимости от тех или иных факторов контроля, но при этом все они носят вероятностный характер и не могут дать полностью сформулированной геолого-структурной модели алмазоносных таксонов разных порядков и в первую очередь – отдельных кимберлитовых месторождений. При этом общим элементом, используемым во всех рассмотренных гипотезах, является разлом, а точнее область повышенной проницаемости, отождествляемая с ним. Это позволяет выделять разрывные структуры как главный, устойчивый фактор контроля кимберлитового магматизма, а саму гипотезу пространственно-генетической связи кимберлитов и разломов – как наиболее надежную для решения задач прогнозирования объектов коренной алмазоносности. Она основывается на представлениях о существовании вертикальных проницаемых областей (каналов), по которым происходило движение кимберлитового расплава от магматической камеры к поверхностным слоям осадочного чехла. С этих же позиций объясняется и сама механика мгновенного подъема расплава с больших глубин (по оценкам О.Г. Сорохтина скорость движения кимберлитовой

магмы составляет 180 км/ч [Сорохтин О., Сорохтин Н., 2006]). Необходимым условием для ее проникновения сквозь толщу литосферы, мощность которой в платформенных областях достигает 200-220 км, является наличие «открытой» магмавыводящей трещины [Артюшков, Соболев, 1977], отождествляемой с глубинным разломом.

Проведенный С.М. Табуновым анализ пространственного положения кимберлитов и разломов северо-востока Сибирской платформы показал, что только 27,1 % кимберлитовых тел находят связь с разрывными нарушениями [Табунов, 1971]. Ту же цифру, 27%, получил В.А. Милашев, проведя статистический анализ расположения кимберлитов и разломов Центральносибирской провинции [Милашев, 1984]. Казалось бы, подобные результаты указывают на несостоятельность концепции кимберлитоконтролирующей роли разломов и напрямую свидетельствуют об отсутствии генетической и пространственной связи разрывных нарушений и кимберлитовых трубок. Однако следует учитывать, что исследования цитируемыми авторами проводились в 70-80-х годах прошлого столетия, когда под термином разлом понималась линия магистрального сместителя, выраженная областью развития тектонитов. В рамках современного тектонофизического подхода разлом представляется как объемное тело, характеризующееся наличием зоны динамического влияния, образованной совокупностью разрывов второго и более высоких порядков, возникших в процессе его формирования. Пересмотр пространственной корреляции разрывных структур и проявлений кимберлитового магматизма с позиции тектонофизики позволит на качественно новом уровне рассмотреть проблему структурного контроля кимберлитового магматизма.

1.2. Геолого-структурная характеристика Накынского кимберлитового поля

Накынное кимберлитовое поле является составной частью Средне-Мархинского района Якутской алмазоносной провинции и территориально расположено на северо-востоке Сибирской платформы. В геологическом строении региона выделяется два структурных этажа. Нижний отвечает кристаллическому фундаменту, а верхний слагает осадочный чехол.

Центральная часть кристаллического фундамента рассматриваемой территории представлена Тюнгским гранулит-ортогнейсовым террейном, который входит в состав Мархинского гранит-зеленокаменного террейна [Розен и др., 2002]. Возраст его формирования оценивается в пределах 2,9-3,3 млрд. лет, что позволяет отнести его к числу ахронов по классификации А.Д. Янсе [Янсе, 1992]. С северо-запада террейн окаймляет Маганская зона тектонического меланжа, а с юго-востока Нюрбинский позднепротерозойский орогенный пояс (рис. 8).

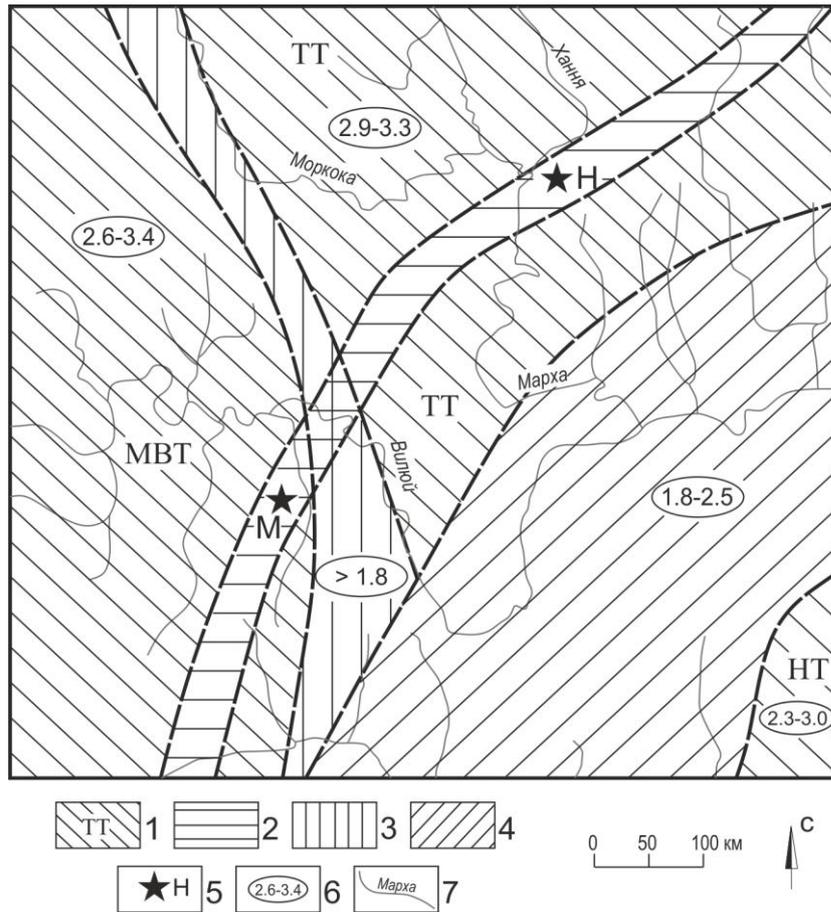


Рисунок 8. Структура фундамента восточной части Северо-Азиатского кратона (фрагмент карты «Тектоника, 2001»). 1 – Террейны: ТТ - Тунгский гранулит-ортогнейсовый террейн, МВТ - Магано – Вилюйский тоналит-трондьермито-гнейсовый террейн (Западно-Якутский архейский протократон), НТ - Нимнырский гранулит-ортогнейсовый террейн; 2 – Вилюйско-Мархинская зона разломов; 3 – Маганская зона тектонического меланжа (Анабаро-Мирнинская коллизонная зона); 4 – Нюрбинский познепротерозойский орогенный пояс; 5 – кимберлитовые поля: М – Мирнинское, Н – Накынское; 6 – модельный возраст (Nd) в млрд. лет; 7 – гидросеть.

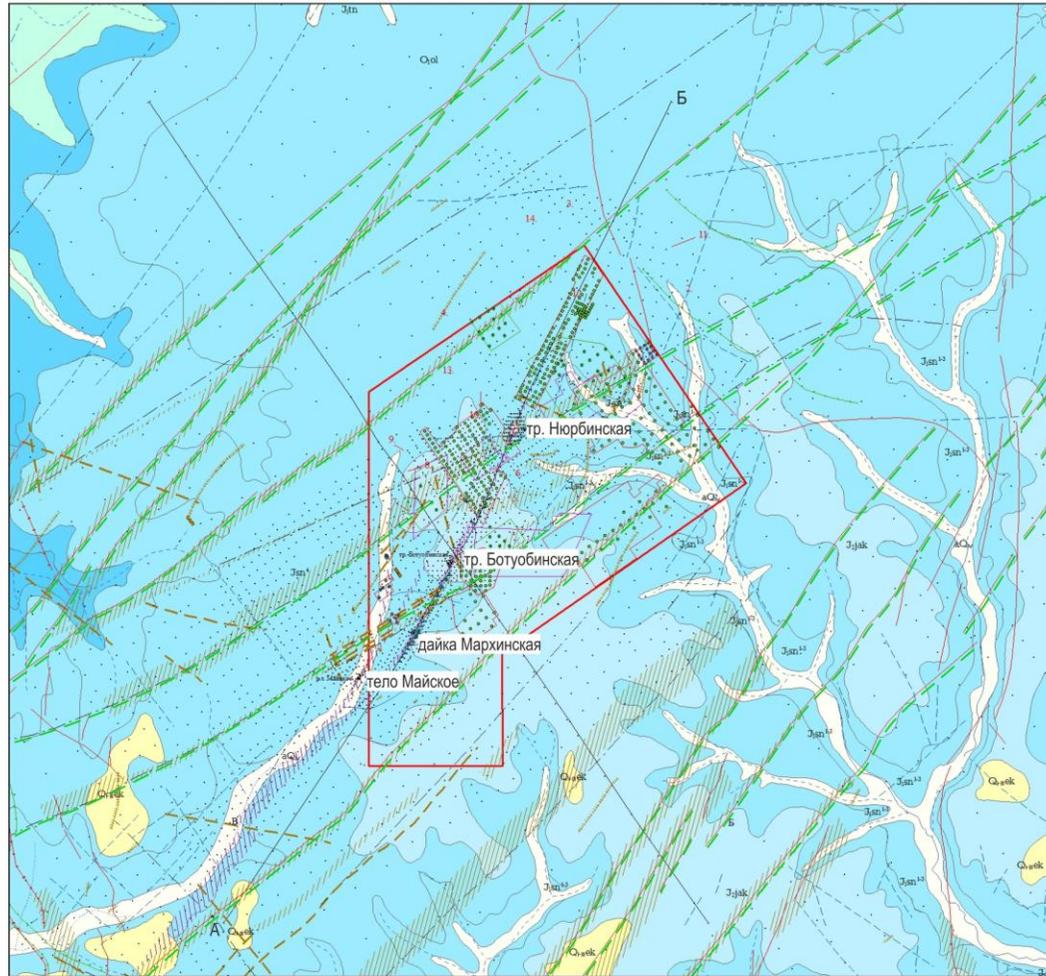
В вещественном плане в строении фундамента участвуют преимущественно зеленовато-серые гранитогнейсы с прослоями биотитовых гнейсов и амфиболитов зеленосланцевой-эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма. В целом нижний структурный этаж испытывает юго-восточное погружение с изменением глубин залегания от 5,5 км на северо-западе до 3,0 км на юго-востоке.

Верхний структурный этаж сложен четырьмя мегакомплексами, соответствующими четырем этапам тектоно-магматической активизации (рис. 9) [Малич, 1975; Матросов, 2006; Никулин, Савко, 2009].

Байкальский мегакомплекс, сформированный в рифейское время, заполняет преимущественно отрицательные структуры фундамента. В его состав входят доломитовые и конгломератовые пачки общей мощностью около 26 м.

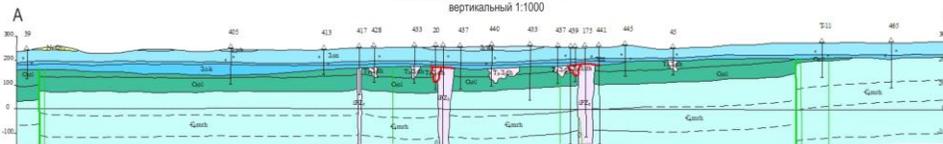
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА НАКЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ

Масштаб 1:50 000



Геологический разрез по линии А-Б

Масштабы: горизонтальный 1:50 000
вертикальный 1:1000



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Геологическая шкала	
Эра	Эпоха
каледонская	Первая
	Четвертая
мезозойская	юрский
	ордовик
валдайская	ранневалдайская
	валдайская
кембрийская	ордовик
	силурий

aQ Аллювиальные галечники, пески, алевролиты

Q_{ek} Эйская свита. Полигенетические суглинки со щебнем и галькой

J_{jak} Песчаники, алевролиты, аргиллиты, линзы конгломератов

J_{sn⁴} Тоарский ярус. Сунтарская свита. Первая, вторая, третья и четвертая пачки объединенные. Песчаники, алевролиты, аргиллиты

J_{ln} Плинсбахский ярус. Верхний подъярус. Тюнгская свита. Песчаники тонкозернистые, глинистые, с гравием и галькой

J_{uk} Плинсбахский ярус. Нижний подъярус. Укугутская свита. Алевролиты, песчаники, глины. В подошве серии пластов и линз конгломератов и конгломератов

T_{-J} Дахтарская толща. Брекчи седиментационные, глыбовые и древесно-щебневые, конгломераты, гравелиты, галечно-песчаные отложения, песчаники, алевролиты, глины, углистые алевролиты и глины, линзы бурых углей

IPZ Кимберлитовые тела: трубки, дайки

vD Дайки долеритов и субщелочных базитов Вилюйско-Мархинского интрузивного комплекса

O_{ol} Тремадский ярус. Олдонлинская свита. Известняки, доломиты, карбонатные алевролиты и песчаники

C_{msh} Аксайский ярус. Мархинская свита. Пестроцветные карбонатные алевролиты, мергели, известняки, доломиты

Тектонические нарушения

а) выраженные в магнитном поле:

Линейные, преимущественно узколокальные магнитные аномалии интенсивностью до 10 нТл, фрагментарно проявленные в магнитном поле, как правило, связываемые с тектоническими нарушениями, не залеченными дайками траппов

Четкие, преимущественно линейные, узколокальные непротяженные со сдвигами осей магнитные аномалии, связываемые как с даечными телами среднепалеозойских траппов, так и возможными другими формами их проявления

Широкие (1-2 км) линейные магнитные аномалии интенсивностью до 20 нТл, как правило, отвечающие разломам Вилюйско-Мархинской зоны, по видимому, фрагментарно залеченные дайками траппов, возможно не выходящих на поверхность PZ

Четкие, линейные, узколокальные, как правило протяженные магнитные аномалии различной интенсивности, связываемые с дайками траппов среднепалеозойского возраста

б) рудовмещающие нарушения:

Предполагаемые по комплексу геофизических данных

Установленные по геологическим данным

Скважины колонкового бурения по объекту Промышленный-3

● Поискные скважины

● Скважины, пройденные для заверки геофизических аномалий

● Скважины, пройденные для заверки геохимических аномалий

▲ Наклонно-направленные скважины

○ Скважины, пройденные ранее по другим объектам

▲ Пройденные ранее наклонно-направленные скважины

Рисунок 9. Геологическая карта Накынского кимберлитового поля [по рабочим материалам БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО)].

Каледонский мегакомплекс повсеместно распространен на исследуемой территории. В его состав включены карбонатные, терригенно-карбонатные осадочные породы венд-силурийского возраста мощностью от 900 м на севере до 4000 м на юге площади и прорывающие их интрузивные образования основного состава.

Нижнегерцинский мегакомплекс сложен магматическими породами базальт-долеритовой и щелочно-ультраосновной (кимберлитовой) формаций. Дайко- и жилообразные тела базитового состава выполняют крутопадающие разломы Вилуйско-Мархинской и Средне-Мархинской разломных зон. Щелочно-ультраосновная формация представлена кимберлитовыми телами Накынского поля.

Альпийский мегакомплекс составляют делювиально-карстовые образования дяхтарской свиты (T_3-J_1dh), терригенные отложения укугутской свиты (J_1uk), лагунно-дельтовые образования тюнгской (J_1tn) и сунтарской (J_1sn) свит. Общая мощность мегакомплекса составляет от первых метров на юго-востоке до 800 метров на севере площади.

Современные отложения на исследуемой территории представлены, главным образом, неогеновыми галечниками, песками и суглинками пойменной и русловой фаций. Образования четвертичного возраста включают комплекс озерных, болотных и аллювиальных фаций общей мощностью до 10-15 м.

Накынское кимберлитовое поле в тектоническом плане расположено на участке сочленения трех крупных структур Сибирской платформы: Анабарская антеклиза, Сюгджерская седловина и Вилуйская синеклиза и пространственно приурочено к северо-западному борту Палео-Вилуйского авлакогена (рис. 10).

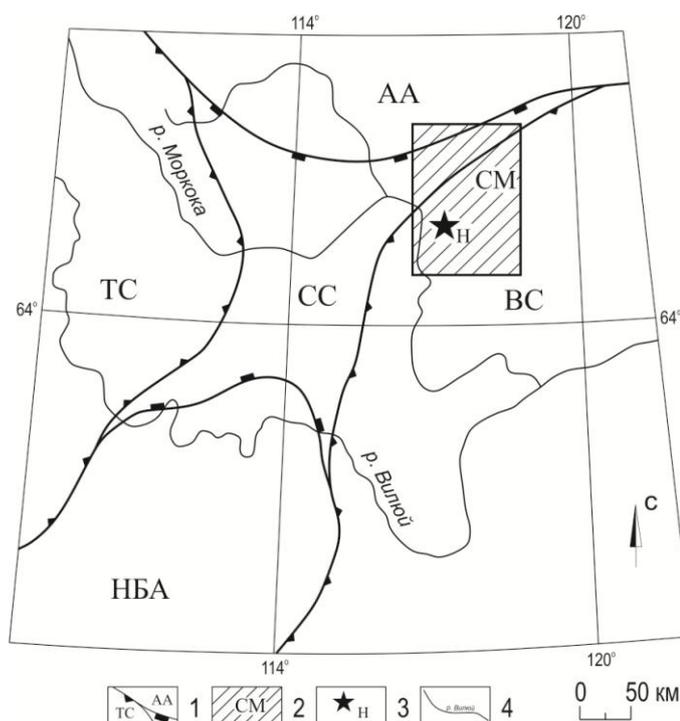


Рисунок 10. Тектоническая схема рассматриваемой территории (по [Коробков и др., 2010]). 1 – структуры I порядка и их условные границы: АА – Анабарская антеклиза, ВС – Вилюйская синеклиза, НБА – Непско-Ботуобинская антеклиза, ТС – Тунгусская синеклиза, СС – Сюгджерская седловина; 2 – Среднемархинский алмазоносный район; 3 – Накынское кимберлитовое поле; 4 – гидросеть; 5 – контур Накынского кимберлитового поля.

Такая позиция налаживает некоторые особенности на структурный план осадочного чехла, который по данным бурения поисково-картировочных скважин имеет достаточно сложное строение. В междуречье р.р. Ханья-Накын в погребенной поверхности нижнего палеозоя контрастно выражены две морфоструктуры: положительная – Ханнинская моноклираль и отрицательная – Дяхтар-Уолбинская депрессия (рис. 11).

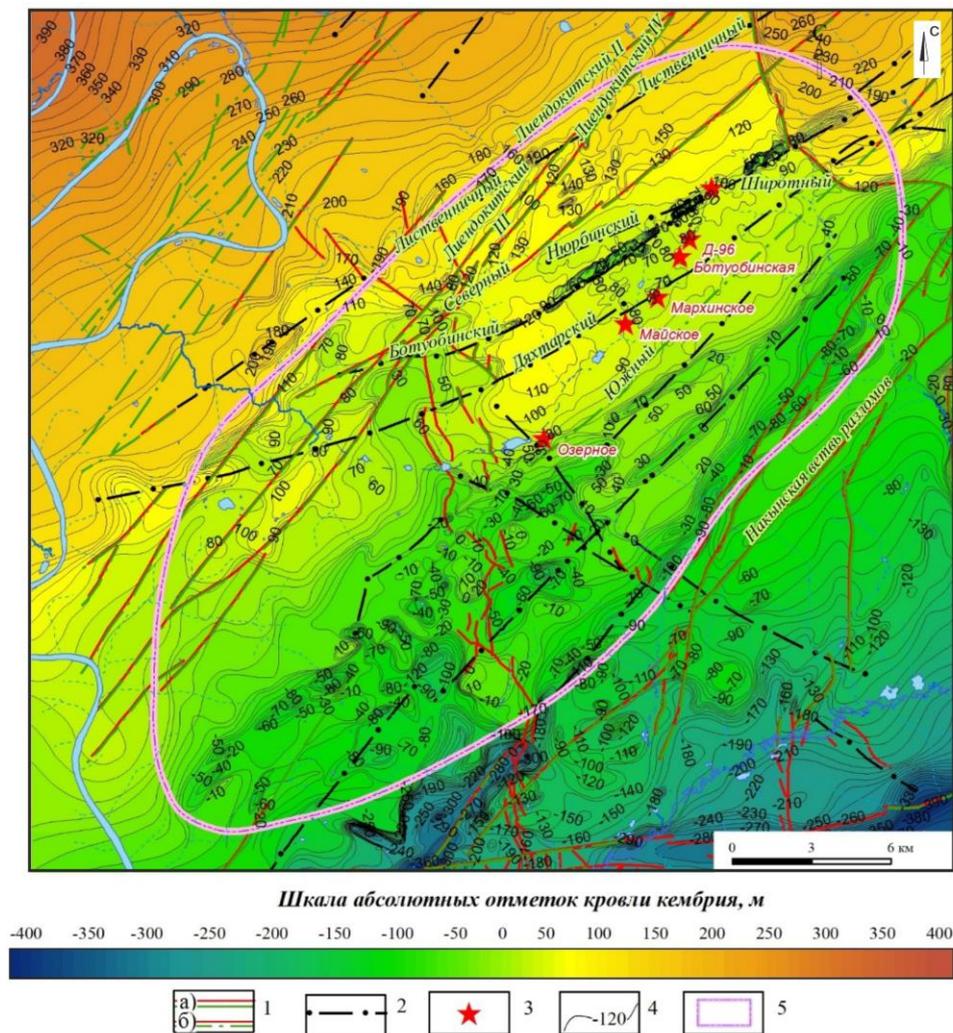


Рисунок 11. Структурно-тектоническая схема Накынского кимберлитового поля (материалы БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО)). 1-2 – разломные нарушения, выраженные в магнитном поле: 1 – четкими линейными узколокальными аномалиями, связанными с дайками долеритов выходящими (а) либо не выходящими (б) на поверхность нижнего палеозоя, 2 – широкими линейными аномалиями до 20 нТл, соответствующими разломам ВМЗ, фрагментарно залеченными дайками долеритов, не выходящими на поверхность нижнего палеозоя, 3 – кимберлитовые тела, их названия; 4 – изогипсы кровли кембрийских отложений (м); 5 – контур Накынского кимберлитового поля.

Первая расположена в центральной части поля, для нее характерно погружение пород нижнепалеозойского кимберлитовмещающего комплекса в юго-восточном направлении с углами падения, не превышающими 1° . Ее южная часть, представленная террасовидной поверхностью (флексурой) шириной до 5 км с абсолютными отметками 170-180 м, включает все известные кимберлитовые тела, расположенные на участке. Здесь градиент погружения кровли кембрия составляет 8 м на 1 км, что соответствует углам падения не более $30'$. В рельефе фундамента флексуре отвечает пологий вал, вытянутый в северо-восточном направлении, с относительными превышениями до 3 м.

Дяхтар-Уолбинская депрессия имеет юго-восточное простирание и прослеживается от устья р. Ханья до среднего течения р. Накын. Абсолютные отметки подошвы нижнепалеозойских отложений в ее пределах изменяются от 200 м в бассейне ручья Дяхтар-Юрэгэ до 80 м в долине р. Накын. От осевой части депрессии в сторону трубки «Ботуобинская» протягивается узкая (40-60 м) впадина, предположительно карстово-тектонического происхождения.

Помимо представленных крупных морфоструктур, в рассматриваемом районе выделяется несколько локальных пликативных форм. Одна из них, выраженная купольным поднятием, размером 3 x 4 км и амплитудой около 30 м, расположена на восточном фланге поля. С востока оно ограничено пологой ассиметричной депрессией северо-восточной ориентировки, а с запада впадиной, вытянутой в субмеридиональном направлении, размеры которой составляют 10 x 3-5 км. В юго-восточной части поля отмечается ряд брахиформных складок, тектонических выступов и желобов, характеризующихся небольшими размерами, не более первых километров и амплитудами, не превышающими 40-50 метров. Выделенные пликативные структуры являются одной из форм проявления глубинных разломов в фундаменте платформы.

Общая тектоническая структура рассматриваемой площади представляет собой результат взаимодействия двух крупных разломных зон: Вилуйско-Мархинской и Средне-Мархинской [Масленникова, 2007ф¹; Колганов и др., 2013]. В узле их пересечения выделяется тектонический блок, к которому приурочено Накынское кимберлитовое поле (рис. 12). Его размеры оцениваются от 15×20 км [Кондратьев, Горев, 2005] до 20×30 км [Харькив и др., 1998]. Границами блока служат крупные разрывные нарушения, названные в соответствии с их пространственным положением относительно сторон света: Северный, Южный, Восточный и Западный разломы. Первые два относятся к Вилуйско-Мархинской зоне, а последние – к

¹ здесь и далее «ф» - ссылка на фондовые материалы.

Средне-Мархинской зоне разломов. На северо-востоке контрастно проявлен Уэн-Уолбинский разлом, по которому весь блок Накынского поля опущен на 40-80 м [Кондратьев, Горев, 2005].

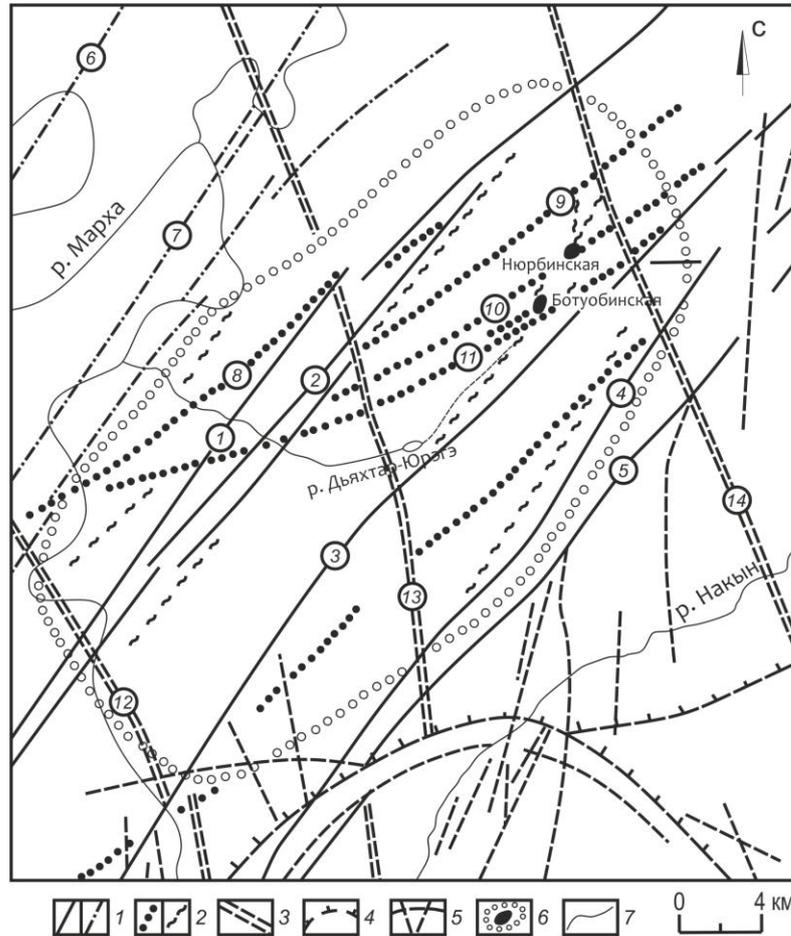


Рисунок 12. Структурная схема Накынского кимберлитового поля [Харьков и др., 1998]. 1 - 2 - разломы Вилуйско-Мархинской тектонической зоны северо-восточного простирания, выполненные дайками траппов: 1 - первого порядка: а - центральной части зоны (1 - Лиендокитский, 2 - Бадаранский, 3 - Южный, 4 - 5 - Усть-Накынский -I и -II), б - ее боковых ветвей (6 - Моройдон-Тюнгский, 7 - Ханнинский); 2 - третьего порядка: а - кимберлитоконтролирующие (8 - Усть-Дьяхтарский, 9 - Северный, 10 - Дьяхтарский, 11 - Ботубобинский), б - предполагаемые рудовмещающие, скрытые, фрагментарно выраженные в геофизических полях; 3 - разломы Среднемархинской тектонической зоны северо-западного простирания второго порядка, определяющие линейно-блоковую структуру кимберлитового поля (12 - Курунг-Юряхский, 13 - Киргеляхский, 14 - Уэен-Уолбинский); 4 - контуры субгоризонтальных интрузий траппов на разных уровнях в осадочном чехле; 5 - кольцевые и радиальные апофизы траппов (даечного типа); 6 - кимберлитовые трубки и предполагаемый контур кимберлитового поля; 7 - гидросеть.

Вилуйско-Мархинская зона является поверхностным отражением глубинного разлома и представляет собой совокупность разрывов фундамента северо-восточного простирания, протяженностью более 800 км и шириной от 20 до 150 километров [Левашов, 1975; Кондратьев, Горев, 2005; Константинов, 2014]. Средне-Мархинская зона преимущественно северо-западного направления является ортогональной по отношению к разломам Вилуйско-Мархинской зоны. Азимуты простирания нарушений колеблются в пределах 320-345°, длина достигает первых

сотен километров, общая мощность зоны – десятки километров. Разломы слабо выражены в платформенном чехле и проявляются на картах магнитного поля в виде прерывистых, изогнутых линейных аномалий. Считается, что разломы северо-западного направления являются более древними по времени заложения, чем северо-восточные. Об этом свидетельствуют зафиксированные случаи смещения осевых линий аномалий гравимагнитного поля северо-западных разрывов, наличие участков раздувов даек основного состава по мере приближения к разрывам северо-восточной ориентировки [Харьков и др., 1998; Кондратьев, Горев, 2005]. Более подробно разрывная структура Накынского кимберлитового поля будет рассмотрена в главе 4.

Особого внимания среди тектонических нарушений Накынского поля заслуживает Диагональный разлом. Установленный геофизической службой БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) данный дизъюнктив принимается большинством исследователей как главная рудовмещающая структура [Зуев и др., 1998; Кондратьев, Горев, 2005; Игнатов и др., 2006; Килижеков, 2017]. В его строении выделяется три ветви: восточная, центральная и западная (рис. 13).

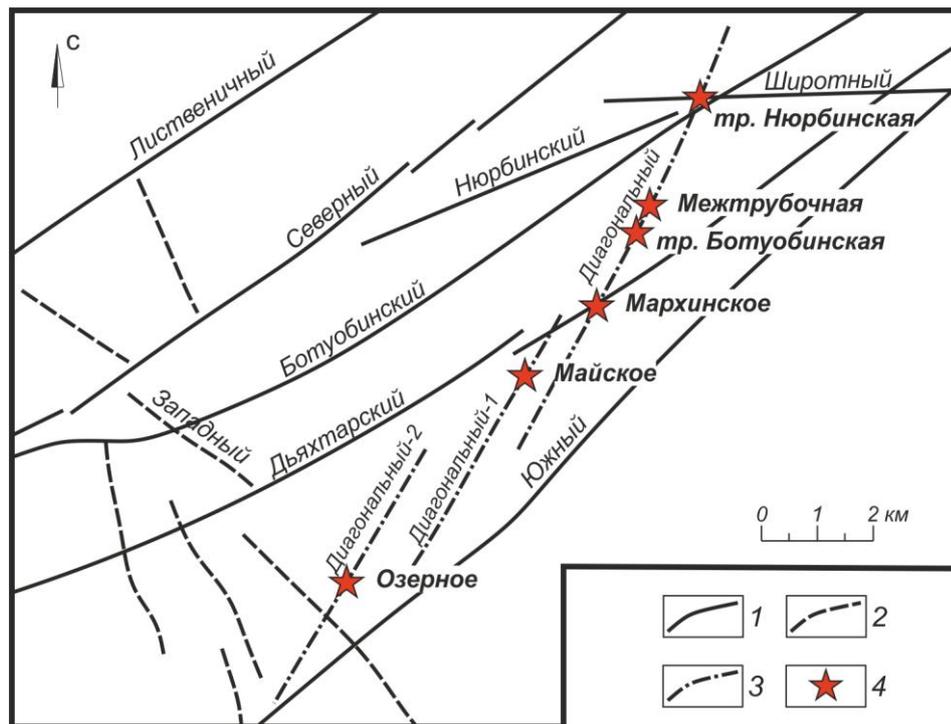


Рисунок 13. Структурный план центральной части Накынского кимберлитового поля (составлен автором по материалам БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО)). 1 – разломы Вилюйско-Мархинской зоны; 2 – разломы Средне-Мархинской зоны; 3 – кимберлитоконтролирующие разломы; 4 – известные кимберлитовые тела.

К первой приурочены трубки «Нюрбинская», «Ботубинская», дайка «Межтрубочная», а также тело «Мархинское». В центральной ветви (разлом «Диагональный-1») локализовано кимберлитовое тело «Майское» [Масленникова, 2007ф]. Западная ветвь (разлом «Диагональный-2») контролирует положение кимберлитовой жилы рудопроявления «Озерное».

Из-за своей слабой проявленности в геофизических полях Диагональный разлом относят к нарушениям закрытого типа, так называемым «скрытым разломам». Его пространственное положение установлено преимущественно по косвенным признакам (наличие минерализованных трещин, зеркал скольжения, микросбросов в кернах поисковых скважин [Игнатов и др., 2008], линейная ориентировка длинных осей кимберлитовых тел), а также по результатам высокочастотного сейсмического зондирования [Сараев и др., 2003] и детальной магнитометрии. Согласно [Килижеков, 2008ф], на отдельных участках разлом носит больше пликативный характер и в целом представляет собой флексуорообразный перегиб, прослеженный через центральную часть Накынского поля. Азимуты простираения изменяются в пределах 10-15°. По отношению к разломам Вилуйско-Мархинской и Средне-Мархинской зон занимает секущее положение.

Изложенная выше геолого-структурная характеристика Накынского кимберлитового поля показала, что разрывная структура, как составляющая всей тектоники площади, изучена достаточно детально, с установлением пространственного положения и некоторых параметров разломов. Однако простого установления пространственного положения разрывов для целей прогнозирования недостаточно. Необходимо, применяя тектонофизический подход, определить условия формирования разломной сети, т.е. восстановить поля напряжений, этапность процессов тектонической активизации, кинематические особенности подвижек по разломам, что в совокупности позволит на качественно новом уровне оценить перспективность данной территории на обнаружение кимберлитовых тел. Учитывая сложные геологические условия, вызванные слабой обнаженностью и большой мощностью перекрывающих отложений, а также широким развитием трапповых комплексов, решение поставленных задач возможно осуществлять на действующих горных выработках – карьерах, подземных рудниках, где доступными для прямого наблюдения оказываются как кимберлитовые тела, так и вмещающие и перекрывающие их отложения. Такими объектами в представляемой работе стали карьеры трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская», которые в настоящий момент вовлечены в промышленную отработку, что создает уникальные условия для их всестороннего изучения.

Глава 2. КОМПЛЕКС МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

За длительный период изучения алмазных районов исследователями применялось большое количество методических разработок и приемов, направленных на решение задач по картированию разломных зон. На открытых территориях это прежде всего натурные маршрутные наблюдения, методы геофизики, дешифрирование аэро-космоснимков. Для закрытых территорий к перечисленному комплексу добавляется специализированная документация керна буровых скважин, структурное дешифрирование топокарт, а также геолого-структурные и тектонофизические исследования в естественных и искусственных обнажениях: карьерах, разрезах, подземных горных выработках. Рациональное комплексирование представленных методов позволяет получать необходимые данные для картирования разрывной сети, определения внутреннего строения и морфологии разломных зон, выявления этапов их активизации и реконструкции полей тектонических напряжений.

Большая часть разрывных нарушений в пределах Накынского кимберлитового поля выделена по результатам детальных комплексных геофизических исследований, включающих профильную магнито-, электро- и сейсморазведку. Однако по ряду объективных причин, некоторые элементы разломной структуры остаются неоткартированными. Это малоамплитудные, неинтрудированные, «скрытые» нарушения, которые слабо или вовсе не проявлены на картах магнитных/волновых полей и картах геоэлектрических сопротивлений. Также на разрешающую способность представленных методов исследований влияет пространственное положение и ориентировка геофизических профилей к картируемым структурам. Так для Накынского поля, в пределах которого рудовмещающим является Диагональный разлом, простирающийся в север-северо-восточном направлении, геофизические профили и буровые линии ориентированы вкост его простиранья, т.е. на север-северо-запад. При таком положении профилей с максимальным разрешением прослеживаются разломы Вилуйско-Мархинской зоны, а разрывы Средне-Мархинской зоны, которые, как будет показано далее, имеют некоторую прогностическую значимость, могут быть пропущены. Отсюда, для получения наиболее полной картины распределения структурных элементов, необходимо геофизические методы сочетать с другими видами исследований, тем самым создавая наиболее эффективный картировочный комплекс. В представляемой работе в подобный комплекс помимо методов геофизики были включены приемы тектонофизического анализа и структурное дешифрирование топографических материалов.

2.1. Тектонофизические методы

Тектонофизические методы имеют своей задачей непосредственное картирование разломов, т.е. выявление их пространственной позиции, установление масштабов проявления, морфологических особенностей, механизмов возникновения и истории формирования. Они основаны на планомерном изучении разноранговых разрывных нарушений и тектонической трещиноватости в естественных/искусственных обнажениях. Реализация этих методов заключается в создании на объекте исследования равномерной сети точек, в каждой из которых выполняется единообразный комплекс тектонофизических и структурно-геологических наблюдений, направленный на сбор информации об основных параметрах тектонической трещиноватости, ее количественных характеристиках, локальных разрывных нарушениях, пликативных дислокациях и др. [Семинский, 1994; Семинский и др., 2005].

Стандартная точка наблюдения при тектонофизических исследованиях представляет собой участок стенки выработки/обнажения размером от 5 до 10 м в горизонтальной и от 5 до 30 м в вертикальной проекциях. После ее пространственной ориентировки и привязки на плане производится полное описание всех встреченных дизъюнктивных элементов. В зависимости от масштабности (ранга) проявления это могут быть трещины, трещинное ДП (в представляемой работе используется термин крупные трещины) и локальные разрывные нарушения (табл. 1).

Таблица 1. Ранговая шкала дизъюнктивных структур (по [Лобацкая, 1987]).

Группа	Уровень	Ранг	Межранговые единицы	Элемент	Средняя длина
Трещинная	Дислокационный	1	1-2	Микротрещина Микротрещинное ДП	До миллиметра Десятки миллиметров
	Трещинный	2		Трещина Трещинное ДП	До десятков метров Сотни метров
Разломная	Локальный	3	2-3	Локальный разлом Локальное ДП	Десятки километров
	Региональный	4	3-4	Региональный разлом Региональное ДП	До сотен километров Сотни километров
	Генеральный	5	4-5	Генеральный разлом Генеральное ДП	До тысяч километров Тысячи километров
	Глобальный	6	5-6	Глобальный разлом Глобальное ДП	До десятков тысяч километров Десятки тысяч километров

Примечание: ДП – деструктивное поле.

Наиболее масштабные нарушения – региональные, генеральные и глобальные разломы, в силу своих масштабных характеристик не выделяются при непосредственных натуральных наблюдениях прямыми геологическими методами, а устанавливаются на этапе анализа фактических данных. Разрывы дислокационного уровня при полевых исследованиях не изучались.

Для каждого из документируемых дизъюнктивных элементов определяется собственный набор параметров. Так для самых мелкомасштабных структур – тектонических трещин прежде всего выделяются их основные системы, т.е. совокупность трещин имеющих общность в пространственном расположении [Рац, Чернышев, 1970]. Устанавливается азимут и угол падения каждой системы, фиксируются особенности взаимоотношений разнонаправленных систем, уделяя особое внимание местам их сочленения. Для отдельных трещин, составляющих определенную систему, по возможности устанавливается генетический тип, состояние поверхности скольжения, измеряется среднее расстояние между разрывами соизмеримой длины.

Помимо перечисленных характеристик для тектонической трещиноватости в каждой точке наблюдения производится измерение ее количественных параметров. К ним относятся параметр плотности (N) и густоты (Γ_i). Первый из них может быть определен при полевых наблюдениях непосредственно на стенке выработки или обнажения, путем подсчета количества трещин попадающих в круг, площадью 1 м^2 . Также данный параметр измеряется в камеральный период, с использованием цифровых фотоизображений исследуемых площадок. Оставшийся параметр, густота трещинной сети или линейная плотность (Γ_i) – расчетный. Он устанавливается отдельно для каждой зафиксированной системы по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{1}{s},$$

где s – среднее расстояние между трещинами в системе.

Важное место при тектонофизических исследованиях занимают массовые замеры трещиноватости. Они проводятся на произвольно выбранных участках, площадью не менее 10 м^2 с хорошо выраженной трещинной сетью. При этом каждый из таких участков должен быть структурно однородным [Невский, 1979]. При выполнении замера устанавливаются элементы залегания трещин, находящихся в пределах документируемой площадки. Количество таких замеров зависит от сложности геологического строения и размера исследуемой области. Оптимальным для статистического анализа количеством является 100 замеров, минимальным – 30 [Гладков и др., 2008]. По возможности для каждой фиксируемой трещины указывается ее генетическая разновидность (скол, отрыв, кливаж). Для трещин, по которым имеются признаки перемещения блоков пород, дополнительно определяются элементы залегания штрихов, борозд, зеркал скольжения, описывается поверхность скольжения (состояние, размеры, морфология, наличие глинки трения и т.д.).

Дизъюнктивы следующего ранга – крупные трещины, значительно реже встречаемые элементы тектонической структуры. Они проявлены в виде единичных протяженных разрывов,

длиной более 5 м и амплитудой смещения до 100 мм. Их документация ведется с указанием элементов залегания и амплитуды смещения. Для открытых трещин измеряется расстояние между контактами (зияние), для залеченных устанавливаются особенности вещественного заполнения. Помимо этого определяется положение крупных трещин по отношению к другим элементам разрывной структуры: секущее, косое, сопряженное.

Локальные разрывные нарушения представляют собой участки горного массива, которые в каждом конкретном случае могут быть выражены зонами повышенной трещиноватости, дробления, брекчирования, милонитизации, тектонического расланцевания. Мощность таких зон колеблется от нескольких см до десяти и более м. Как правило, они отчетливо прослеживаются по стенкам горных выработок. Набор определяемых параметров для локальных разрывов идентичен таковому для крупных трещин, но дополняется данными о типе контактов с вмещающей толщей, видимой мощности, морфологии и внутренней структуре сместителей. При наличии нескольких сближенных сместителей измеряется расстояние между ними.

Помимо разноранговых дизъюнктивных структур описанию подлежат все пликативные формы: складки, линейность, структуры закатывания, будины и др. Определяются элементы залегания, морфология, размеры, взаимоотношение с разрывными нарушениями. Их документация позволяет охарактеризовать общую тектоническую обстановку исследуемого массива и подчеркнуть особенности разломной структуры в пределах конкретной точки наблюдения.

Как было отмечено во вводной части данного раздела, одной из главных задач полевых тектонофизических исследований является определение точной пространственной позиции разрывных нарушений. При этом большинство существующих разломных схем, построенных по результатам картирования, носят плановый характер, т.е. являются двумерными. Это во многом снижает их научную и практическую значимость, поскольку общая разрывная структура и ее отдельные элементы могут значительно изменять свои пространственно-морфологические характеристики с глубиной. Для учета подобных вариаций в представляемой работе применен метод тахеометрической съемки разрывных структур. В качестве инструментальной базы проводимых исследований использовался электронный тахеометр Leica TS 02 plus. Принцип действия данного прибора основан на измерении времени, за которое лазерный луч проходит расстояние от объектива дальномера до отражателя (либо поверхности проецирования при работе в безотражательном режиме) и обратно. Методика проведения съемки достаточно проста и заключается в привязке прибора к реперной сетке объекта исследования (в нашем случае – это карьеры «Нюрбинский» и «Ботубинский») и

последовательной установке отражателя в граничных точках задокументированных разломных зон на разных горизонтах карьеров с фиксированием их координат. По результатам тахеометрических исследований создается база данных, содержащая в цифровом виде сведения о пространственном положении разрывных нарушений в трехмерном пространстве, что в дальнейшем позволяет строить объемные модели разломно-блокового строения, наиболее полно и эффективно отражающие реальную геологическую ситуацию, существующую на исследуемых месторождениях.

Таким образом, применение тектонофизических методов картирования разрывных нарушений позволяет в необходимом объеме получить информацию о пространственном положении, особенностях строения и формирования всего ансамбля разноранговых дизъюнктивов, распространенных в пределах исследуемого объекта. В зависимости от масштаба исследования результатом их применения являются структурные карты, схемы, модели и другие виды графических материалов, используемые при решении, в том числе прогнозных задач.

2.2. Тектонофизические методы реконструкции полей тектонических напряжений

Реконструкция (восстановление) полей напряжений – неотъемлемая часть тектонофизических исследований горного массива. Определение основных направлений сжимающих и растягивающих сил позволяет делать выводы о геодинамических условиях формирования дизъюнктивов, устанавливать этапность и направления подвижек по их отдельным элементам, и, в конечном счете – выяснять генезис всей разломной структуры исследуемого объекта.

Для решения этих задач разработано достаточно большое количество методических приемов, в основе подавляющего числа из которых лежат фундаментальные законы механики и физики твердого тела. Наиболее широко в геологической практике используются метод сопряженных трещин скалывания М.В. Гзовского [Гзовский, 1975] и статистический метод П.Н. Николаева [Николаев, 1992]. Они направлены на выявление из общей массы на первый взгляд хаотично расположенных трещин или их систем, которые образовались в один этап деформации (сопряженные трещины).

Исходными данными для применения метода М.В. Гзовского являются элементы залегания пары сопряженных сколовых трещин, либо максимумов на точечной диаграмме замеров, которые интерпретируются как сопряженные системы. Согласно разработанному графическому методу восстановления полей напряжения ось промежуточных главных

нормальных напряжений (σ_2) совпадает по направлению с линией пересечения сопряженных поверхностей скальвания, ось главного растягивающего напряжения (σ_1) – с направлением биссектрисы тупого угла между трещинами, а ось главного сжимающего напряжения (σ_3) – с направлением биссектрисы острого угла. Стоит оговориться, что приведенные выше закономерности выведены для условий хрупкой деформации. При наличии преимущественно пластической деформации положение осей σ_1 и σ_3 взаимно изменяется, а ось промежуточных напряжений сохраняет свое положение.

О сопряженности трещин согласно [Гзовский, 1975] свидетельствует их слияние, пересечение, сохранение постоянного угла между ними, одновозрастный и аналогичный минеральный заполнитель, разнонаправленные смещения и др. Перечисленные критерии далеко не всегда удается зафиксировать непосредственно на обнажении, что является существенным недостатком данного метода.

Выявленные недостатки были устранены П.Н. Николаевым, который разработал статистический метод выделения сопряженных систем трещин по результатам анализа массовых замеров трещиноватости. Указанным автором установлено, что «... формирование сколовых трещин сопровождается образованием закономерного разброса в их ориентировке» [Николаев, 1977, с. 66]. Анализируя геометрию пространственного положения максимумов на диаграммах массового замера, а также их разбросы, можно с достаточно высокой достоверностью выделять сопряженные системы. При этом о сопряженности трещин говорят следующие признаки: 1) симметричность и противоположная направленность разбросов у максимумов; 2) расположение максимумов примерно на дуге большого круга; 3) угол скальвания между максимумами больше или равен 30° . Дальнейшие построения, необходимые для непосредственного определения направления главных нормальных напряжений, производятся согласно методике М.В. Гзовского.

Помимо охарактеризованных ранее приемов реконструкции полей напряжения в качестве дополнительного часто используется метод анализа поясов трещиноватости (метод В.Н. Даниловича [Данилович, 1961]) и его модернизированные варианты [Семинский и др., 2005]. Пояс трещиноватости – это совокупность плоскостей разрыва, расположенных на дуге большого круга и образующих на структурной диаграмме закономерный рисунок – «шлейф». Анализ взаимного положения максимумов, образующих пояс трещин, позволяет определить линию тектонического движения, морфогенетический тип нарушения, а также восстановить кинематику движения крыльев нарушения. Ось пояса трещиноватости совпадает осью промежуточных главных нормальных напряжений (σ_2), а линия, соединяющая точку пересечения пояса и проекции плоскости разлома с центром диаграммы, является линией

тектонического транспорта [Данилович, 1961]. Сдвиговая кинематика движения по разрывам отражается на диаграммах в виде поясов, расположенных по периферии большого круга. При взбросовых или сбросовых подвижках линия пояса проходит через центр диаграммы. В случае комбинированных смещений (сдвига-сброс, взбросо-сдвиг и т.д.) линия пояса занимает промежуточное положение.

2.3. Методы структурного дешифрирования

Тектонофизические методы, описанные выше, наиболее применимы для картирования разрывной структуры платформенных чехлов на объектах локального и частного уровней – конкретных месторождениях, либо небольших полигонах. Для более масштабных элементов, например кустов кимберлитовых трубок, полей или же целых алмазонасных районов, ввиду их значительных размеров эти методы малопригодны. Здесь основу для получения информации составляют дистанционные методы исследования, к числу которых относится структурное дешифрирование.

Структурное дешифрирование – один из методов изучения структурных особенностей земной коры по её изображению (космоснимок, аэрофотоснимок, топографическая карта), в основу которого положена теоретическая концепция о ландшафтах как динамичных природных системах, в которых отражены изменения, вызванные неотектоническими процессами. Объектом исследования при дешифрировании являются не сами разломные зоны, а линеаменты и мегатрещиноватость. Согласно [Амурский и др., 1988, с. 12], «... линеамент – это прямолинейный элемент (или прямолинейно организованные элементы) ландшафта поверхности Земли, отражающий линейные структуры земной коры ...». Под термином мегатрещиноватость понимается «...совокупность всех линейных элементов рельефа и растительного покрова, отражающих всевозможные дизъюнктивные нарушения» [Гольбрайх и др., 1968, с. 59]. В целом эти два термина имеют близкое значение и подразумевают соответствие разлома или разломной зоны в земной коре прямолинейно организованному элементу в ландшафте.

В качестве исходных данных для структурного дешифрирования используются материалы дистанционных съемок (аэрофотоснимки, космоснимки) либо топографические карты различных масштабов. В представленной работе предпочтение было отдано топографическим картам по ряду причин. Во-первых, топокарты более доступный материал, нежели МДС (материалы дистанционных съемок). Во-вторых, все топографические материалы составляются негеологическими методами с обязательным использованием аэро- и космоснимков, благодаря чему являются более универсальными. В-третьих, топокарты создаются по результатам

проведения кондиционных наземных топографических съемок. Наконец, в-четвертых, топографические материалы выполнены в определенной системе координат и содержат информацию о высотной характеристике рельефа, что позволяет осуществлять точную привязку выделенных линеаментов, а также, по возможности, устанавливать некоторые их параметры.

Масштабность топографических карт, используемых при линеаментном анализе, зависит от масштабных характеристик выделяемых структур. Так для установления линеаментов, отражающих крупные региональные разломные зоны, наиболее применимы мелко-, среднемасштабные карты. На них наиболее четко проявлены контрастные формы рельефа, однако теряются линейные элементы микрорельефа и почвенно-растительного слоя [Амурский и др., 1988]. Для достоверного выделения локальных нарушений используются крупномасштабные топокарты, которые позволяют детализировать структурный план на конкретных участках исследуемой площади.

Дешифрированием распознается большинство пликативных и дизъюнктивных нарушений, которые имеют достаточно четкие ландшафтные индикаторы и размеры, позволяющие опознать их в масштабе исследуемой карты. Помимо этого дешифрирование позволяет установить и некоторые параметры разломов. Прежде всего, это протяженность и азимуты простирания нарушения. В некоторых случаях, используя гипсометрические уровни разделяемых линеаментом поверхностей, можно определить амплитуды вертикальных смещений и элементы залегания сместителя. Также удается выделить сколовую и отрывную природу линеаментов. Первые в большей степени опознаются по прямолинейности геоморфологических элементов, а вторые устанавливаются в местах сильно меандрирующих русел водотоков и по прямолинейным границам озер и болот.

Выделение и интерпретация разрывных нарушений на топокартах происходит с использованием признаков или индикаторов, косвенным образом указывающих на наличие линеаментов на исследуемом участке. Главными из них являются гидрогеологические, геоморфологические, и почвенно-геоботанические [Структурное дешифрирование..., 1981].

Гидрогеологические признаки являются наиболее применимыми при дешифрировании топокарт на закрытых территориях. К их числу относят: участки спрямления русла водотока среди меандрирующей речной магистрали; прямолинейные борта речных долин или отдельных участков берега рек; коленообразные изгибы, крутые повороты долин временных и постоянных водотоков; спрямленные элементы морских и озерных бассейнов; цепочки озер или подземных источников.

Геоморфологические признаки на топокартах – это участки с резко отличными гипсонометрическими отметками. Они представлены: прямолинейными границами возвышенностей и впадин; уступами в рельефе; протяженными понижениями (карстовые воронки, западины, рвы, борозды); цепочками конусов, образованных вулканическими и грязевыми вулканами.

Почвенно-геоботанические индикаторы отражают линейные ограничения растительного покрова и включают: полосы густой растительности в районах со слабым покровом, либо пустынные участки в районах со сплошным покровом; зональность в болотах и луговинах.

Непосредственное дешифрирование сводится к установлению перечисленных выше признаков на топоматериале. Сначала отмечаются непротяженные линеаменты, длиной от 10 до 20 мм. Это, как правило, коленообразные изгибы речной сети, уступы в рельефе и мелкая зональность в ландшафте. Затем отрисовываются более протяженные линеаменты, длиной до 100 мм. Они выражены полосами растительности, спрямленными участками русел водотоков. На мелкомасштабных картах находят отражение и более протяженные структуры, которые представлены цепочками озер, поднятий и впадин, а также системами уступов, вытянутыми в одном направлении. Выделенные прямолинейные отрезки, имеющие близкие азимуты простирания объединяются в линеаментные зоны, подразумевающие наличие в земной коре зон разрывных нарушений. Конечным результатом описанных действий является карта распределения линеаментов, которая позволяет производить тектоническую интерпретацию ландшафтных особенностей исследуемых территорий с установлением их структурного плана.

Выводы по главе 2.

Применение линеаментного анализа значительно уточняет и дополняет сведения о тектоническом строении исследуемых площадей. Совместное использование структурного дешифрирования с геологическими, геофизическими и тектонофизическими методами, позволяет заверять выделенные разрывные структуры, проводить корреляцию полученных сведений между точками наземных наблюдений, а также интерполировать данные на малоизученные территории. Вышеописанный комплекс методов изучения разрывной структуры даст возможность в необходимом объеме осуществить решение поставленных перед данной работой целевых задач в плане выявления особенностей строения разрывной сети как на локальном (конкретное месторождение), так и на региональном (кимберлитовое поле) уровнях.

Глава 3. СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК НАКЫНСКОГО ПОЛЯ

Моделирование месторождений полезных ископаемых в последнее время становится неотъемлемой частью процесса геологического познания. Необходимость в его проведении «... определяется задачами создания обобщенных образов природных объектов для прогноза, поисков и разведки с целью повышения эффективности геологоразведочных работ на всех стадиях геологоразведочного процесса» [Коробейников, 2009, с. 3]. Объект исследования (в нашем случае – коренное месторождение алмазов) является многоуровневой сложно построенной системой, формирование которой в каждом конкретном случае зависит от набора определенных факторов (формационные, структурные, геофизические, геохимические и др.). Моделирование позволяет выделять среди них те, которые можно выявить доступными методами и средствами и тем самым создать информационный образ (модель) природного объекта для проведения геологоразведочных работ.

В настоящее время имеется большое количество работ, характеризующих модельные представления о строении и формировании кимберлитовых трубок для разных регионов мира [Nowicki et al., 2004; Webb et al., 2004; Hetman et al., 2004; Field et al., 2008; Kurszlaukis, Lorenz, 2008; Первов и др., 2011; Костровицкий и др., 2015 и т.д.]. Также разработан ряд обобщающих моделей для кимберлитовых трубок [Hawthorne, 1975; Mitchell, 1986; Харьков и др., 1998]. При этом в подавляющем большинстве из них детально рассмотрены вопросы, касающиеся минералогии, петрографии кимберлитов, распределения различных фаз внедрения, изучения глубинных ксенолитов и в целом они посвящены проблемам вещественного строения трубок. Структурной составляющей, в силу различных причин, уделяется гораздо меньше внимания. Между тем изучение структурных особенностей не менее важно, поскольку именно тектонические нарушения формируют в литосфере первичные каналы проницаемости, которые при наличии благоприятной магматической обстановки обеспечивают возможность внедрения кимберлитовых тел. Отсутствие структурных данных в моделях формирования кимберлитов значительно снижает научную и практическую значимость подобных построений [Гладков и др., 2016].

Базовым понятием структурно-вещественного моделирования является структурно-вещественный комплекс (СВК). Согласно геологическому словарю под СВК понимается «...совокупность сложенных определенными видами осадочных и вулканогенных формаций, возникших в пределах какой-либо территории на одном и том же этапе ее развития и в сходной тектонической обстановке, связанных между собой единством структурного плана и условий

формирования» [Геологический словарь ВСЕГЕИ, 2012]. Применительно к месторождениям алмазов, в СВК системно входят несколько элементов. Во-первых, это осадочные толщи, вмещающие и перекрывающие (для «закрытых» территорий) кимберлитовые тела. Во-вторых, разрывные нарушения, отвечающие за структурный контроль кимберлитового магматизма, морфологию рудных тел, а также распределение различных фаз кимберлита в их пределах. Наконец, в-третьих, магматические комплексы, которые представлены собственно кимберлитовыми телами (трубками, дайками, жилами) и в некоторых случаях пространственно сопряженными с ними до-, син- или пострудными интрузивами. Последние, как правило, выражены базальтоидами, для которых с кимберлитами предполагается генетическая связь [Костровицкий и др., 2015].

Создание наиболее полной и реалистичной структурно-вещественной модели кимберлитового месторождения подразумевает под собой выявление особенностей каждого из представленных элементов СВК и рассмотрение их как производных единой тектоно-магматической системы. Для решения этой задачи в наших исследованиях реализован интегрированный подход, заключающийся в комплексировании методов, направленных на изучение структурной и вещественной составляющих СВК. Структурная составляющая изучалась методами тектонофизики, рассмотренными в главе 2. Вещественная часть разработана на основе известных данных об особенностях строения месторождений [Томшин и др., 1998; Боланев и др., 2000ф; Саблуков и др., 2008; Колганов и др., 2013; Костровицкий и др., 2015; Кошкарев, 2015ф; Гладков и др., 2016; Килижеков, 2017].

3.1. Трубка «Нюрбинская»

Вещественные комплексы, развитые в пределах участка локализации трубки «Нюрбинская» представлены осадочными (вмещающие и перекрывающие) и магматическими образованиями. Вмещают трубку терригенно-карбонатные отложения мархинской E_3mgh и олдондинской $O_{1o1_{1-2}}$ свит позднего кембрия – раннего ордовика. Общая мощность последних в районе трубки составляет не менее 800 метров. С поверхности трубка перекрыта слабосцементированными терригенными образованиями мезо-кайнозойского возраста ($J_{1-2} - Q_4$), мощностью 56-71 м, что позволяет отнести трубку к числу «погребенных» [Харьков и др., 1998; Колганов и др., 2013]. Граница между вмещающими и перекрывающими комплексами проходит на гипсометрическом уровне +180 - +200 абс. м. и выражена слоем дезинтегрированной коры выветривания среднего-позднего триаса (T_{2-3}).

Магматические образования составляют Нижнегерцинский интрузивный мегакомплекс [Матросов, 2006]. В него системно входят две формации: первая – щелочно-ультраосновная,

представлена собственно кимберлитовым телом трубки и вторая, базальт-долеритовая, выраженная парой сближенных даек щелочных базальтоидов Виллойско-Мархинского интрузивного комплекса (рис. 14).

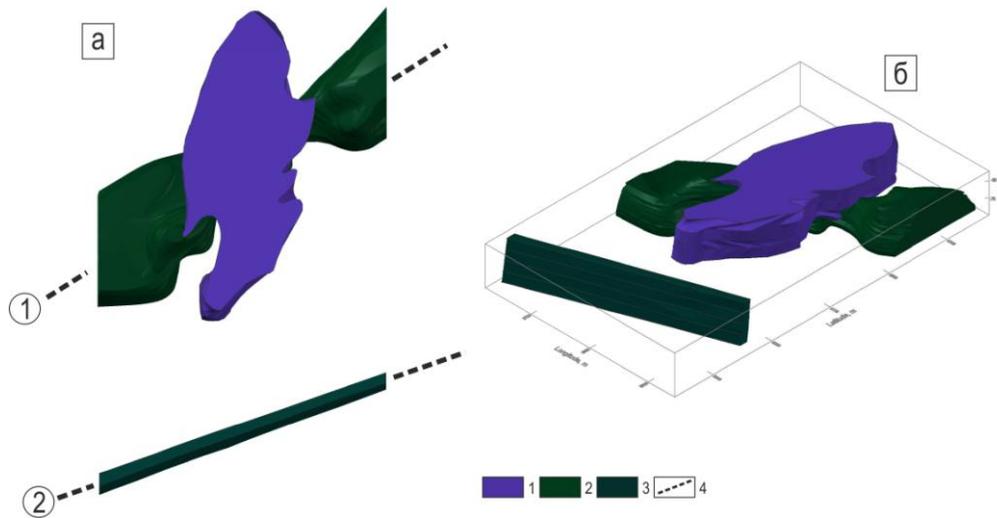


Рисунок 14. Объемная модель магматических комплексов, развитых в пределах участка локализации трубки «Нюрбинская»: а – вид сверху; б – вид с юго-востока. 1 - трубка «Нюрбинская»; 2, 3 - дайки долеритов; 4 – осевые линии разрывных нарушений: 1 – Ботубинский разлом; 2 – Широтный разлом.

Кимберлитовая трубка «Нюрбинская» на уровне палеоэрозионного среза имеет округло-эллипсоидную, фасолеобразную форму, вытянутую в север-северо-восточном направлении по азимуту 14-16°. На более глубоких горизонтах простираение длинной оси трубки изменяется до 7-10°. Погребенная поверхность трубки неровная, вдоль юго-западного контакта наблюдается небольшая выпуклость, а в центральной части – углубление. Средняя отметка кровли рудного тела составляет +188 абс. метров. Контакты с вмещающей толщей четкие, неровные, углы изменяются от 75 до 87°. С отметки +55 абс. метров тело трубки разделяется на две сближенных диатремы, ориентированные в север-северо-восточном направлении.

В вещественном строении трубки «Нюрбинская» выделяют от двух до пяти магматических фаз [Томшин и др., 1998; Bogatkov et al., 2004; Саблуков и др., 2008; Гладков и др., 2016]. Каждая из фаз образует отдельное геологическое тело со своими минеральными, структурными, морфологическими особенностями, что позволяет выделить их в качестве отдельных вещественных комплексов. Они детально будут рассмотрены ниже в специализированном разделе.

Виллойско-Мархинский интрузивный комплекс состоит из двух разобщенных даек щелочных долеритов, одна из которых пространственно сопряжена с телом трубки, а вторая находится в 235 метрах на юго-восток от первой (рис. 14). Кроме указанных некоторыми исследователями выделяются также малые дайковые тела щелочных базитов, распространенные в современном контуре трубки «Нюрбинская» и внедрившиеся по зоне

контакта между кимберлитами и субщелочными долеритами [Tomshin et al., 2015]. Однако прямых геологических свидетельств, позволяющих уверенно выделять упомянутые магматиты в качестве составной части интрузивного комплекса пока недостаточно, в связи с чем в представляемой работе они рассматриваться не будут.

Выявленные тела базитов «слепые», не выходящие на поверхность. Они выполняют центральные зоны крупных разломов, принадлежащих Вилуйско-Мархинской зоне разрывных нарушений (рис. 13). Южная дайка сложена черными сажистыми долеритами скрытокристаллической структуры и массивной текстуры, имеет относительно выдержанные геометрические параметры при средней мощности 5 метров (рис. 15).



Рисунок 15. Выход дайки долерита по Широтному разлому в юго-восточном борту карьера «Нюрбинский» (фото автора).

Она развита на всю мощность вмещающей терригенно-карбонатной толщи палеозойских отложений, с горизонта + 200 абс. метров. Здесь она слагает осевую часть Широтного разлома. В области развития коры выветривания средне-позднетриасового возраста, а также в перекрывающих ранне-среднеюрских отложениях дайка не фиксируется. Отсюда относительный возраст формирования базитов по Широтному разлому – постранинеордовикский-досреднетриасовый. Абсолютных датировок изохронного возраста по рассматриваемой дайке в литературных источниках на сегодняшний момент не обнаружено.

Дайка базитов, внедряющаяся по осевой линии Ботубинского разлома, пространственно сопряжена с телом кимберлитовой трубки, которую с глубины -70 - -80 абс. метров разделяет на два разобщенных рудных тела. Ее мощность на этом гипсометрическом уровне составляет 40-

50 метров, а максимальная мощность дайки по данным геофизических исследований составляет более 250 м. Буровыми работами дайка прослежена на глубину свыше 500 метров. Породы, слагающие тело интрузии, представлены призматически-офитовыми субщелочными долеритами, с включениями лейкократовых кварцевых габбро-долеритов и пород монцититоидного состава [Килижеков, 2017]. Текстура массивная, структура офитовая, реже гипидиоморфнозернистая.

В настоящий момент горными работами в карьере «Нюрбинский» вскрыта верхняя апикальная часть рассматриваемого интрузива, доступная для натурального наблюдения. Видимая часть дайки развита в отложениях второй пачки мархинской свиты позднего кембрия. Здесь она представлена двумя разобщенными апофизами, разделенными областью брекчирования и интенсивной переработки пород (рис. 16).

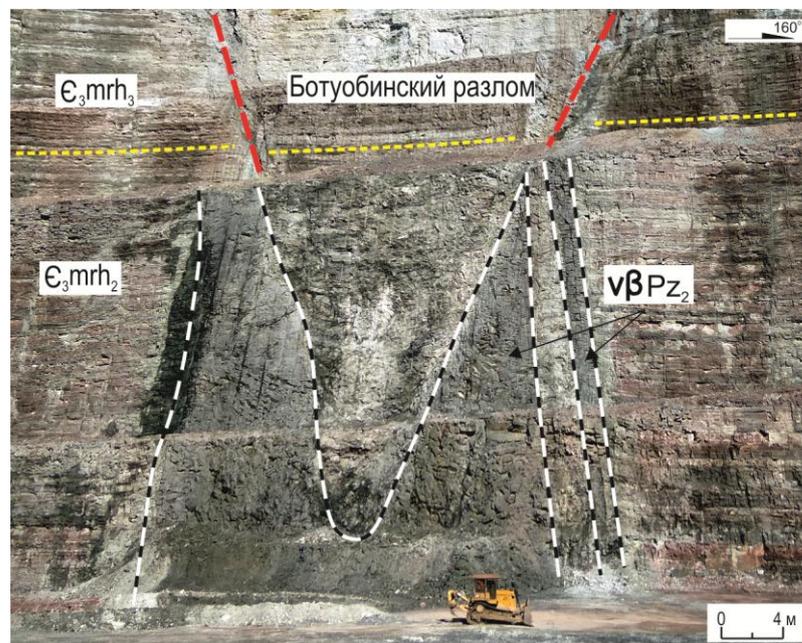


Рисунок 16. Положение дайки долерита по Ботубинскому разлому в восточном борту карьера «Нюрбинский».

Существует мнение, согласно которому выделенные апофизы являются самостоятельными интрузивными телами [Константинов и др., 2017]. Однако с углублением карьера и вскрытием кровельной части интрузии стало очевидно, что корневые части апофизов имеют единое материнское тело. Северный апофиз (слева на рисунке 16) формирует своеобразную «зубчатую» структуру обтекания вокруг килевой части Ботубинского грабена. При этом породы в килевой части грабена представлены сильно измененной карбонатной брекчией на долеритовом цементе, что свидетельствует об интенсивном дроблении вмещающих пород и их частичной ассимиляции в период внедрения интрузии. Южный апофиз (справа на рисунке 16) представлен дайкообразным телом, мощностью 3 метра. Между ним и

южной границей северного апофиза наблюдается зона брекчирования, мощностью 5 метров, аналогичная наблюдаемой в килевой части грабена.

Морфология рассматриваемой дайки значительно более сложная по сравнению с дайкой, развитой по Широтному разлому. В ее структуре имеется большое количество раздувов, пережимов, областей резких градиентов мощности. Они наиболее хорошо выражены на трехмерной модели апикальной части дайки, построенной по результатам эксплуатационного бурения (рис. 17).

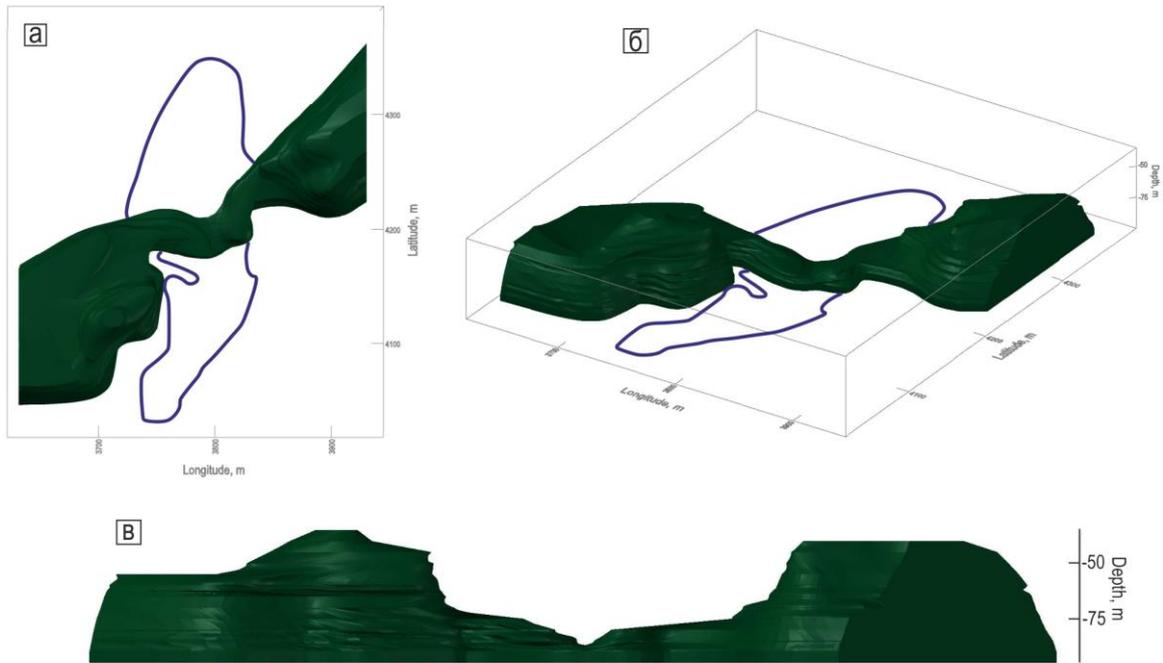


Рисунок 17. Объемная модель апикальной части дайки долеритов по Ботуобинскому разлому. а – вид сверху; б – вид с юго-востока; в – продольный вид на дайку с юго-востока. Сплошной фиолетовой линией показан контур трубки «Нюрбинская» на горизонте -95 абс. метров.

Как видно из представленной модели, максимальные изменения морфологических параметров дайки наблюдаются в зоне контакта с кимберлитовым телом. В этой области мощность дайки значительно уменьшается, а кровля испытывает погружение в сторону осевой линии кимберлитового тела, образуя своеобразную седловидную структуру. При этом следует отметить, что полного разрыва сплошности тела базитов не наблюдается. Минимальная мощность дайки, зафиксированная на горизонте – 90 абс. метров составляет 30-35 метров. По обе стороны от контакта, кровля базитов воздымается до отметок -30 абс. метров на юго-западном фланге и до -40 абс. метров на северо-восточном. Выклинивание дайки постепенное, контакты с вмещающей толщей изменяются в широких пределах, от пологих (50-55°) до субвертикальных (80-85°).

Представленная выше информация кратко характеризует вещественные комплексы, распространенные в пределах участка локализации кимберлитовой трубки «Нюрбинская».

Установлены их пространственно-морфологические параметры, особенности внутреннего строения. Однако вопрос пространственных и возрастных взаимоотношений базитов и кимберлитов до сих пор остается весьма дискуссионным. Особенно остро стоит проблема выявления последовательности формирования пространственно сопряженных трубки «Нюрбинская» и дайки по Ботубинскому разлому. В литературе встречаются два взаимоисключающих мнения по данной проблеме. Согласно первому внедрение дайки долеритов произошло в уже сформированную диатрему трубки. Об этом свидетельствуют признаки высокотемпературной переработки кимберлитов в зоне контакта с дайкой, а также данные об отсутствии ксенолитов долеритов в пределах современного контура трубки [Харькив и др., 1998; Саблуков и др., 2008; Киселев, 2008, Киселев и др., 2014 и др.]. Сторонники второй точки зрения придерживаются мнения о первичности формирования дайки долеритов и внедрения кимберлитов по уже проработанному каналу, заполненному базитовой магмой [Томшин и др., 2004; Константинов и др., 2017]. В качестве доказательной базы ими приводятся результаты геохимических, петро- и палеомагнитных исследований базитов и кимберлитов, а также результаты изотопного датирования. В целом, результаты многочисленных радиологических исследований, которые, логично предположить, должны быть одним из наиболее объективных методов при решении существующей проблемы, не позволяют однозначно судить о порядке формирования магматитов (табл. 2).

Таблица 2. Возраст кимберлитов и долеритов трубки «Нюрбинская».

Возраст, млн. лет	Метод	Литературный источник
Кимберлиты трубки «Нюрбинская»		
364,5 ± 5	U-Pb	[Agashev et al., 2001; Агашев и др., 2004]
332	Ar-Ar	[Томшин и др., 2004]
332	Rb-Sr	[Agashev et al., 1998]
449	Rb-Sr	[Земнухов и др., 2005]
369-389	Ar-Ar	
399,6	Rb-Sr	[Саблуков и др., 2008]
Долериты по Ботубинскому разлому		
349-386	K-Ar	[Томшин и др., 2004]
366-386	Ar-Ar	
387	Rb-Sr	
376-377	Sm-Nd	
328,4	K-Ar	[Саблуков и др., 2008]
374,4 ± 3,5	Ar-Ar	[Киселев и др., 2014]

Это вызвано в первую очередь большим разбросом в геохронологических определениях. Для трубки «Нюрбинская» возрастной диапазон ее формирования оценен в интервале от 332 до 449 млн. лет, для базитов – от 328,4 до 386 млн. лет. Преобладающие датировки свидетельствуют о близком возрасте формирования кимберлитов и долеритов, однако

последовательность их внедрения остается не ясной. Одной из главных причин существующих различий в определении абсолютного изохронного возраста кимберлитов трубки «Нюрбинская» и долеритов Ботубинского разлома можно считать их многофазность [Харькив и др., 1998; Костровицкий и др., 2015; Киселев и др., 2014]. В условиях последовательного внедрения нескольких порций магматического расплава на контакте разных фаз происходили процессы ассимиляции, дезинтеграции, «магматического отжига», что могло привести к изменению их изотопных систем [Василенко и др., 2000].

Сложившаяся неопределенная ситуация в плане последовательности внедрения базитов и кимберлитов была разрешена в 2017 году, когда сначала буровыми, а затем и горными работами в карьере «Нюрбинский» была вскрыта зона контакта кимберлитовой трубки и сопряженной с ней долеритовой интрузии. Она представляет собой область развития гибридных долерит-кимберлитовых пород, которые распространены в седловидной части дайки в виде объемного тела, средней мощностью около 10 метров (рис. 18, в).

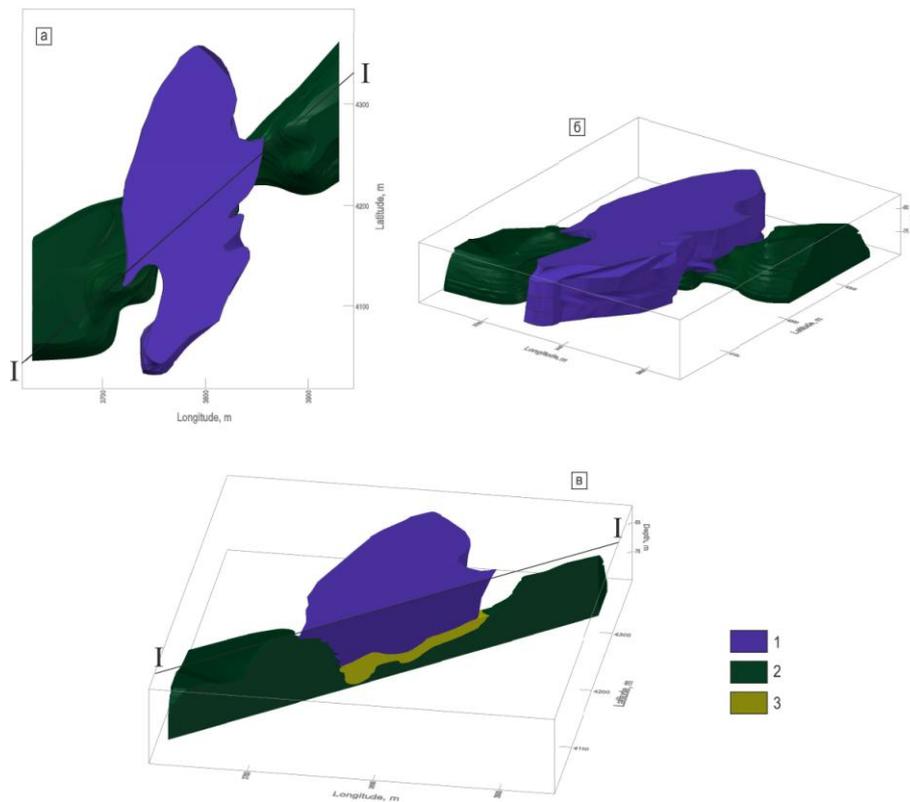


Рисунок 18. Объемная модель, отражающая пространственное положение кимберлитовой трубки «Нюрбинская» и сопряженной с ней дайки долеритов. а – вид сверху; б – вид с юго-востока; в – разрез по линии I-I. 1 – трубка «Нюрбинская»; 2 – дайка долеритов по Ботубинскому разлому; 3 – область развития гибридных долерит-кимберлитовых пород.

Его морфология достаточно сложная, с характерными раздувами и пережимами, приуроченными к наиболее и наименее нарушенным частям дайки. Нижняя граница прослеживается достаточно четко, верхняя проведена условно. Сложено тело базальтовой

брекчией с кимберлитовым цементом. Размеры обломков долеритов различные, от нескольких сантиметров, до первых метров. Выделенная область брекчирования является горизонтальной границей, отделяющей дайку долерита от кимберлитовой трубки. Выше этой границы ксенолитов траппов, а также малых даек и апофизов долеритов в пределах современного контура трубки не обнаружено.

В целом, приведенные данные позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, дайка базитов была сформирована раньше, чем кимберлитовая трубка. Об этом свидетельствует само наличие выявленной области брекчирования, где в качестве цемента выступает кимберлит. Отсутствие в пределах кимберлитовой трубки ксенолитов траппов может быть объяснено полным выносом последних на дневную поверхность при взрывном внедрении разных порций кимберлитового расплава с последующей их эрозией. Также, подобная ситуация могла возникнуть в результате «обтекания» кимберлитов геологических границ дайки. Доказательством этого может быть отсутствие рвущего контакта между долеритами и кимберлитами. Во-вторых, внедрение кимберлитового тела происходило в уже полностью консолидированные базиты. На это опять же указывает выделенная область брекчирования долерита, наличие которой свидетельствует о преимущественно хрупких деформациях, происходящих при внедрении кимберлита, что характерно для твердого тела. Это, в свою очередь, свидетельствует о том, что между внедрением базитов и кимберлитов существовал временной промежуток, достаточный для застывания вещества дайки. Учитывая большую протяженность дайки, а также ее интрузивный характер (отсутствие выходов на дневную поверхность) можно предположить, что период консолидации базальтов составлял примерно 6 млн. лет, что соответствует времени полного застывания малых гипабиссальных интрузий [Масуренков, 1979].

Что касается дайки долеритов, развитой по Широтному разлому и пространственно не связанной с кимберлитовым телом, то ее возрастная позиция пока не установлена. В работе [Константинов и др., 2017] приведены данные, характеризующие геохимические и палеомагнитные свойства даек по Ботубинскому и Широтному разломам (рис. 19).

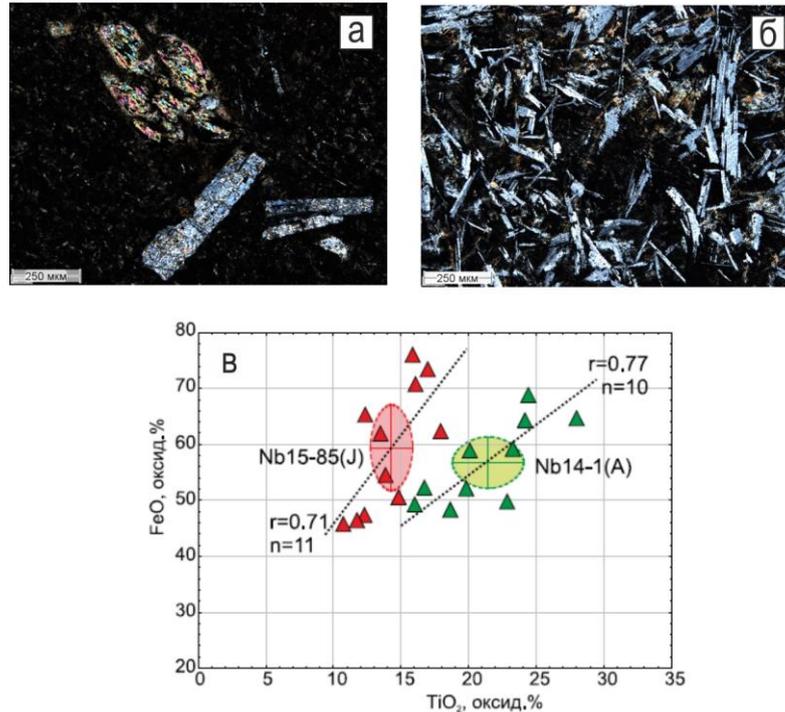


Рисунок 19. Результаты геохимических исследований долеритов по [Константинов и др., 2017]. Микрофотографии в скрещенных николях образцов долеритов, из дайки по Ботубинскому грабену (а) и дайки по Широтному разлому (б); в – график распределения FeO/TiO₂ в титаномагнетитах из долеритов дайки по Ботубинскому грабену и дайки по Широтному разлому.

Сравнительный анализ этих данных показал, что долериты изученных интрузивов имеют близкое среднее содержание оксидов титана и железа, схожие параметры термомагнитограмм, показатели остаточной намагниченности и в целом разделяются весьма условно. Это наводит на мысль об их близком, возможно единовременном формировании. В своих исследованиях мы попытались решить эту проблему с использованием приемов тектонофизического анализа (см. раздел 3.1.2.3). Согласно полученным данным, дайка долеритов по Широтному разлому по времени внедрения соответствует этапу формирования кимберлитовой трубки.

Таким образом, общая последовательность формирования вещественных комплексов в пределах рассматриваемого участка с разделением на дорудный, рудный (внедрение кимберлита) и пострудный этапы может быть представлена в следующем виде. На первом дорудном этапе, в период с позднего кембрия до раннего ордовика, в условиях изменяющейся глубины бассейна осадконакопления от мелководной шельфовой зоны до глубоководной морской, происходило накопление терригенно-карбонатной толщи, вмещающей кимберлитовую трубку. На втором дорудном этапе по зоне Ботубинского разлома произошло внедрение дайки субщелочных долеритов. Наличие зоны брекчирования в апикальной части дайки свидетельствует о полной консолидации пород до начала рудного этапа. Следующий собственно рудный этап ознаменовался внедрением кимберлитового тела трубки

«Нюрбинская». Его внедрение привело к частичному разрушению приконтактной зоны с дайкой по Ботуобинскому разлому, о чем свидетельствует значительное сокращение мощности дайки, а также наличие области брекчирования. В период застывания вещества трубки по Широкому разлому внедрилась интрузия долеритов, которая имеет близкие минералогическо-петрографические, геохимические, палеомагнитные параметры с дайкой по Ботуобинскому разлому. В пределах заключительного пострудного этапа, который привел к формированию комплекса перекрывающих трубку отложений, можно выделить два подэтапа. На первом, продолжавшемся с силура по триас, рассматриваемый участок находился в зоне регрессии моря, с чем связано образование коры выветривания средне-позднетриасового возраста, а также мезозойских россыпей алмаза ближнего сноса [Килижеков, 2017]. На втором подэтапе (ранняя юра – голоцен) произошло накопление толщи терригенных и элювиально-делювиальных отложений.

3.1.1. Особенности вещественного строения трубки «Нюрбинская»

Выявление особенностей вещественного строения трубки «Нюрбинская» осуществлялось с использованием результатов изучения минералогическо-петрографических свойств трубки, выполненных Д.А. Кошкарёвым с коллегами и отраженными в работе [Гладков и др., 2016], а также нескольких производственных отчетах. В исследованиях цитируемых авторов распределение различных магматических фаз кимберлитов в объеме трубки устанавливалось методом прямого минералогическо-петрографического картирования и на основе изучения kernового материала разведочных скважин. По результатам исследований на погоризонтных планах выделены границы распространения генераций кимберлита, слагающих трубку «Нюрбинская». Эти данные стали фактологической основой для разработки объемных моделей вещественных комплексов, представленных в диссертационной работе. Их построение осуществлялось с использованием возможностей трехмерного моделирования, реализованного в программном комплексе AutoCAD.

Представления о вещественном составе трубки «Нюрбинская» основываются на многочисленных эксплуатационных и тематических исследованиях, проводимых на месторождении с начальных этапов его промышленной отработки. В ряде опубликованных работ трубка «Нюрбинская» рассматривается как двухфазное кимберлитовое тело [Томшин и др., 1998; Корнилова и др., 2001; Bogatkov et al., 2004], в других работах заключается более сложное строение трубки и выделяют до пяти магматических фаз [Саблуков и др., 2008; Sablukov et al., 2010]. Согласно последним исследованиям выделены четыре магматических фазы кимберлитов, отличающихся между собой петрографо-минералогическими

особенностями, а также промышленным содержанием ситовых классов алмаза [Гладков и др., 2016]. При этом первые три фазы в результате процессов, сопровождающих внедрение порций расплава, большей частью разрушены и в нынешнем состоянии представляют разрозненные фрагменты различных по размеру и форме тел. Границами между ними служат мощные переходные зоны, состоящие из обломков и автолитов ранних генераций кимберлита, а также ксенолитов вмещающих пород.

Первая магматическая фаза, сложенная слюдистыми порфиrowыми кимберлитами (ПК), практически полностью ассимилирована последующими порциями расплава. Единственными сохранившимися до настоящего времени элементами данной фазы внедрения являются дайковые тела порфиrowых кимберлитов, обнаруженные в зоне экзоконтакта по северному и южному замыканиям трубки (рис. 20, а). Последние имеют север-северо-восточную ориентировку и прослежены скважинами на расстояние 40-120 метров от контактов трубки [Колганов и др., 2013; Килижеков, 2017].

Первичная форма залегания порфиrowых кимберлитов, существовавшая на момент их внедрения, установлена путем определения распространенности обломков и автолитов первой фазы в областях развития более поздних генераций кимберлита. Выявлено, что рассматриваемая разновидность кимберлита образует в пределах современного контура рудного тела шлейф обломков и автолитов, вытянутый в субмеридиональном направлении и коррелирующийся с положением упомянутых ранее даек. В центральной его части наблюдается изометричная область скопления обломочного материала, которая, по всей видимости, отвечает штокообразному телу. Выделенные элементы первой фазы внедрения сохраняют свои морфологические параметры на всех документируемых горизонтах. Отмечается лишь незначительное уменьшение мощности дайковой составляющей по мере движения к нижним частям разреза.

Анализ особенности распределения обломков и автолитов первой магматической фазы, а также пространственного положения сохранившихся даек ПК позволил восстановить границы первой фазы кимберлита на момент внедрения и построить ее трехмерную модель (рис. 20, б). Согласно представленной картине на первом магматическом этапе было сформировано сложное сдвоенное тело, морфология которого определялась сочетанием дорудной дайки север-северо-восточного направления и кратерной постройки. Следует оговориться, что в полученной модели длины зафиксированных даек порфиrowых кимберлитов ограничены контуром карьера «Нюрбинский» для соблюдения пропорций изображения.

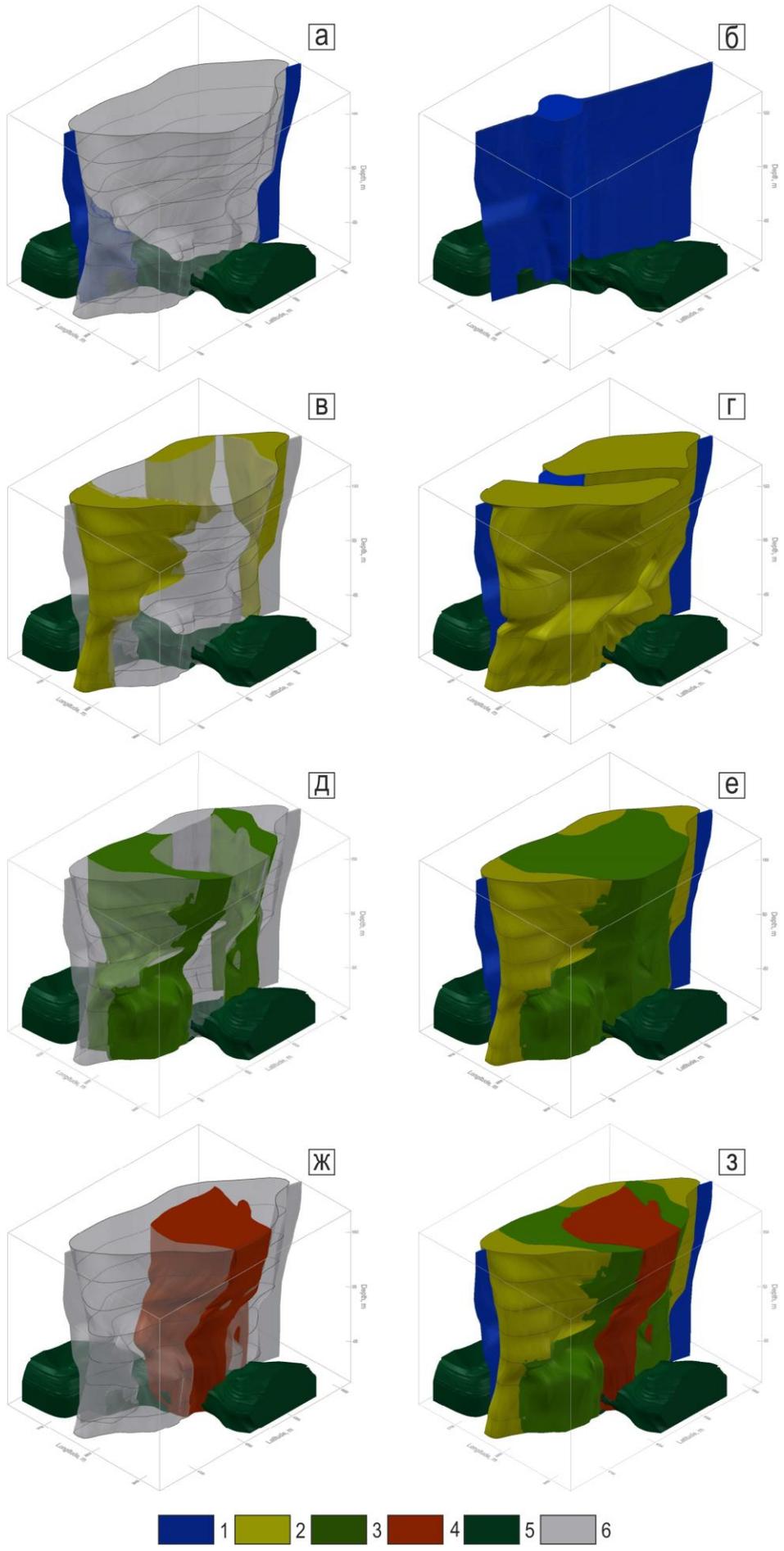


Рисунок 20. Объемные модели вещественных комплексов, слагающих трубку «Нюрбинская». 1 – порфиновый кимберлит первой фазы; 2 – эруптивная кимберлитовая брекчия второй фазы; 3 – автолитовая кимберлитовая брекчия третьей фазы; 4 – автолитовая кимберлитовая брекчия четвертой фазы, обогащенная коровыми и мантийными включениями; 5 – дайка долеритов по Ботуобинскому разлому; 6 – современный контур трубки. Вид на модели с юго-востока.

Конфигурация выделенных элементов модели первой фазы внедрения на трубке «Нюрбинская» в значительной степени повторяет граничные контуры рудного тела трубки «Комсомольская» (рис. 21). Не принимая во внимание различия в вещественном составе и количестве этапов внедрения, а руководствуясь лишь визуальной схожестью формы проявления рассматриваемых объектов, можно констатировать сам факт возможности образования структуры подобной морфологии. Это, в отсутствие прямых признаков, указывающих на пространственное положение ранних фаз кимберлита в трубке «Нюрбинская», свидетельствует о правильности производимых построений.

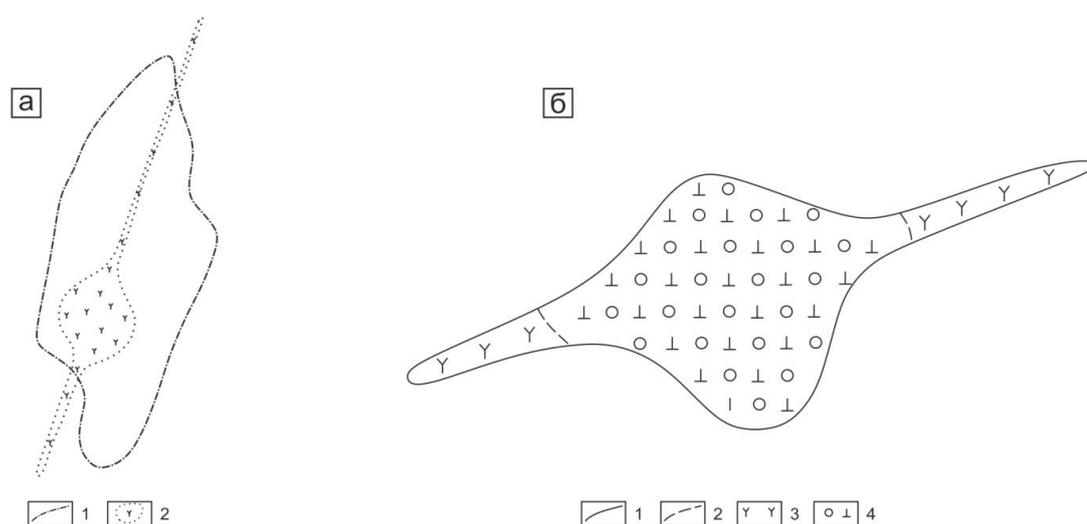


Рисунок 21. Сравнительная схема морфологии первой фазы кимберлитов трубки «Нюрбинская» и двух фаз трубки Комсомольская.

а) Реконструированный план фазы порфировых кимберлитов в трубке «Нюрбинская». 1 – контур рудного тела на гор. +70 абс. м; 2 – контур первой фазы кимберлита на гор. +70 абс. м.

б) План кимберлитовой трубки «Комсомольская». По материалам Амакинской геологоразведочной экспедиции и НИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» (ПАО). 1 – контур рудного тела; 2 – границы между разновидностями кимберлитов; 3 – порфировые кимберлиты первой фазы внедрения; 4 – автолитовые кимберлиты второй фазы внедрения.

Вторая магматическая фаза, представленная эруптивной кимберлитовой брекчией (ЭКБ), состоит на 40-60% из ксенолитов осадочных пород и на 20% из обломков порфировых кимберлитов. Фрагменты тел кимберлитовой брекчии в своем коренном залегании сохранились лишь в приконтактных частях трубки на юго-восточном и северо-западном флангах, а также в апофизе, где они формируют всю его верхнюю часть (рис. 20, в).

Морфологические параметры, кимберлитов второй фазы, существовавшие в момент их внедрения, установлены по «теневым» контактовым зонам, оконтуривающим участки с повышенным содержанием ксенолитов осадочных пород и обломков кимберлитовых брекчий. Согласно нашим представлениям, на втором магматическом этапе были сформированы два довольно крупных разобщенных тела, вытянутых в северо-восточном направлении и располагавшихся в северо-западной и юго-восточной частях современного контура трубки (рис. 20, г). Их внедрение привело к частичному разрушению дайкового и штокверкового тел первой фазы, что находит отражение в присутствии достаточно большого количества обломков порфировых кимберлитов, в пределах областей развития второй магматической фазы. Временной интервал между внедрением первых двух фаз кимберлита был достаточным для практически полной консолидации тела ПК, о чем свидетельствует высокое содержание ксенолитов порфировых кимберлитов в пределах сохранившихся тел эруптивной кимберлитовой брекчий второй фазы.

Породы третьей магматической фазы представлены автолитовой кимберлитовой брекчий (АКБ), в составе которой отмечаются обломки порфировых кимберлитов, осадочных пород и, реже, ксенолиты образований фундамента – гранулитов, кристаллических сланцев, гнейсов. Кимберлиты третьей фазы внедрения слагают юго-восточный и северный рудные столбы, а также центральную и нижнюю части апофиза (рис. 20, д). В приконтактных частях с кимберлитами второй фазы и вмещающими породами, АКБ насыщаются обломочным материалом (до 60 % их объема).

Установленные границы распространения пород третьей магматической фазы в пределах современного контура трубки, а также результаты изучения вариаций содержания и размеров обломков АКБ в более поздних генерациях кимберлита, позволили наметить контуры и определить морфологические особенности первичной формы залегания автолитовых кимберлитов, что отражено в ее объемной модели (рис. 20, е). По конфигурации это вытянутое в субмеридиональном направлении тело, занимавшее на момент внедрения большую часть предельного контура трубки. Протрузивное внедрение третьей порции кимберлитового расплава обусловило окончательное разрушение первичного тела порфировых кимберлитов, а также частичную дезинтеграцию АКБ второй фазы.

Завершающая четвертая фаза внедрения также сложена автолитовой кимберлитовой брекчий, которая отличается от АКБ третьей фазы аномальным содержанием мантийных и коровых включений (до 20-25% от общего объема). АКБ четвертой фазы образуют центральный рудный столб, представляющий собой неправильное по форме тело, с множеством

раздувов и пережимов (рис. 20 ж, з). Оно было инъецировано в центральную часть тела АКБ третьей фазы, частично дезинтегрируя породы последней.

Между выделенными геологическими телами различных магматических фаз отсутствуют инъекционные контакты, а наблюдаются постепенные переходы с образованием зон смешанных гибридных пород. Их формирование может быть вызвано внедрением более поздних порций кимберлита в еще не полностью консолидированный расплав предшествующих фаз. Также подобные типы контактов возникают благодаря высокому интрузирующему потенциалу и высокой проникающей способности отдельных фаз, что особенно характерно для автолитсодержащих разновидностей [Костровицкий и др., 2015].

По результатам анализа известных данных о минералого-петрографических особенностях и специфике алмазности различных генераций кимберлита разработана объемная модель вещественных комплексов трубки «Нюрбинская». Построенная на цифровой основе данная модель отражает наиболее реальную пространственную форму выделенных комплексов, для которых установлены специфические морфологические особенности, продиктованные тектоническими условиями и последовательностью внедрения.

Совместное использование полученной информации с данными о тектонической позиции месторождения и полях тектонических напряжений, позволит выявить основные черты структурно-вещественной организации рудоносной системы и определить этапность проявления процессов тектоно-магматической активизации, приведшей к формированию кимберлитовой трубки.

3.1.2. Особенности проявления и распределения разрывных нарушений

За период изучения тектонической структуры в карьерном поле трубки «Нюрбинская» автором и его предшественниками создана сеть точек тектонофизических и геолого-структурных наблюдений, которая на момент написания данной работы составляла 852 точки. Пользуясь методикой, приведенной в главе 2, нами было задокументировано более 5500 тектонических трещин, около 800 малых разломных зон и 3 разлома более высокого ранга: Ботубинский, Диагональный, Широтный. Эти данные послужили основой для построения модели разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Нюрбинская». Более подробно результаты изучения разрывной структуры приведены в последующих разделах.

3.1.2.1. Разломные зоны

Разломные зоны – наиболее крупные структурные формы, зафиксированные в бортах карьера «Нюрбинский». Проведенные исследования откосов бортов карьера показали, что

принципиальную роль в строении разломной сети играют субвертикальные (углы падения более 60°) и субгоризонтальные (углы падения менее 30°) разрывные нарушения. Эти дизъюнктивы определяют делимость горного массива и выступают вертикальными и горизонтальными границами отдельных блоков. Наклонные нарушения характеризуются значительно меньшей масштабностью и распространенностью проявлений.

Субвертикальные разрывные нарушения. Субвертикальные нарушения, как наиболее представительный класс разрывов, зафиксированы по всей площади карьерного поля. Большая часть из них формирует внутреннюю структуру трех крупных нарушений регионального плана – Ботубинского, Диагонального и Широкого разломов. Это находит отражение как на розе-диаграмме простираний, так и падений (рис. 22). На первой отчетливо проявлен максимум северо-восточной – юго-западной ориентировок (азимут простирания $30-90^\circ$ - $210-270^\circ$), включающий 66% от всего количества замеров зон нарушений. На розе-диаграмме падений субвертикальных зон наблюдается два преимущественных направления: северо-западное и юго-восточное (рис. 22, б). Они отражают положение основных сместителей крупных северо-восточных разломов.

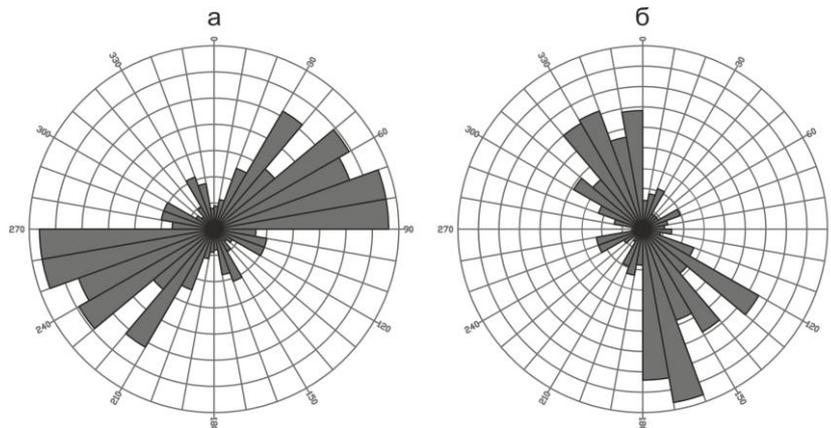


Рисунок 22. Розы-диаграммы простираний (а) и падений (б) субвертикальных зон разрывных нарушений, зафиксированных в карьере «Нюрбинский» (567 замеров). Окно осреднения 10° .

Перечисленные разрывы образуют разломный узел, являющийся кимберлитоконтролирующим для трубки «Нюрбинская» [Гладков и др., 2016]. Поэтому их морфология и внутренняя структура были детально изучены с помощью прямых геолого-структурных наблюдений.

В бортах карьера нарушения выделяются достаточно четко. Как правило они выражены зонами повышенной трещиноватости, дробления, брекчирования, рассланцевания, милонитизации различной мощности, от первых десятков сантиметров до 30-40 метров (рис. 23).

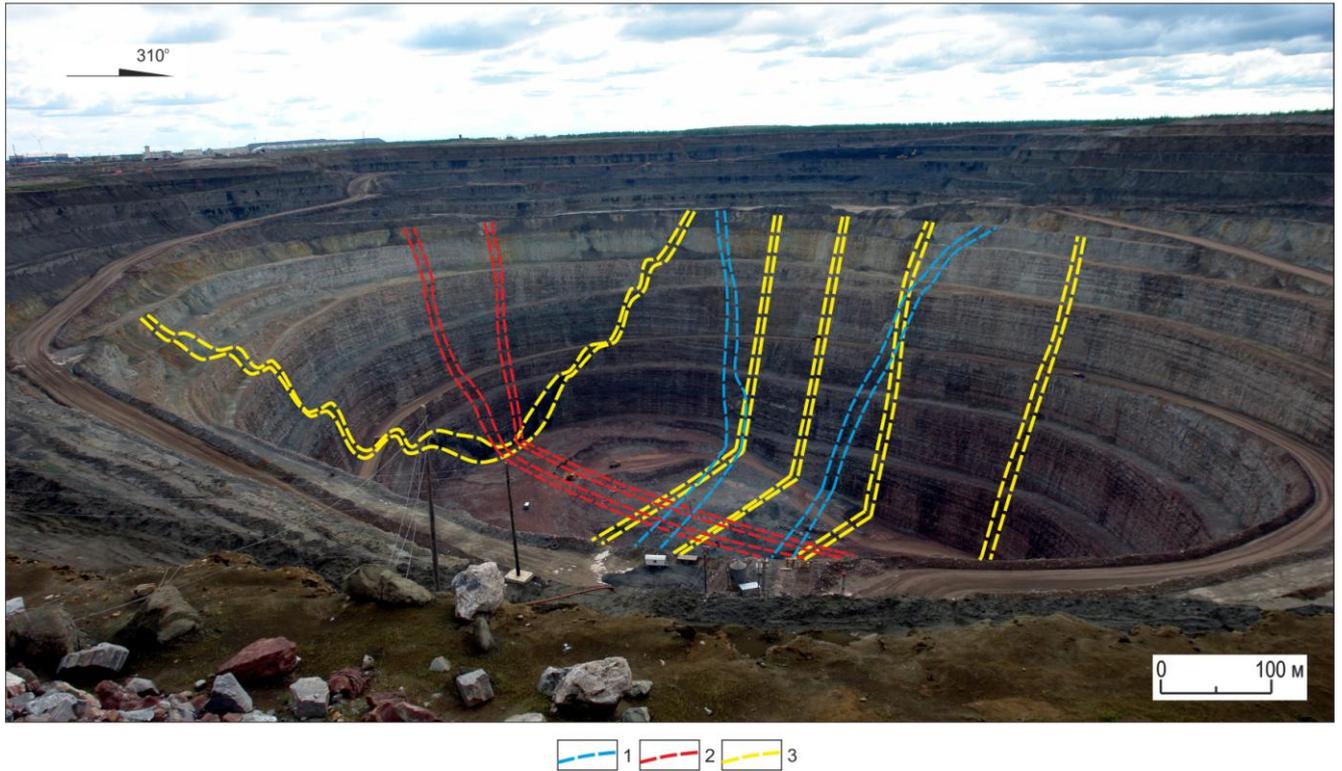


Рисунок 23. Схема расположения выходов разломных зон в бортах карьера «Нюрбинский» (фото автора). 1 – Ботуобинский разлом; 2 – Диагональный разлом; 3 – Широтный разлом.

Ботуобинский разлом в карьере «Нюрбинский» изучен на всю глубину палеозойских отложений, с горизонта + 150 до горизонта -55 абс. м (рис. 24). В рыхлых и слабосцементированных образованиях мезозоя точные контуры разлома не установлены. Здесь его положение фиксируется либо по вывалам в бортах карьера, либо по наличию складкоподобных структур.

На изученном участке Ботуобинский разлом представляет собой типичный грабен, ограниченный с северо-запада и юго-востока сместителями со встречными азимутами падения (145° и 325° соответственно). Расстояние между крыльями на горизонте + 130 абс. м. составляет порядка 140 м, на уровне -55 абс. м. сокращается до 74 м. Северо-западное крыло представлено зоной повышенной трещиноватости и дробления, с углами падения от $72-86^\circ$ и мощностью 7-10 м, однако имеются места пережимов, где мощность уменьшается до 2 м и места раздувов, с мощностью зоны до 25-30 метров. Юго-восточный сместитель имеет схожие параметры, углы падения колеблются в пределах $70-83^\circ$, а мощность изменяется от 8 до 15 м. Внутреннее строение грабена осложнено наличием большого количества локальных зон дробления и перетирания, а также протяженных сколовых трещин. Наибольшая из зон зафиксирована в промежутке от 150 до 60 абс. м. Она субпараллельна юго-восточной дислокации грабена, ее мощность достигает 5 м (рис. 24). Помимо разрывов внутри грабена отмечаются участки

крупноглыбовых брекчий, милонитов, катаклазитов, свидетельствующие об интенсивных тектонических процессах, происходивших в пределах разлома при его формировании.

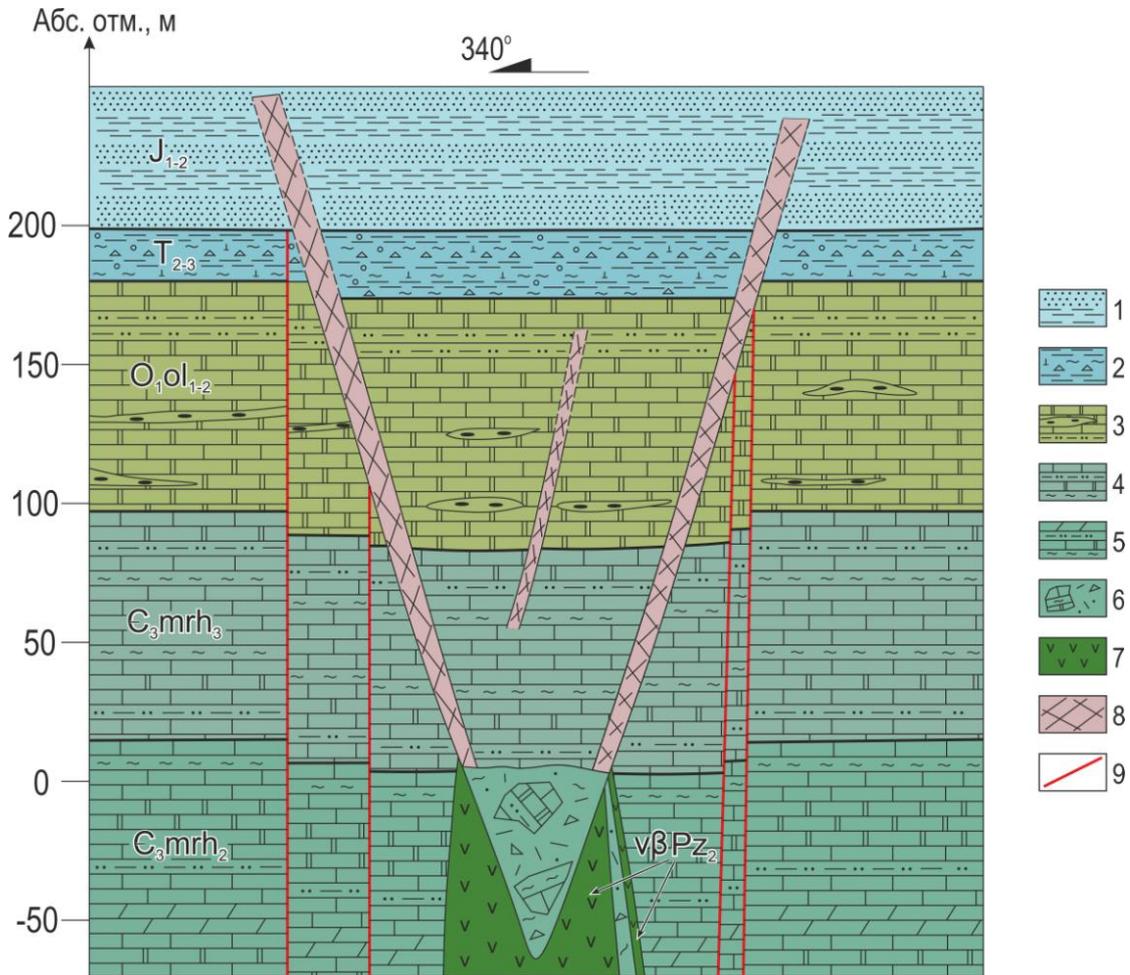


Рисунок 24. Схема строения Ботубинского грабена. Масштабы горизонтальный и вертикальный 1:2000. 1-перекрывающая толща: преимущественно алевролиты, аргиллиты, песчаники; 2 – базальный горизонт стратиграфического несогласия: карбонатные глины с включениями кимберлитов, доломитов; 3 – Олдондинская свита: доломиты, аргиллиты, известняки, алевролиты; 4 – Мархинская свита, третья пачка: доломитистые алевролиты, известняки, мергели; 5 – Мархинская свита, вторая пачка: оолитовые известняки, алевролиты, аргиллиты, мергели; 6 – область брекчирования и интенсивного изменения пород в килевой части грабена; 7 – палеозойская интрузия долеритов; 8 – крупные разломные зоны; 9 – разломные зоны.

Начиная с отметки +10 абс. м и до подошвы карьера прослежены три крупных апофиза мощной дайки базальтоидов, выполняющей центральную часть Ботубинского разлома. В пределах этой дайки дислокации грабена сопрягаются и по отдельности далее не прослеживаются. По всей видимости, глубже Ботубинский разлом представлен единым сместителем, а грабен-структура, наблюдаемая в области развития палеозойских отложений, образовалась в условиях пониженного литостатического давления и является поверхностным отражением сдвиговых перемещений блоков, разделяемых сместителем разлома.

Также отмечается несколько достаточно крупных субвертикальных разломных зон, расположенных по обе стороны от крыльев грабена. Они представлены преимущественно единичными крупными сколовыми трещинами, по которым наблюдается смещение слоев в вертикальной проекции. Амплитуда смещений небольшая, достигает первых метров. Общая накопленная амплитуда смещения всей грабен-структуры, с учетом описанных, составляет 7,4 м по западному и 8,3 м по восточному борту.

Широтный разлом представлен несколькими сближенными дислокациями, выходы которых наблюдаются в южной, центральной и северной частях карьера «Нюрбинский». Северный сместитель, зафиксированный на небольшом удалении от северо-западного крыла Ботубинской структуры, характеризуется наличием крупной субвертикальной сколовой зоны, имеющей небольшую мощность (около 2 метров) и выдержанное падение (азимут 160°). Центральный сместитель состоит из серии субпараллельных зон повышенной трещиноватости и брекчирования с азимутами простирания $60-65^\circ$, углы падения изменяются в пределах от 83 до 86° , средняя видимая мощность 2-3 метра (рис. 25, а). Фрагментарно, по центральному сместителю наблюдается зона крупноглыбовых брекчий, мощностью около 10 м. Южный сместитель представляет собой широкую зону повышенной трещиноватости мощностью до 47 метров в юго-западных и около 18 метров в юго-восточных откосах карьера, вблизи южного окончания трубки (рис. 25, б). Осевая часть разлома выполнена дайкой долерита черного сажистого цвета, массивной текстуры и скрытокристаллической структуры мощностью порядка 4-5 метров. По дайке зафиксирована зона дробления и брекчирования мощностью около 5 м. Элементы залегания разломной зоны по мере движения с запада на восток плавно изменяются со $160-165/80-84$ до $170-175/85$.

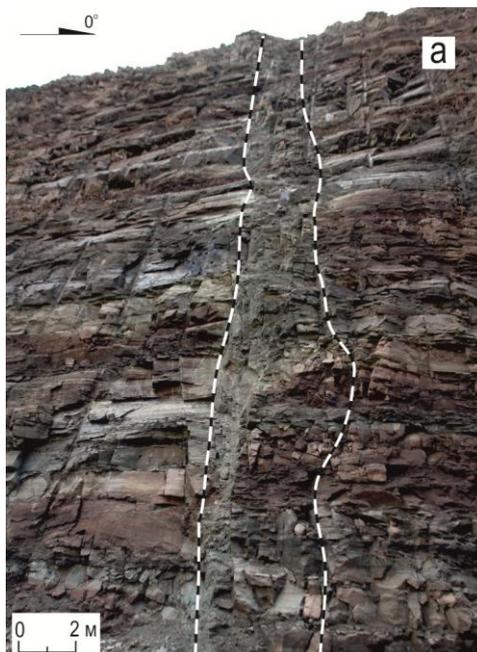


Рисунок 25. Выходы нарушений Широтного разлома в бортах карьера «Нюрбинский» (фото автора). а – зона повышенной трещиноватости и дробления по центральному сместителю, горизонт + 100 абс. м.; б – зона дробления по осевой линии южного сместителя, горизонт + 55 абс. м.

Диагональный разлом менее контрастно проявлен в бортах карьера. Его выходы наблюдаются на северо-восточном и юго-западном флангах месторождения, в виде пары сближенных сместителей, каждый из которых представлен зоной повышенной трещиноватости с элементами дробления и перетирания горных пород. Северное нарушение имеет среднюю мощность 4 м со значительным ее увеличением (до 15 м) в юго-западном борту карьера (рис. 26, а). Углы падения варьируют от 85 до 88°. Для южного нарушения характерна более выдержанная мощность, равная 3-5 метрам и углы падения от 85 до 87° (рис. 26, б). В трещинах южного сместителя диагонального разлома зафиксирована серия кимберлитовых даек мощностью от 0,1 до 0,5 м.

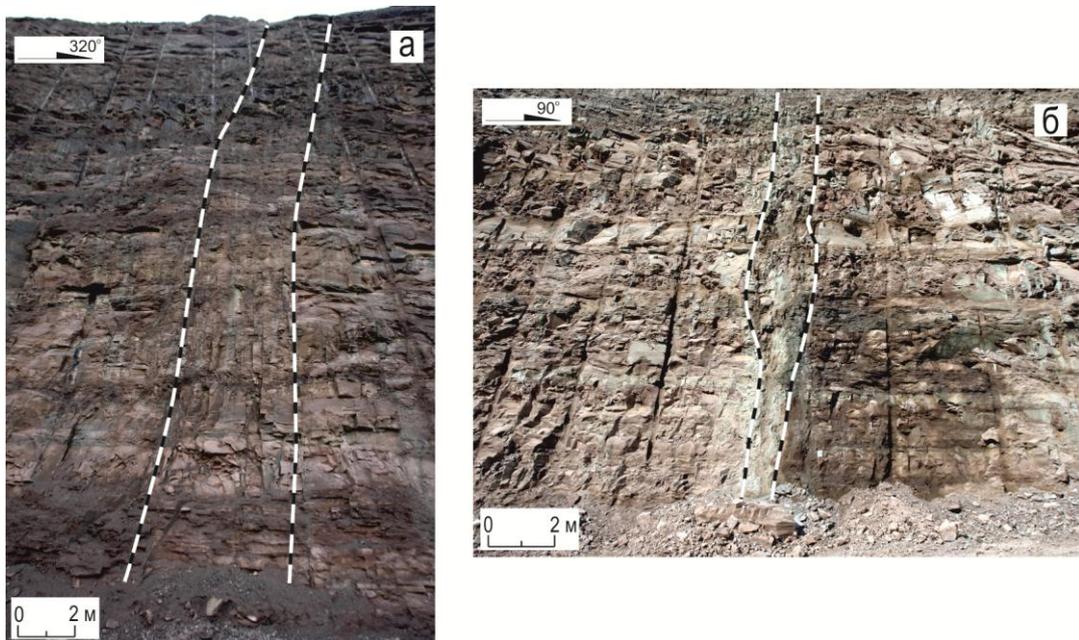


Рисунок 26. Выходы нарушений Диагонального разлома в бортах карьера «Нюрбинский» (фото А.С. Гладкова). а – зона повышенной трещиноватости по северному сместителю, горизонт - 10 абс. м.; б – зона повышенной трещиноватости и перетирания по южному сместителю, горизонт - 10 абс. м.

Субгоризонтальные разрывные нарушения. Субгоризонтальные разрывные нарушения в пределах карьерного поля пользуются меньшей распространенностью, чем субвертикальные и представлены преимущественно зонами дробления и трещиноватости, а также локальными зонами послойного срыва. Первые из них, как правило, приурочены к толщам глинистых алевролитов, которые в виде небольших по мощности прослоев развиты в основной массе плотных песчано-карбонатных отложений. Одна из таких зон зафиксирована в северном и северо-восточному бортах карьера на гипсометрическом уровне + 205 абс. м. По внешнему

виду она представляет собой послойную зону дробления мощностью около 2 метров, которая плавно погружается на северо-восток под углом 5-8° (рис. 27).

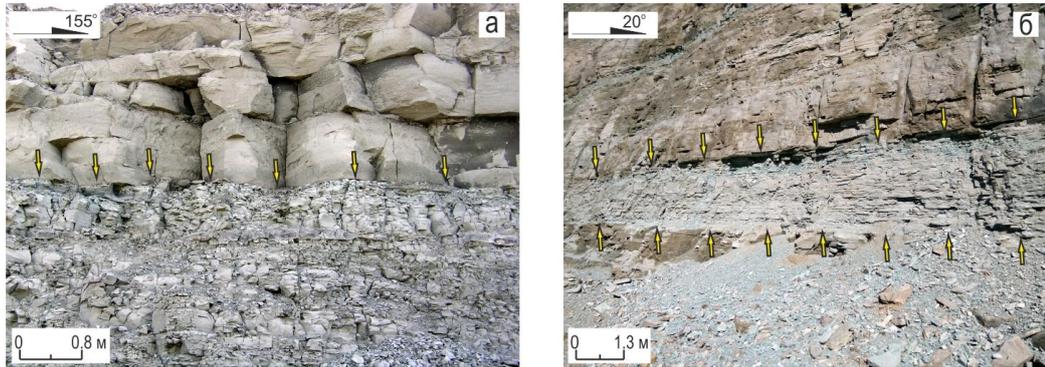


Рисунок 27. Зона послойного дробления в северо-восточном (а) и северном (б) бортах карьера «Нюрбинский» (фото А.С. Гладкова).

Зоны послойного срыва наблюдаются в основном в приповерхностных горизонтах и приурочены к участкам с литологической неоднородностью толщ, где некомпетентные (пластичные) отложения играют роль «смазки». Подвижки по таким зонам зафиксированы по смещениям колонн скважин (рис. 28, а), либо по смещениям субвертикальных зон или систем трещин (рис. 28, б). Направление смещения, как правило, северное или юго-восточное, амплитуды составляют первые десятки сантиметров.

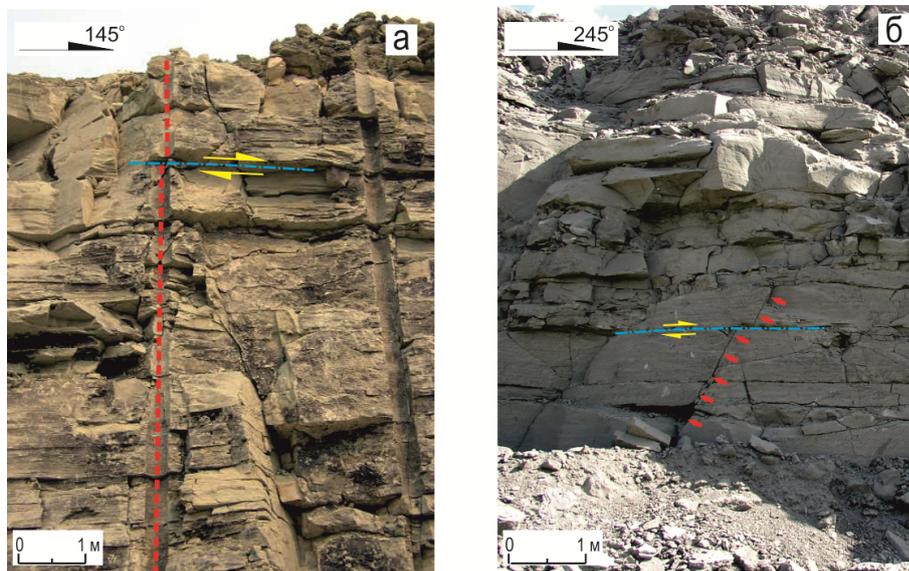


Рисунок 28. Сдвижения по субгоризонтальным зонам на верхних горизонтах карьера «Нюрбинский» (фото А.С. Гладкова).

Особенности распределения в пространстве субгоризонтальных зон разрывных нарушений приведены на рисунке 29, где каждая зафиксированная зона представлена в виде трехмерного диска. Его ориентировка указывает на простираание зоны, наклон – на падение, а ширина пропорциональна мощности.

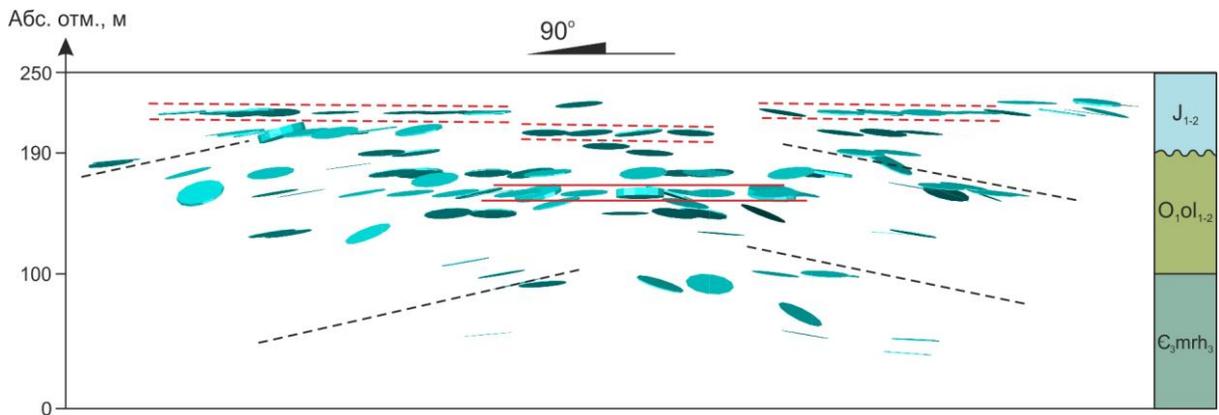


Рисунок 29. Схема распределения субгоризонтальных зон разрывных нарушений, зафиксированных в точках наблюдения на горизонтах карьера «Нюрбинский». Вид с севера.

Проанализировав пространственное положение субгоризонтальных разрывов была отмечена следующая закономерность. Для послойных зон, расположенных в перекрывающей мезо-кайнозойской толще, характерна общая выдержанность углов падения, которые отличны от нуля не более чем на $2-5^\circ$. Местами они образуют единые плоскости, которые можно аппроксимировать с разломными зонами (красные пунктирные линии на рис. 29). В результате проведения взрывных и доставочных работ по этим зонам происходят сдвиги достаточно крупных блоков горной массы. Что касается вмещающих отложений, то здесь наблюдается несколько иная картина. Углы падения субгоризонтальных нарушений уменьшаются по мере движения от периферийной части к центральной (место внедрения трубки). Такое выполаживание зон, по всей видимости, связано с внедрением кимберлитового тела, при котором происходило воздымание приконтактной толщи, а вместе с ней и послойных зон. Непосредственно над трубкой зафиксирована серия пологих зон (угол $0-3^\circ$), принадлежащих единому сместителю (красные сплошные линии на рис. 29).

Таким образом, наиболее масштабные дизъюнктивные элементы, развитые в пределах изучаемого участка, представлены субвертикальными и субгоризонтальными разрывными нарушениями. Первые образуют кимберлитоконтролирующий разломный узел, включающий три крупных структуры: Диагональный, Ботубинский и Широтный разломы. Последние проявлены локально, преимущественно в приповерхностных горизонтах в виде зон дробления и послойного срыва.

3.1.2.2. Тектоническая трещиноватость

Руководствуясь принципами, изложенными в [Семинский, 1994], большое внимание при проведении полевых работ было обращено на изучение параметров тектонической трещиноватости, как наиболее универсальной тектонической единицы, характеризующей особенности разломно-блоковой структуры.

Являясь повсеместно распространенной, тектоническая трещиноватость при изучении разрывной структуры земной коры имеет значительные преимущества в сравнении с нарушениями других категорий. Как составной элемент более крупных структурных форм – разломных зон и локальных разрывов, трещиноватость и образованные ею системы определенных направлений могут указывать на их наличие в исследуемом массиве [Серебряков и др., 2016]. Параметрические показатели трещиноватости, такие как плотность трещин (Γ_i) и плотность трещин (N) позволяют проводить анализ систем трещин и выделять среди них самые многочисленные, которые, согласно [Шерман, Днепровский, 1989], субпараллельны простиранию магистрального сместителя.

Изучение распределения основных систем тектонической трещиноватости, развитых в пределах карьерного поля, проводилось путем построения роз-диаграмм и схем распределения показателя густоты трещин (Γ_i). Проанализировав пространственную ориентировку систем трещин установлено, что наиболее интенсивно проявлены системы северо-восточного (азимут $20 - 90^\circ$), север-северо-западного (азимут $330 - 350^\circ$) и северо-западного (азимут $290 - 310^\circ$) простираний (рис. 30, а). Остальные направления максимумов на розе-диаграмме проявлены менее четко, что не позволяет однозначно выделить их в отдельные системы.

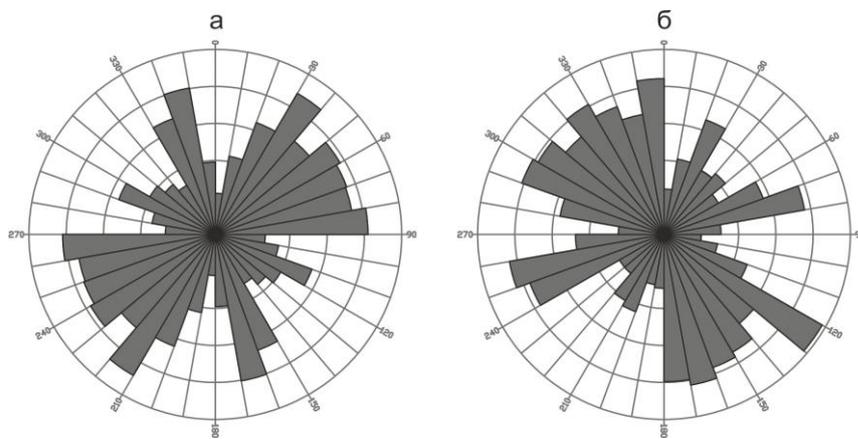


Рисунок 30. Розы-диаграммы простираний и падений основных систем трещин, зафиксированных в карьере «Нюрбинский» (1307 замеров). а – роза-диаграмма простираний систем трещин; б – роза-диаграмма падений систем трещин. Окно осреднения 10° .

Для систем северо-восточного направления установлено падение как на северо-запад, так и на северо-восток (рис. 30, б). Разрывы север-северо-западной ориентировки преимущественно падают на запад-юго-запад, однако имеется несколько максимумов восток-северо-восточной направленности. Такая же ситуация наблюдается и для систем северо-западного простирания, здесь преимущественное направление падения северо-восточное, а северо-западное в подчиненном значении. В целом максимумы на розах-диаграммах подчеркивают существование в исследуемой области более масштабных структур соответствующих

направлений. Для выявления их пространственной позиции нами построена трехмерная схема распределения показателя (Γ_i), которая представлена на рисунке 31. Здесь каждая зафиксированная система трещин представлена в виде диска, ориентировка которого указывает на простирание системы, наклон – на падение, а ширина пропорциональна значению показателя линейной плотности.

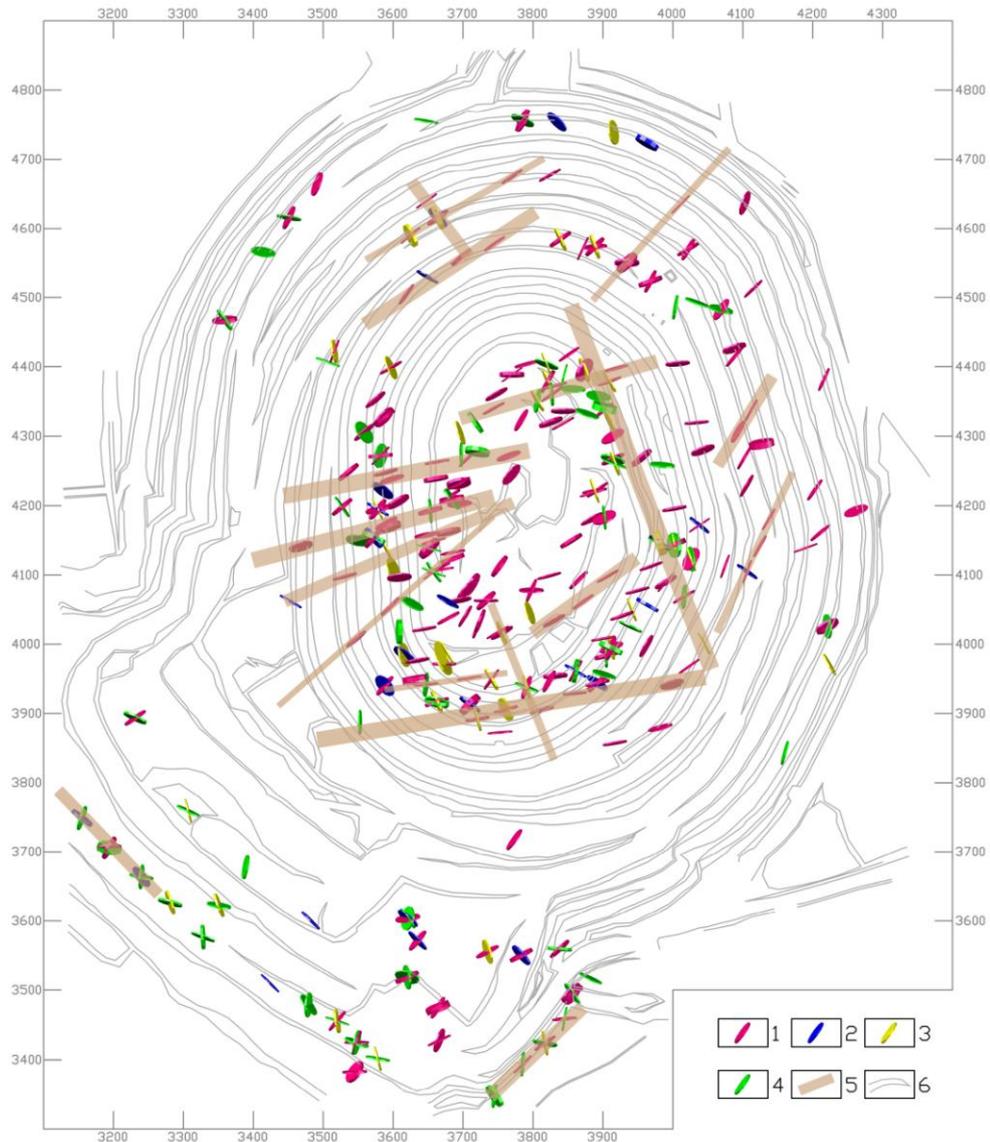


Рисунок 31. Трехмерная схема распределения основных систем трещин, зафиксированных в точках наблюдения на различных горизонтах карьера «Нюрбинский». Ширина дисков пропорциональна показателю Γ_i в масштабе схемы. 1 – системы трещин северо-восточной ориентировки; 2 – системы трещин северо-западной ориентировки; 3 – системы трещин север-северо-западной ориентировки; 4 – системы трещин остальных направлений; 5 - предполагаемые области влияния разломов; 6 - контур карьера «Нюрбинский».

Приведенная схема дает представление о площадном распространении и интенсивности проявления основных систем трещин. Она основана на выборке, включающей данные о пространственном положении зафиксированных систем, их элементах залегания, а также о самих значениях показателей Γ_i отдельно для каждой системы. Отметим, что анализировались

только максимальные и вторые по величине значения параметра густоты, а заведомо низкие ($\Gamma_i < 2$ тр/пог. м.) и высокие ($\Gamma_i > 10$ тр/пог. м.) значения параметра из выборки были исключены. Это позволило убрать из итоговой схемы точки с заниженными и завышенными показателями, а также уменьшить общий уровень «шума».

Ввиду большого количества единовременно анализируемых систем полученная схема довольно сложна для восприятия. Однако если рассматривать каждое направление отдельно, то появляется возможность выделять диски, имеющие близкие элементы залегания и лежащие в одной плоскости. Эти плоскости отражают наиболее нарушенные линейные зоны, которые, как уже отмечалось субпараллельны сместителю (рис. 31). Выделив их, мы тем самым наметили предполагаемые плоскости разрывных нарушений.

Следующим количественным параметром тектонической трещиноватости, изученным в ходе данной работы был параметр плотности трещин (N), т.е. количества трещин приходящихся на единицу площади. Он характеризует общую нарушенность породного массива элементами тектоники. Поскольку параметр был достаточно детально изучен как по латерали, так и на глубину, для визуализации данных о его распределении была построена трехмерная модель в программе RockWorks 2002 при помощи алгоритма Directional Weighting (рис. 32).

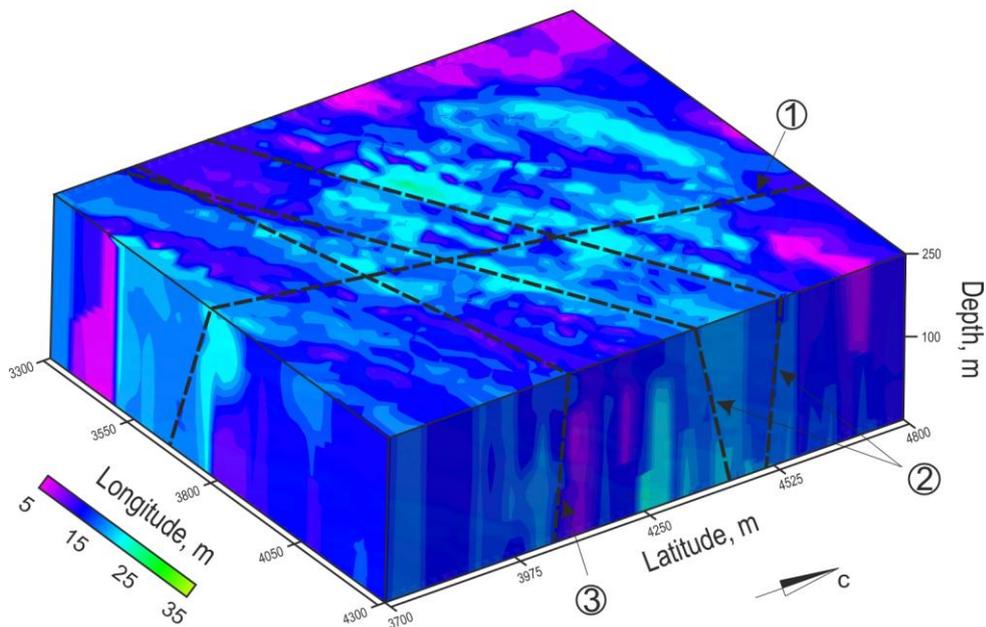


Рисунок 32. Трехмерная модель распределения параметра плотности трещин (N) (вид с юго-востока). Черными пунктирными линиями показаны осевые плоскости разломов: 1- Диагональный; 2 – Ботубинский (две дислокации); 3 - Широтный.

На модели отчетливо проявлены несколько линейных аномалий плотности северо-восточной ориентировки. Глубинность проявления этих максимумов ограничена верхней и нижней кромками модели (от 250 до -50 абс. м), что свидетельствует о наличии структурных

элементов данного направления по всей глубине изучаемого объема. Максимумы остальных направлений менее проявлены.

Добавив на модель осевые плоскости кимберлитоконтролирующих разломов, выделенных прямыми наблюдениями, установлено, что их пространственная позиция достаточно хорошо коррелируются с положением линейных максимумов (рис. 32). Дислокации Ботубинского грабена лежат в пределах аномалий северо-восточного направления, южный сместитель Широкого разлома частично проходит по восток-северо-восточному максимуму. Что касается Диагонального разлома, то его элементы слабо проявлены на модели. Наблюдается лишь незначительная вытянутость изолиний в север-северо-восточном направлении. Однако это объясняется строением зоны Диагонального разлома, для которой характерно незначительное увеличение общей нарушенности внутри зоны по сравнению с окружающей толщей. Проведенный анализ модели распределения плотности трещин свидетельствует о его достаточно высокой разрешающей способности и, следовательно, выделяемые на модели линейные аномалии можно считать зонами влияния разлома.

В целом перечисленные особенности распределения тектонической трещиноватости свидетельствуют о наличии в исследуемом массиве разрывных структур преимущественно северо-восточного, северо-западного и север-северо-западного направления, что подтверждает результаты прямых геолого-структурных наблюдений.

3.1.2.3. Реконструкция полей тектонических напряжений

Согласно многочисленным исследованиям определяющее значение в контроле кимберлитового магматизма на территории Накынского кимберлитового поля имеют сдвиговые структуры [Божевольный и др., 1998; Игнатов, Штейн, 1997; Игнатов и др., 2008]. Рудоконтролирующая роль сдвигов доказывается как по результатам изучения микросмещений в околотрубочном пространстве, так и по результатам комплексных тектонофизических исследований. Последние показали, что формирование трубки «Нюрбинская» происходило при преобладающей роли полей сдвигового типа в течение четырех этапов, главными из которых являлись северо-восточное сжатие при северо-западном растяжении и северо-западное сжатие при северо-восточном растяжении [Гладков и др., 2016]. Их выделение осуществлялось по результатам анализа следов перемещения блоков пород, разграниченных разрывными структурами (зеркала скольжения, борозды), а также по результатам анализа единичных массовых замеров трещиноватости. Для дополнения/уточнения существующих представлений о распределении полей тектонических напряжений и выявления особенности их проявления в разных вещественных комплексах, нами в пределах карьера «Нюрбинский» создана сеть точек

наблюдения, в которых был выполнен массовый замер тектонических трещин (рис. 33). Точки располагаются в области развития перекрывающих (3 замера) и вмещающих отложений (10 замеров на разных гипсометрических уровнях), в дайке по Ботубинскому разлому (1 замер) и дайке по Широтному разлому (1 замер). В пределах трубки, а также отложений коры выветривания замеры не выполнялись по техническим причинам.

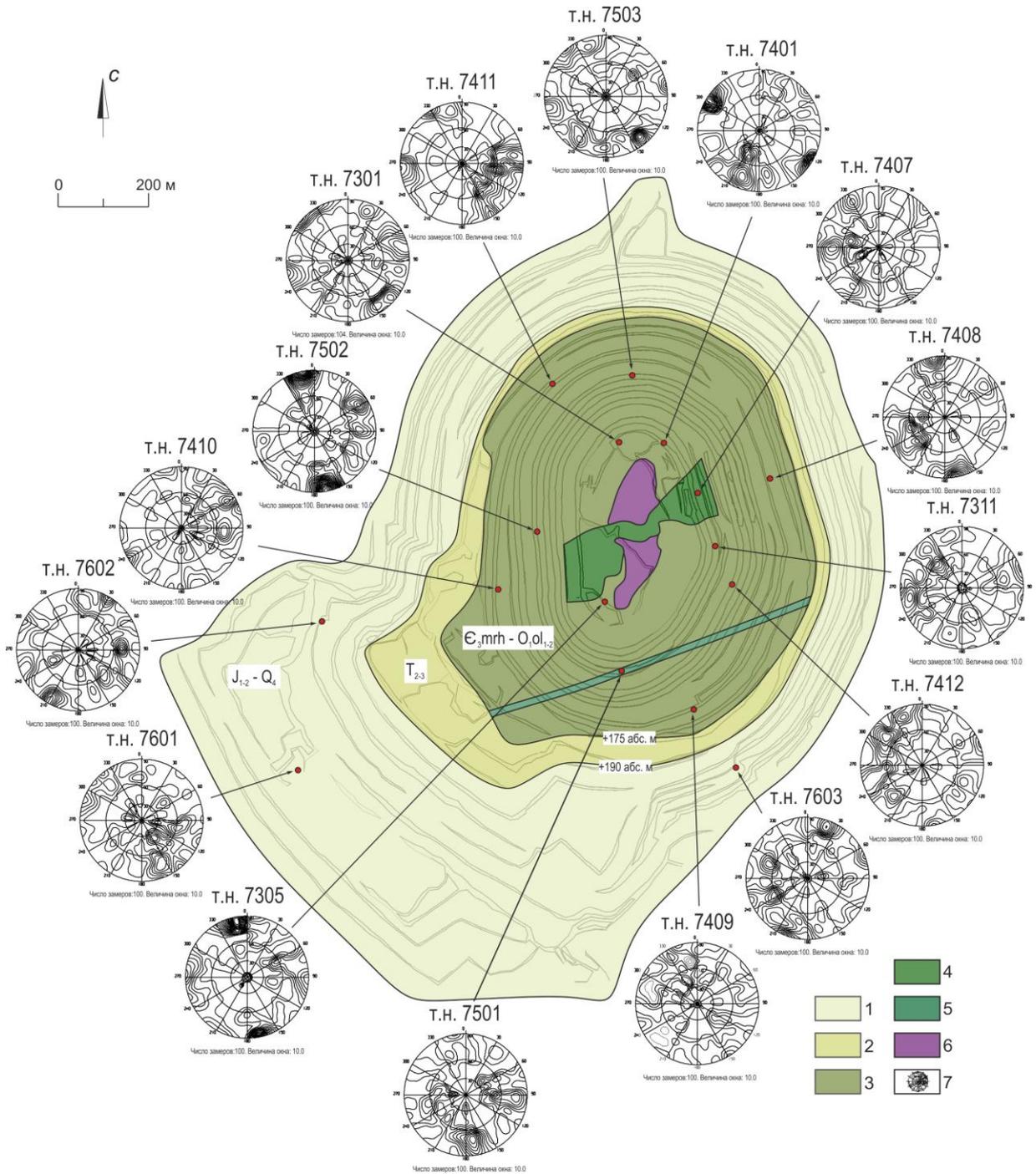


Рисунок 33. Положение точек наблюдения с массовым замером тектонической трещиноватости в пределах карьера «Нюрбинский». 1 – перекрывающие отложения; 2 – кора выветривания; 3 – вмещающие отложения; 4 – дайка долеритов по Ботубинскому разлому; 5 – дайка долеритов по Широтному разлому; 6 – трубка

«Нюрбинская»; 7 – точка наблюдения с массовым замером трещиноватости и ее номер. Контур магматических образований приведены по горизонту -95 абс. м.

Построение диаграмм трещиноватости осуществлялось автоматизировано, с использованием возможностей программы Structure, которая является оригинальной разработкой лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. С ее помощью для каждой точки наблюдения отстроены круговые диаграммы (рис. 33), на которых в виде максимумов сгущения изолиний выделены основные системы трещин, образующие разрывную сеть. Для выделенных максимумов определены основные геометрические параметры, такие как координаты – азимут и угол падения системы, а также плотность – количество трещин, входящих в систему.

Распределение максимумов в пределах полученных диаграмм свидетельствует о наличии в изучаемом горном массиве сетей трещин двух основных геометрических видов: системная (равноугольная) и хаотичная (ассиметричная) [Чернышев, 1983]. Для первой характерно наличие обособленных максимумов с высокой плотностью, упорядоченно расположенных в пространстве (например, диаграммы в точках 7401, 7502, 7408 и др. на рис. 33). Хаотичная сеть трещин на диаграммах выражена в виде множества разноориентированных максимумов небольшой плотности (например, диаграммы в точках 7409, 7603, 7410 и др. на рис. 33). Ее формирование происходит при наложении нескольких более простых трещинных сетей в условиях изменяющегося напряженного состояния [Чернышев, 1983]. Наличие на большей части диаграмм признаков хаотичной сети указывает на существование нескольких этапов эволюции разрывов, отличающихся главенствующим полем напряжения. Для выявления последовательности и особенностей проявления полей тектонических напряжений, проведен анализ полученных диаграмм с применением известных методических приемов реконструкции полей напряжения, охарактеризованных в главе 2.2.

Выделение сопряженных систем трещин производилось по методике, изложенной в [Николаев, 1977]. Из общего числа максимумов на диаграмме подбирались такие, которые имеют противоположный разброс и угол скалывания больший 30° . На каждой диаграмме были выделены от одной до четырех сопряженных систем трещин. Затем, используя геометрический метод Гзовского [Гзовский, 1975], были восстановлены поля тектонических напряжений, существовавшие в момент формирования трещиноватости в рассматриваемых комплексах (табл. 3). Эффективность применения подобного комплекса методов показана на примере Мало-Ботуобинского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей ЯАП [Гладков и др., 2008].

Таблица 3. Результаты реконструкции полей тектонических напряжений.

№ т.н.	Сопряженные системы				Угол между системами	Метод выделения	Оси главных нормальных напряжений						Тип поля
	аз. пад.	угол	аз. пад.	угол			σ_1		σ_2		σ_3		
							аз. скл.	угол	аз. скл.	угол	аз. скл.	угол	
Перекрывающие отложения													
7601	50	50	230	60	70	Нх	230	5	140	0	50	85	сброс
7602	30	90	90	70	62	Нх	239	12	120	67	333	19	сдвиг
	30	90	135	60	77	Нп	257	24	120	59	356	19	сдвиг
7603	240	60	290	70	46	Нп	350	12	239	60	86	27	сдвиг
	20	80	290	70	87	Нх	156	21	316	68	64	7	сдвиг
	240	60	80	30	89	Нх	37	72	155	9	247	15	взброс
Вмещающие отложения													
7301	20	80	130	85	71	Нх	165	3	62	77	255	13	сдвиг
	20	80	210	70	32	Нп	130	71	293	18	25	5	взброс
7305	90	90	170	90	80	Нх	310	0	130	90	220	0	сдвиг
	100	45	90	90	46	Нх	274	23	180	10	68	65	сброс
	60	60	70	90	31	Нх	245	15	340	17	116	67	сброс
7311	260	80	320	80	59	Нп	20	0	290	78	110	12	сдвиг
	260	80	310	60	51	Нп	203	22	334	58	103	22	сдвиг
	320	80	80	70	66	Нп	198	28	31	61	291	6	сдвиг
7401	120	90	170	70	53	Нп	59	23	210	65	324	11	сдвиг
	230	85	55	50	45	Нп	34	72	140	5	232	18	взброс
7408	50	80	100	80	49	Нп	165	0	75	79	255	11	сдвиг
	270	40	93	37	77	Нп	271	2	181	1	53	88	сброс
	320	50	153	37	86	Нп	326	7	235	6	103	81	сброс
7409	280	70	230	70	47	Нп	165	0	255	68	75	22	сдвиг
	280	70	350	70	65	Нх	135	24	315	66	45	0	сдвиг
	290	80	350	70	59	Нх	139	17	351	70	232	10	сдвиг
	330	80	280	70	49	Нх	126	16	268	70	32	12	сдвиг
7410	60	80	95	70	35	Нп	352	16	125	67	257	16	сдвиг
	113	33	293	57	90	Нх	113	78	203	0	293	12	взброс
7411	150	60	100	60	43	Нп	35	0	125	58	305	32	сдвиг
	150	60	150	90	30	Нп	150	75	240	0	330	15	взброс
	150	60	350	80	44	Нх	341	10	75	25	230	63	сброс
7412	340	80	310	70	31	Нх	145	16	273	65	50	19	сдвиг
	60	70	310	70	79	Нх	275	0	5	58	185	32	сдвиг
7502	60	80	175	60	74	Нп	292	34	136	53	30	12	сдвиг
	90	70	175	60	76	Нх	310	32	146	57	45	7	сдвиг
7503	140	80	180	80	39	Нх	340	11	160	79	250	0	сдвиг
	80	90	180	80	80	Нп	309	8	170	80	40	7	сдвиг
	140	80	210	80	69	Нп	265	0	175	78	355	12	сдвиг
Дайка по Ботубинскому разлому													
7407	270	70	330	80	59	Нх	121	17	269	70	28	10	сдвиг
	330	80	220	78	73	Нх	5	1	271	71	95	19	сдвиг
Дайка по Широкому разлому													
7501	170	70	260	60	80	Нп	33	33	228	56	127	7	сдвиг
	50	40	220	50	90	Нх	360	83	134	5	225	5	взброс
	90	50	270	30	80	Нх	270	80	180	0	90	10	взброс

Примечание: аз. пад. – азимут падения; аз. скл. – азимут склонения; Нх – метод Николаева для хрупких условий; Нп- метод Николаева для пластических условий.

Найденные решения структурного анализа указывают на широкое развитие пластических деформаций в изучаемом горном массиве. Преимущественно они распространены в пределах вмещающих и перекрывающих комплексов, но также обнаружены и в дайке долеритов по

Широтному разлому в виде единичного решения. Их наличие может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, это присутствие в разрезе слоев глинистых (алевролиты, мергели) и карбонатных (известняки) пород, которые по своим физико-механическим свойствам обладают способностью к пластическому разрушению. Во-вторых, это увеличение пластичности пород зоны экзоконтакта в результате термального прогрева при внедрении магматических тел. В пределах магматитов пластические деформации могут быть связаны с разной скоростью застывания приконтактной и центральной частей интрузивов, т.е. длительным нахождением расплава в вязком состоянии, что обусловлено низкой теплопроводностью слагающих их пород.

Подавляющее большинство полученных решений, отвечают сдвиговому полю напряжений (27 из 40 решений), которое на структурных диаграммах нашло отражение в виде поясов трещиноватости, расположенных по периферии большого круга (рис. 34).



Рисунок 34. Круговые диаграммы, на которых зафиксированы пояса трещиноватости. Желтой пунктирной линией обозначен пояс трещиноватости, зелеными кругами – максимумы, его образующие. Проекция верхней полусферы, изолинии проведены с шагом 1 %.

Менее распространены взбросовые и сбросовые подвижки, соответственно 7 и 6 решений. Следовательно принципиальным в плане формирования трещиноватости, развитой в пределах участка локализации трубки «Нюрбинская» следует считать сдвиговый характер перемещения по разрывным структурам. Главенствующую роль сдвигового поля подтверждает проведенный ранее анализ морфологических параметров блоков, вычленяемых крупными разломами и зафиксированных вертикальных движений по ним [Серебряков, 2017]. Взбросовые и сбросовые движения крыльев нарушений, как показал структурный анализ, не играли структурообразующей роли. При этом по результатам геолого-структурного картирования бортов карьера «Нюрбинский» выявлена крупная сбросовая структура – Ботубинский грабен, имеющая региональный масштаб. Сбросовый характер указанного нарушения слабо отражен в реконструированных полях напряжений. В точках наблюдений, расположенных в непосредственной близости к сместителям грабена (см. т.н. 7408 и 7502 на рис. 33 и табл. 3) среди решений преобладают сдвиги. Это совместно с данными о выклинивании грабена и его переходе в единый сместитель на горизонтах ниже -55 абс. метров позволяет предположить, что

грабен-структура, зафиксированная в бортах карьера, является производной сдвиговых перемещений по глубинному разлому. Подобные структуры в литературе носят название «дуплексы растяжения». Они формируются при комбинировании деформаций сдвига и растяжения, что приводит к проседанию блоков (образованию грабенов), а также их вращению. В результате в разрезе наблюдается так называемая структура «цветка» или «пальмы» (рис. 35).

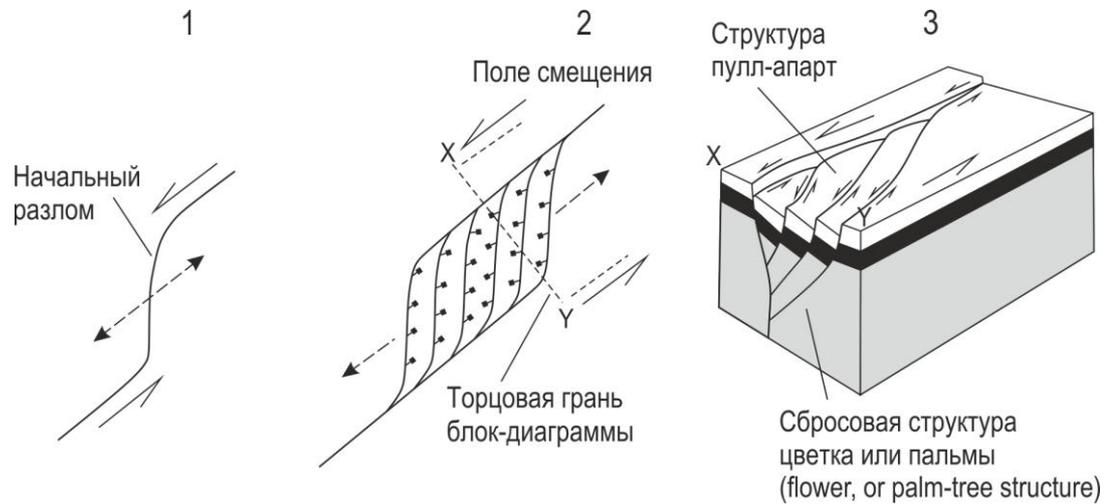


Рисунок 35. Формирование дуплекса растяжения в зоне левого сдвига, по [Twiss, Moores, 1992].

Согласно геофизическим исследованиям за пределами карьерного поля рассматриваемый дизъюнктив имеет «клавишное строение» и состоит из нескольких чередующихся относительно приподнятых и относительно опущенных тектонических блоков, выделенных по изменению абсолютных отметок кровли пород верхнего кембрия [Килижеков, 2008ф]. Это также соответствует структуре дуплекса растяжения, который на поверхности выражен серией сближенных пулл-апарт. Таким образом, по ряду признаков, Ботуобинский разлом может быть отнесен к дуплекс-структуре, образованной при доминирующей роли сдвигового поля напряжений.

Локальные поля напряжений взбросового характера, по всей видимости, связаны с внедрением кимберлитовой трубки, о чем свидетельствует расположение точек наблюдения, где были зафиксированы взбросовые подвижки, преимущественно вблизи кимберлитового тела.

Для выявления особенностей формирования трещиноватости на разных структурных этажах (вмещающие и перекрывающие отложения) составлены сводные розы-диаграммы простираций осей сжатия и растяжения по каждому из вещественных комплексов, представленных в таблице 3 (рис. 36).

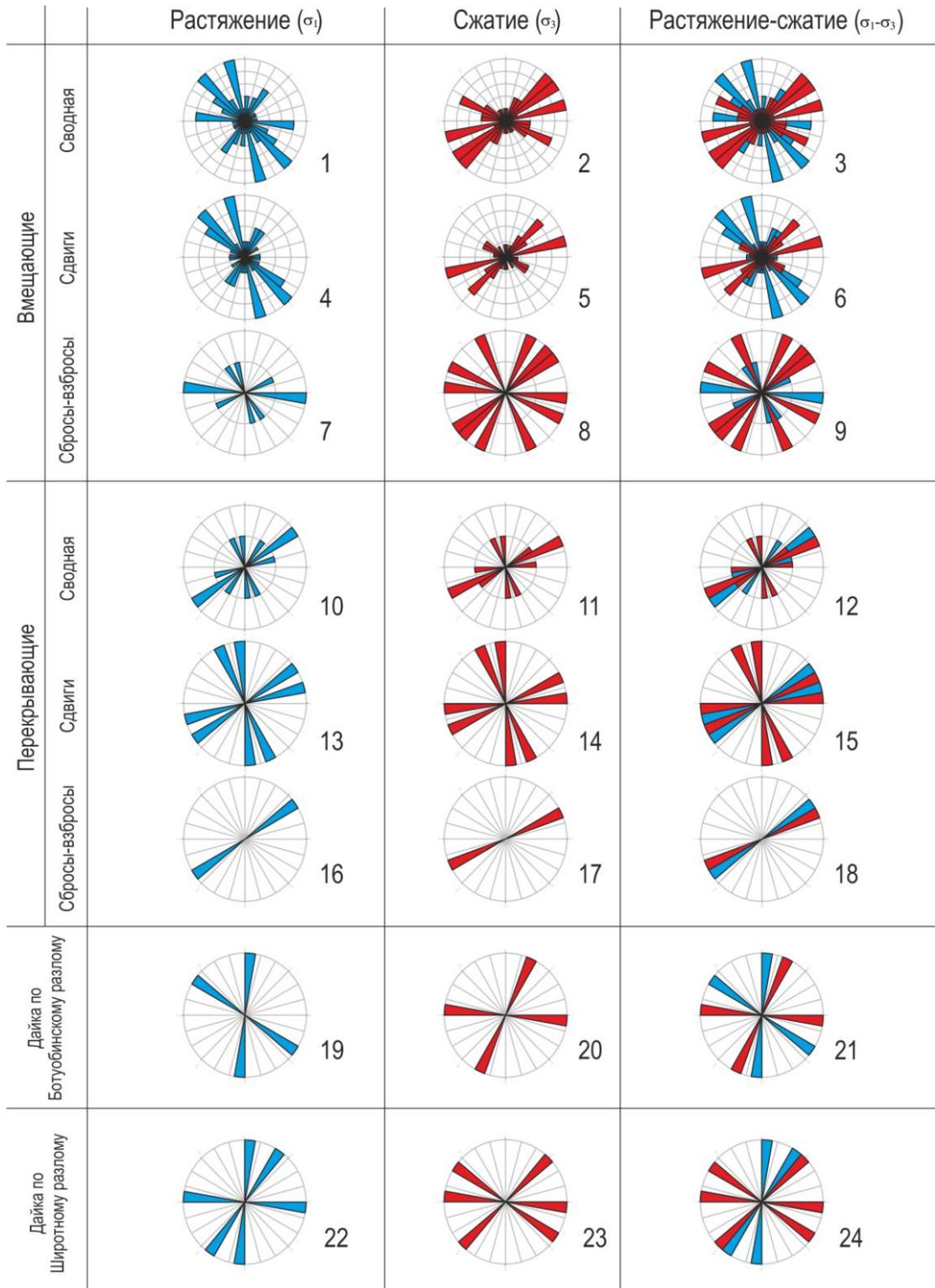


Рисунок 36. Розы-диаграммы простираний осей сжатия и растяжения.

Реконструкция полей напряжения, существовавших во время формирования разрывной сети во вмещающей трубке толще (палеозой) показала наличие двух ярко выраженных сдвиговых этапов (диагр. № 4, 5, 6 на рис. 36). Один из них характеризуется северо-западной ориентировкой оси растягивающих усилий (аз. простирания 315°) и северо-восточной сжимающих (аз. простирания 45°), другой – север-северо-западной ориентировкой оси

растягивающих усилий (аз. простирания 345°) и восток-северо-восточной сжимающих (аз. простирания 75°). Для перекрывающих мезо-кайнозойских отложений восстановлены по четыре оси главных нормальных напряжений (диагр. № 13, 14, 15 на рис. 36) сдвигового типа, которые имеют незначительные вариации направлений, что позволяет объединить их в два этапа. Первый имеет ориентировку оси растяжения в восток-северо-восточном направлении с азимутом простирания 65° и оси сжатия в север-северо-западной, с азимутом 345° , второй полностью совпадает по направлениям осей главных напряжений со вторым палеозойским сдвиговым полем. Это указывает на схожесть условий формирования трещиноватости на одном из этапов и свидетельствует о едином поле напряжения для вмещающих и перекрывающих отложений. Другими словами поле напряжения с осью растяжения, простирающейся по азимуту 345° и осью сжатия, ориентированной по азимуту 75° , действовало уже после формирования перекрывающей толщи, т.к. нашло отражение в палеозойский и мезозойский этапы. Второе поле напряжений, $315-45^\circ$ (здесь и далее, первая цифра – азимут простирания оси растяжения, вторая – азимут простирания оси сжатия) выделенное в палеозойских отложениях существовало до накопления перекрывающей толщи, поскольку в последней подобных ориентировок главных напряжений не обнаружено. Именно с ним мы связываем формирование кимберлитовой трубки «Нюрбинская», что в целом подтверждается результатами анализа кинематических данных и физического моделирования [Гладков и др., 2016]. При этом цитируемыми авторами выделены три этапа действия рассматриваемого поля, соответствующего первым трем фазам внедрения кимберлита. На стадии внедрения четвертой фазы поле напряжений изменилось до обратного ($45-315^\circ$). Поле напряжений $65-345^\circ$, установленное в перекрывающих отложениях и не зафиксированное во вмещающих толщах, носило, по всей видимости, локальный характер. Резюмируя вышеизложенное можно предложить следующую последовательность проявления сдвиговых полей тектонических напряжений. В палеозойский этап преобладающим полем напряжения было поле $315-45^\circ$. В период его функционирования произошло внедрение трех фаз кимберлитов трубки «Нюрбинская». Затем произошло знакопеременное изменение поля напряжений и внедрение четвертой фазы. Далее по тексту данное поле будет именоваться палеозойским. После произошел разворот этого поля и в результате было сформировано промежуточное, палеозой-мезозойское поле $345-75^\circ$, зафиксированное как во вмещающих, так и в перекрывающих отложениях. Наконец, на завершающем этапе действовало мезозойское поле напряжений $65-345^\circ$.

Что касается взбросовых и сбросовых полей, то для них характерно наличие осей растяжения и сжатия, частично или полностью совпадающих по направлению (диагр. № 7, 8, 9,

16, 17, 18 на рис. 36). Это свидетельствует, о существовании на некоторых этапах тектогенеза знакопеременных полей напряжений, что подтверждается наличием клиновидных структур (рис. 37).

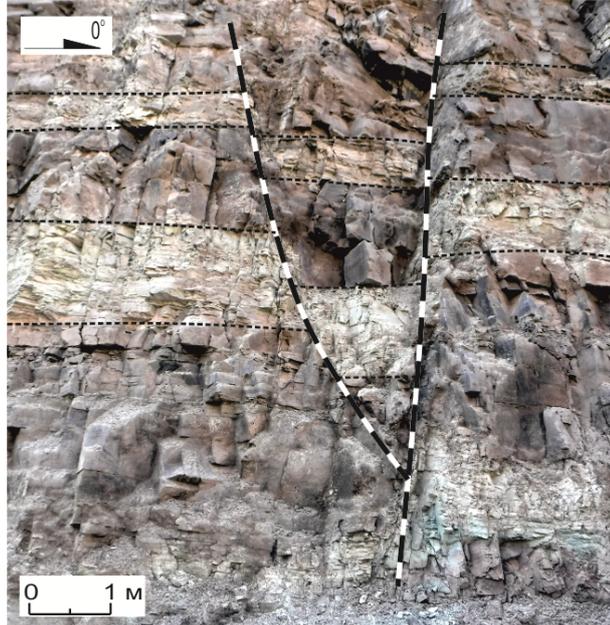


Рисунок 37. Клиновидная структура, зафиксированная в западном борту карьера «Нюрбинский» на гор. +85 абс. метров (фото автора).

Имея в распоряжении результаты структурного анализа не только осадочных отложений, но и магматитов, представленных дайками долеритов по Ботубинскому и Широтному разломам, мы попытались с их помощью решить проблему выявления последовательности формирования интрузивов, обозначенную в разделе 3.1. Напомним, что комплексные геологические, геохимические и палеомагнитные данные однозначно указывают на первичность формирования дайки по Ботубинскому грабену и последующий ее прорыв кимберлитами трубки «Нюрбинская». Положение дайки по Широтному разлому, которая пространственно не связана с упомянутыми магматитами, пока неясно. Решение этой проблемы осуществлялось путем сравнения ориентировок восстановленных осей главных нормальных напряжений для интрузивных и осадочных толщ. При этом мы руководствовались следующим. Для разных вещественных комплексов возможны специфические особенности строения парагенезиса разрывов, которые зависят от действующего на момент их формирования поля тектонических напряжений. Его трансформация может приводить к формированию новых разрывов, либо к изменению ориентировок уже существующих [Гладков и др., 2008]. Восстанавливая поле напряжений посредством анализа парагенезиса разрывных нарушений, мы тем самым можем проследить эти изменения. Сравнивая поля напряжений в разных вещественных комплексах, можно установить их относительный возраст.

Для дайки по Ботуобинскому разлому выявлены два сдвиговых поля: 1) $305-25^\circ$; 2) $5-275^\circ$, для дайки по Широтному разлому – одно сдвиговое поле $35-305^\circ$ и два взбросовых, с осями сжатия, направленными по азимуту 275° и 45° (рис. 36). Первое поле в дайке по Ботуобинскому разлому близко по направлениям растягивающих и сжимающих усилий к палеозойскому полю, в котором происходило внедрение трубки «Нюрбинская». Это свидетельствует, о том, что в момент действия последнего, дайка уже была сформирована, а хрупкие условия разрушения указывают на ее полное застывание. Полученные результаты подтверждают выводы о первичности образования дайки долеритов по Ботуобинскому разлому. Второе поле напряжений $5-275^\circ$, восстановленное в дайке по Ботуобинскому разлому, более позднее, в нем отражен переход от поля напряжений, при котором были внедрены первые три фазы трубки ($315-45^\circ$), к полю внедрения завершающей четвертой фазы ($45-315^\circ$). Сдвиговое поле $35-305^\circ$, зафиксированное в дайке по Широтному разлому, с небольшой вариацией - 10° против часовой стрелки отражает поле четвертой фазы трубки ($45-315^\circ$). При этом пластические условия формирования трещиноватости в дайке в период действия рассматриваемого поля (табл. 3) указывают на нахождение интрузива в стадии неполной консолидированности. Следовательно, его внедрение произошло до начала действия поля $45-315^\circ$, т.е. по времени близко к времени внедрения первых фаз кимберлита. Оставшиеся два взбросовых поля, по всей видимости, являются частными случаями сдвиговых палеозой-мезозойских и мезозойских полей. Для точного выявления периода их действия данных недостаточно. Проведенный анализ распространенности полей напряжений в разных вещественных комплексах, развитых в пределах участка локализации трубки «Нюрбинская» позволяет предложить следующий порядок формирования магматитов: 1) дайка по Ботуобинскому разлому; 2) три фазы трубки «Нюрбинская» и дайка по Широтному разлому; 3) четвертая фаза трубки «Нюрбинская».

Таким образом с помощью структурного анализа массовых замеров трещиноватости были выявлены три главенствующих поля тектонических напряжений, которые определили становление структурных парагенезисов разрывных нарушений. Одно из них – $315-45^\circ$ действовало в палеозое. С ним связано формирование кимберлитовой трубки «Нюрбинская» и дайки долеритов, развитой по Широтному разлому. Два других – $345-75^\circ$ и $65-345^\circ$, функционировали преимущественно в мезозойский период. Также установлен сдвиг как основной характер подвижек по разрывам.

3.1.3. Модель разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Нюрбинская»

Проведенные полевые исследования позволили получить исчерпывающую информацию о тектонической позиции месторождения в пределах вмещающих и перекрывающих трубку отложений. Собранные данные, включающие замеры элементов трещиноватости и разрывных нарушений, послужили основой для построения модели разломно-блокового строения участка ее локализации.

Как было указано ранее, детальные геолого-структурные исследования кимберлитоконтролирующих разломов позволили откартировать элементы их внутренней структуры, определить азимуты и углы падения нарушений, установить их мощность. Для отрисовки и определения точной пространственной позиции зон разломов нами проведен комплекс тахеометрических наблюдений [Серебряков, 2016]. По его результатам получены координаты выходов основных разломных зон на разных горизонтах и в разных бортах карьера, необходимые для построения объемной модели разломного узла. Однако проведенные исследования показали, что в общей разломной структуре участка помимо охарактеризованных, имеется ряд нарушений более локального характера. Они проявлены в виде зон повышенной трещиноватости, дробления, брекчирования и расланцевания, а также крупных сколовых трещин. Зачастую их положение не трассируется с одного борта карьера на другой и вероятнее всего их протяженность ограничена разломами, образующими рудовмещающий узел.

Выявление пространственного положения таких дизъюнктивов осуществлялось путем комплексного анализа данных о распределении тектонических элементов всех масштабов. В качестве опорных точек при построении использовались выходы разломных зон, зафиксированные в бортах карьера. Через такие выходы на трехмерной схеме проводились осевые биссектры, которые представляют воображаемую плоскость, проходящую через центральную часть нарушения. Такой подход позволяет нивелировать возможные ошибки, возникающие из-за наблюдаемых изменений ширины зоны картируемого нарушения на различных горизонтах.

Для участков, где в силу объективных причин визуальных выходов зон нарушений обнаружено не было, разломные зоны выделялись путем анализа схемы распределения показателя густоты трещин (рис. 31). На ней подбирались системы, которые при схожих элементах залегания пространственно принадлежали одной плоскости. При этом максимальное значение уделялось системам с наибольшим показателем Γ_i , который характеризует самые многочисленные из них. Эта плоскость, как и в случае с разломными зонами, в наших построениях принималась в качестве осевой для отдельно взятого нарушения. Мощность зоны

разлома, выделенного путем анализа систем трещин, определялась по средней мощности всех входящих в осевую плоскость систем.

Проверка корректности построений осуществлялась путем сравнения схемы с моделью распределения параметра N . В случае сопоставления линии предполагаемого разрыва с линейным максимумом плотности на модели делался вывод о правомерности выделения разлома, в противном случае предполагаемые разломы не включались в итоговую схему.

Таким образом комплексный анализ данных о тектонических элементах, распространенных в пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская», позволил создать модель разломно-блокового строения участка ее локализации (рис. 38). Стоит отметить, что в нее не включены наклонные разломные зоны, поскольку они проявлены локально и не вносят определяющее значение в общую разломную структуру.

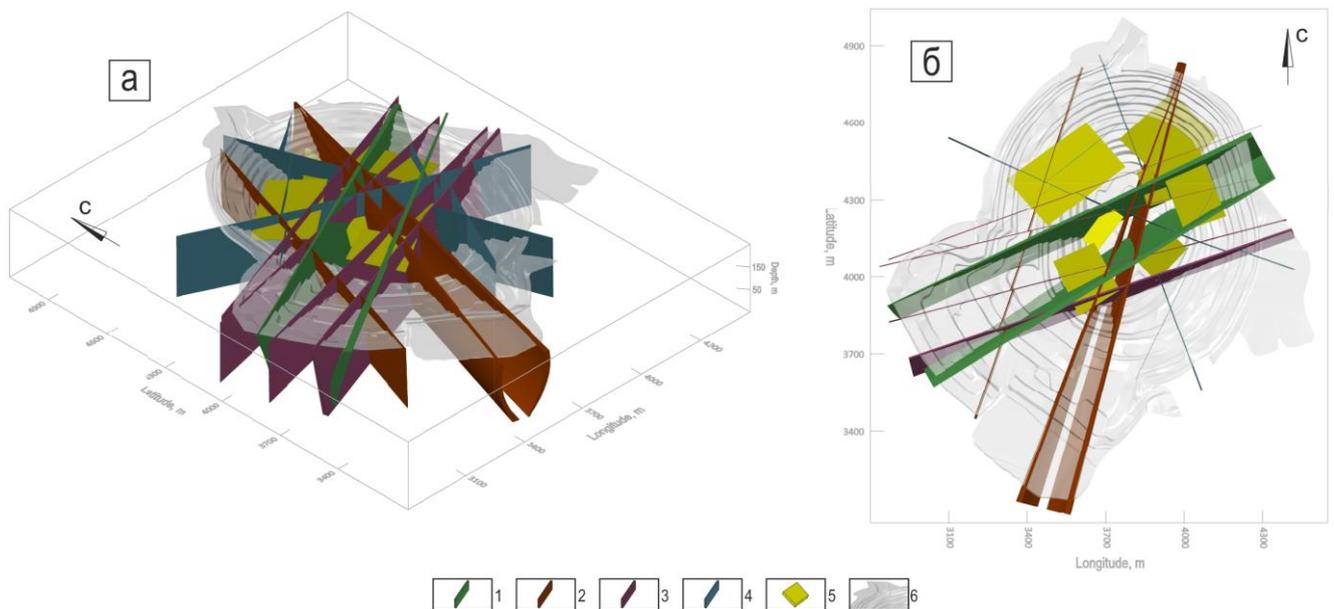


Рисунок 38. Трехмерная модель разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Нюрбинская». 1 – дислокации Ботубинского разлома; 2 – дислокации Диагонального разлома; 3 – дислокации Широтного разлома; 4 – локальные разломные зоны; 5 – пологие разломные зоны; 6 – контур карьера «Нюрбинский». а – вид на модель с юго-запада; б – вид на модель сверху.

Полученная модель свидетельствует о достаточно сложном тектоническом строении исследуемого участка. Разломная структура месторождения сформирована сочетанием субвертикальных и субгоризонтальных дизъюнктивов. Первые представлены серией разрывных нарушений четырех основных направлений: северо-восточного (Ботубинский разлом), север-северо-восточного (Диагональный разлом), восток-северо-восточного (Широтный разлом) и северо-западного. Разрывы первых трех направлений в совокупности образуют кимберлитоконтролирующий узел [Гладков и др., 2016] и выделяются как непосредственно при документации стенок карьера в виде мощных зон повышенной трещиноватости, дробления

и т.д., так и при анализе схем и моделей распределения количественных параметров трещиноватости. На них они представлены либо цепочками трассируемых наиболее проявленных систем трещин, либо вытянутыми линейными максимумами распределения показателя N . Остальные дизъюнктивы отмечаются меньшей масштабностью проявления и определены путем комплексного анализа положения разломных зон и числовых характеристик трещиноватости.

Пологие разломные зоны выделены на горизонтах +220, +205 абс. м в пределах перекрывающей толщи и на горизонте + 160 абс. м. во вмещающих отложениях. Эти зоны выступают в качестве горизонтальных границ блоков, вычленяемых субвертикальными нарушениями. Несмотря на локальность проявления подобных структур, их наличие является необходимым для реализации сдвиговых перемещений по разрывам, которые, как было ранее установлено, играют определяющую роль в период формирования кимберлитовой трубки.

Выделенные разрывные нарушения разбивают горный массив (в плане) на 3-, 4- и 5- угольные блоки различного масштаба, от сотен до первых десятков тысяч кв. м. Наиболее мелкие из них наблюдаются в центральной части карьерного поля на участках взаимного пересечения нескольких разломных зон, вблизи тела трубки. Наименее нарушенными смотрятся северо-западная и юго-восточная части массива, где преобладают разломы север-северо-восточного и северо-западного направлений.

3.1.4. Структурно-вещественная модель формирования кимберлитовой трубки «Нюрбинская»

Прежде чем рассматривать структурно-вещественную модель трубки «Нюрбинская», необходимо остановиться на механизме и условиях внедрения кимберлитовых тел в связи с разрывной тектоникой. Весь ансамбль разрывных структур, развитых в пределах кимберлитовых полей и участвующих в формировании кимберлитовых трубок, принято разделять на рудоконтролирующие, рудоподводящие и рудовмещающие. Первые обеспечивают возможность подъема расплава от магматических камер к приповерхностным горизонтам, создавая каналы повышенной проницаемости. Учитывая мантийное происхождения алмаза, транспортером которого являются кимберлиты, глубинность рудоконтролирующих разломов должна быть достаточной для проникновения в подкоровую область. Следовательно такие разрывы можно считать корово-мантийными, либо фемическими (подкоровыми) по классификации Б.Я. Хоревой [Хорева, 1964]. В их строении наблюдается четкая вертикальная структурная зональность (рис. 39), вызванная различиями в реологических свойствах субстрата на больших глубинах и в приповерхностных горизонтах.

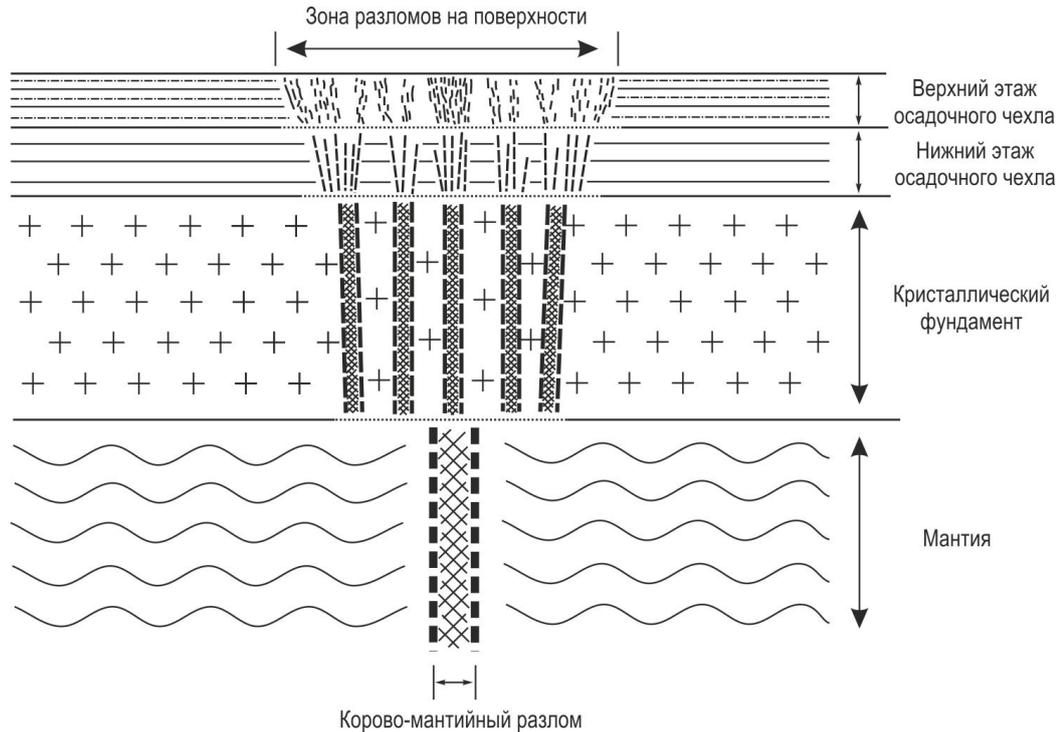


Рисунок 39. Схема вертикальной зональности глубинного разлома.

По мере продвижения вверх по разрезу происходит уменьшение литостатического давления, температуры, изменение гетерогенности среды, что приводит к смене преобладающих условий разрушения с пластических на хрупкие. В результате наблюдается постепенное усложнение строения корово-мантийного разлома, расщепление на серию более мелких составляющих, которые в породах фундамента выражены серией сближенных глубинных разломов. В определенной тектонической обстановке данные нарушения выполняют роль рудоподводящих разломов. В пределах платформенного чехла над зонами глубинных разломов наблюдается серия локальных разломов, разломных зон, участков повышенной трещиноватости, а также пликативных форм, являющихся их поверхностным отражением. В то же время зачастую имеет место несовпадения пространственной ориентировки глубинного разлома и структур платформенного чехла. Помимо упомянутых различий в реологических свойствах причиной этому может быть разная тектоническая обстановка в сублитосферной и верхнекоревой областях [Хелмштедт, Герни, 1997]. Движения по глубинным разломам, разделяющим крупные блоки, провоцируют в осадочном чехле активизацию древних дизъюнктивов, либо формирование новых парагенезов разрывных нарушений, что зависит от кинематического типа, амплитуды и скорости перемещения крыльев разлома. Те из них, что в период магматической активизации обладают повышенной проницаемостью, становятся рудовмещающими для кимберлитовых тел. Подобные разрывы выступают не только как транспортеры кимберлитового расплава от магмаподводящих каналов, но и как области формирования диатрем. При этом местом внедрения трубки является не весь разлом, а его

сегменты, образующие структуры локального (активного) растяжения [Гладков и др., 2008, 2016; Егоров и др., 2015; Семинский К, Семинский Ж, 2016]. С учетом тесной связи проявлений кимберлитового магматизма со сдвигами, выделяется четыре типа подобных структур [Игнатов и др., 2008]: 1) пулл-апараты (pull-apart structure); 2) зоны дуплексов (аккомодации); 3) узлы пересечения двусторонних сдвигов; 4) участки образования трубообразных (тубулярных) каналов фильтрации. Они представляют собой потенциальные «ловушки» для кимберлитовой магмы, образование которых зависит от главенствующего поля тектонических напряжений и его ориентировки по отношению к разрывным структурам, что определяет кинематику последних. Исходя из вышеперечисленного основными тектоническими факторами, оказывающими влияние на условия внедрения кимберлитового тела, являются:

- 1) наличие глубинного разлома, являющегося каналом для подъема расплава от магматической камеры к приповерхностным горизонтам;
- 2) наличие рудовмещающей структуры, по которой происходит транспортировка расплава к местам разгрузки, в качестве которых выступают участки локального растяжения;
- 3) благоприятная тектоническая обстановка.

Как известно помимо тектонических на условия внедрения интрузивных тел оказывают собственно магматические факторы, к числу которых относят реологические свойства расплава, насыщенность флюидами, летучими, общий объем внедряющегося расплава и др. Для кимберлитовых трубок имеются собственные специфические особенности процесса внедрения, связанные с его взрывным характером. Под «взрывом» подразумевается создание в магматической камере избыточного давления, обеспечивающего мгновенный подъем расплава к местам разгрузки. При этом согласно фреатомагматической гипотезе [Милашев, 1984] основным агентом, обеспечивающим высокую скорость перемещения магматической колонны, является сжатый и раскаленный газ. Он «прочистает» подводящий канал, образованный деструктивными формами, постепенно трансформируя его в трубообразный. Затем происходит заполнение проработанного канала кимберлитовым расплавом.

Для многофазных трубок механизм формирования второй и последующих фаз имеет особенности, зависящие прежде всего от степени консолидации пород ранней фазы внедрения на момент начала формирования более поздней. Так при полном застывании первой порции расплава кимберлит утрачивает пластические свойства, а канал, выполненный телом первой фазы внедрения, представляет собой то ослабленное направление, по которому легче всего происходит разрядка напряжений [Вольфсон, Яковлев, 1975]. Повышенная проницаемость канала обуславливается несколькими причинами, главными из которых являются формирование в пределах внедрившегося магматического тела вторичных парагенезов трещин,

вызванных более поздними этапами тектонической активизации, а также образование в области эндоконтакта трещин термической контракции, возникающих при сопряжении горячего расплава с относительно холодными вмещающими толщами и подземными водами. В этом случае наиболее благоприятными для внедрения оказываются участки, располагающиеся на контакте кимберлитового тела с вмещающими отложениями. В результате, сформированное на данном этапе тело кимберлита в значительных объемах будет содержать в себе ксеногенный материал как вмещающих пород, так и пород более ранней фазы.

При высокой интенсивности процессов интрузивного магматизма с незначительными временными промежутками между формированием порций расплава более ранние фазы внедрения не успевают полностью консолидироваться. Из-за низкой теплопроводности кимберлитов [Игнаткин и др., 1989] центральные части тел остаются более горячими и менее вязкими по сравнению с краевыми областями. Внедрение более поздней фазы происходит в условиях растяжения именно по центральной части кимберлитового тела, представляющей зону разуплотнения. В результате образуется структура «трубка в трубке», которая близка по своим параметрам к формирующимся в срединно-океанических хребтах структурам типа «дайка в дайке» [Еременко, 2003]. При этом между внедрившимися телами будут развиты зоны смешанных гибридных пород, а содержание ксенолитов вмещающих пород в породах более поздней фазы будет минимальным.

Таким образом, внедрение кимберлитового тела обусловлено комплексным взаимодействием тектонических и магматических факторов, обладающих тесной парагенетической связью. Первые создают первичные каналы проницаемости, обеспечивающие возможность подъема магмы с глубин ее генерирования, а последние приводят в движение кимберлитовый расплав, создавая условия избыточного давления, который по подводящим каналам проникает на участки локализации. Результатирующей их кооперативного взаимодействия являются кимберлитовые месторождения, обладающие специфическими особенностями структурно-вещественного строения, обусловленными степенью проявленности выделенных факторов. Следовательно, рассмотрение этих особенностей в рамках единой модели позволит восстановить условия формирования каждого конкретного объекта, а также выявить этапность процессов тектоно-магматического взаимодействия.

Разработка структурно-вещественной модели для трубки «Нюрбинская» осуществлялась путем синтезирования данных о вещественных и структурных особенностях месторождения, полученных в ходе предыдущих этапов исследования. В рамках представляемой модели во временной последовательности рассмотрены процессы взаимодействия разрывных нарушений,

формирующих кимберлитовмещающую структуру и вещественных комплексов, слагающих трубку.

Для кимберлитовой трубки «Нюрбинская» рудоконтролирующей структурой является Ботуобинский разлом [Кондратьев, Горев, 2005; Килижеков, 2017], имеющий глубинное происхождение и длительный период развития, сопровождавшийся неоднократным магматизмом, что выражено наличием в его пределах мощной дайки долеритов, пространственно сопряженной с телом кимберлитовой трубки. Учитывая более ранний возраст формирования дайки долеритов, напрашивается вывод, что кимберлитовая магма наследовала пути движения базитов, которые являются индикаторами открытой флюидопроницаемой зоны [Томшин и др., 2004]. Следовательно, к началу процесса кимберлитобразования в земной коре существовала магмоподводящая структура (канал), по которой происходила доставка порций кимберлитового расплава от глубинного источника через породы консолидированной кристаллической коры к платформенному чехлу.

Далее, в области развития терригенно-карбонатных отложений осадочного чехла, продвижение магмы осуществлялось по рудовмещающему разрыву, в качестве которого для трубки «Нюрбинская», как и для всех остальных кимберлитовых тел Накынского поля, выступает Диагональный разлом [Кондратьев, Горев, 2005; Килижеков, 2017]. В приповерхностных условиях активизированные сегменты указанного нарушения совместно с другими разрывами сформировали структуру растяжения, в которую была внедрена трубка. Принимая во внимание данные о том, что диатрема трубки образована в результате последовательного внедрения четырех фаз кимберлитовой магмы в знакопеременном поле тектонических напряжений, мы предполагаем наличие для каждого тектоно-магматического этапа собственной локальной «ловушки». Для выявления подобных структур проведен анализ пространственно-морфологических параметров реконструированных моделей вещественного строения трубки (рис. 20) и их расположения по отношению к закартированным дизъюнктивам (рис. 38). Основные результаты выполненных исследований приведены ниже.

Согласно разработанной вещественной модели на первом магматическом этапе было сформировано тело порфировых кимберлитов, по морфологии сочетающее в себе дайку и центральный субвертикальный шток (рис. 20, б). Его внедрение происходило в пределах зоны влияния Диагонального нарушения, о чем свидетельствует их пространственная сопряженность и наличие сохранившихся даек ПК, расположенных в центральной части указанного разлома (рис. 40).

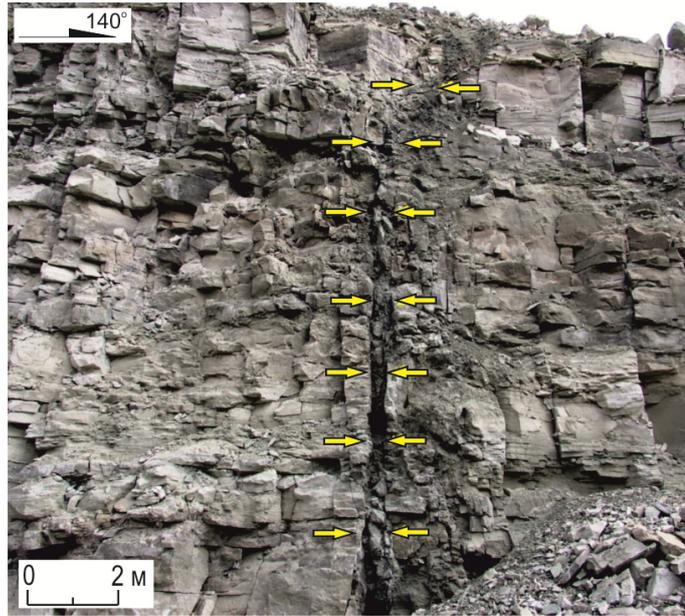


Рисунок 40. Дайка порфировых кимберлитов (желтые стрелки), расположенная в зоне Диагонального разлома (фото А.С. Гладкова).

Учитывая действующее на тот момент времени поле напряжений с северо-восточной ориентировкой оси сжатия и северо-западной растяжения, при котором по разрывам субширотной ориентировки (Широтный разлом) существовали левосдвиговые, а по разрывам субмеридиональной ориентировки (Диагональный разлом) – правосдвиговые перемещения, в сегментах Диагонального нарушения, расположенных между сближенными сместителями Широтного разлома, формировались присдвиговые структуры растяжения (рис. 41).

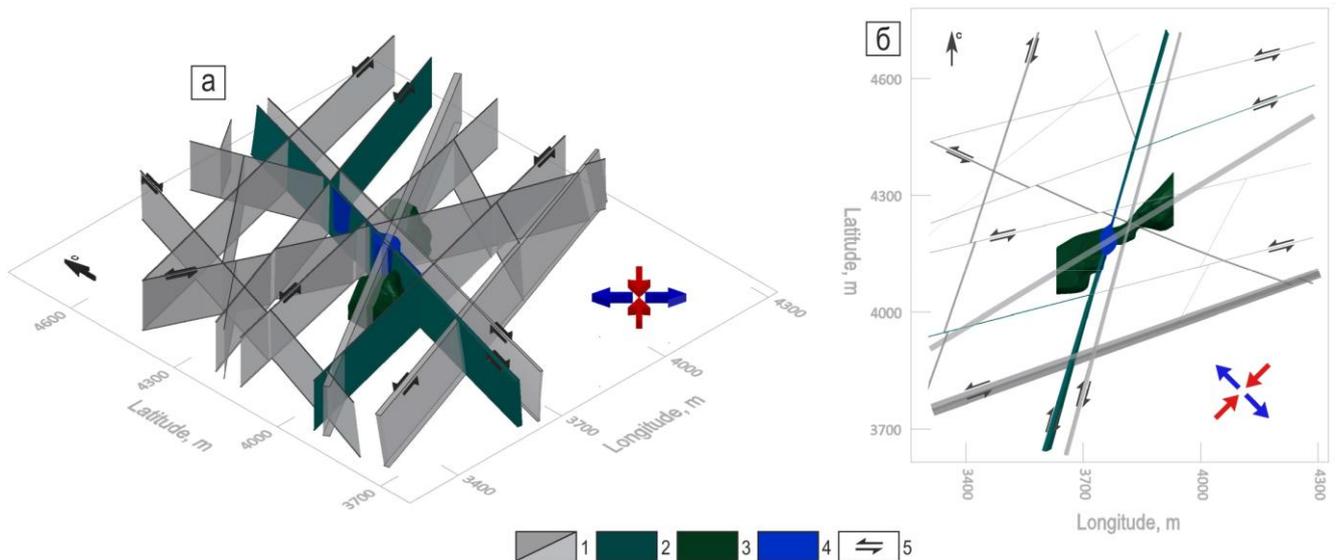


Рисунок 41. Объемная модель первого тектоно-магматического этапа. а – вид с юго-запада; б – вид сверху. 1 – не активизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие структуру растяжения; 3 – дайка по Ботубинскому разлому; 4 – кимберлитовое тело первой магматической фазы; 5 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

В гипабиссальной области, для которой характерно преимущественно хрупкое разрушение, подобные структуры образуются путем «растаскивания» блоков, подобно рифтовому растяжению [Tevelev, Grokhovskaya, 1995]. В результате возникают присдвиговые впадины (пулл-апараты) и связанные с ними области разуплотнения и пониженных давлений, которые могут стать местом локализации расплава. Согласно вышеописанному, в пределах рассматриваемого участка были сформированы несколько локальных структур растяжения, потенциально благоприятных для внедрения кимберлитов первой фазы. Но, как показало сопоставление вещественной модели и модели разломно-блокового строения, действительное внедрение произошло только в одной из них, расположенной в зоне влияния Ботубинского разлома, являющегося кимберлитоподводящим каналом. В пределах таких зон, где происходит наложение рудовмещающих и рудоконтролирующих структур, создаются условия резко повышенной проницаемости, что, по всей видимости, предопределило место локализации первой фазы трубки, которое маркируется положением субвертикального штока порфировых кимберлитов. От него в обе стороны по осевой линии Диагонального разлома развиты дайки ПК, протяженность которых составляет не менее 300 метров, выходя за границы вмещающей структуры. Такая протяженность даек может быть обусловлена низкой вязкостью порфировых разновидностей кимберлитов [Милашев, 1984] и, как следствие, их высокой проникающей способностью.

Следует отметить, что ранее, с помощью моделирования на оптически анизотропных материалах, подобные структуры растяжения были установлены на участке локализации трубки Мир, располагающейся в Мало-Ботубинском районе [Черемных и др., 2014]. В ходе экспериментов локальные пулл-апараты возникали в областях сопряжения разрывов северо-западного и субмеридионального направлений, угловое соотношение между которыми схоже с таковым для структурообразующих разломов в трубке Нюрбинская и составляет 35-45°.

На втором этапе тектоно-магматической активизации продолжились сдвиговые смещения по сегментам разломного узла с сохранением поля тектонических напряжений, действовавшего на первом этапе, и произошло внедрение эруптивной кимберлитовой брекчии второй фазы. Согласно вещественной модели (рис. 20, г), ЭКБ слагала два разобщенных тела овально-вытянутых в плане по направлению, совпадающему с простиранием зоны Диагонального разлома. Пространственно по длинной оси они ограничены дислокациями Широтного разлома, однако в отличие от первого этапа, северной границей является не центральный сместитель, а смежный с ним (рис. 42). Сохранившийся режим присдвигового растяжения привел к формированию в области влияния выделенных разрывов «фантомной» зоны разуплотнения, образованной путем наложения и объединения сближенных сопряженных структур растяжения,

в одной из которых была локализована первая фаза кимберлита. При внедрении второй фазы в пределах этой зоны происходило обтекание вещества вдоль геологических границ тела ПК с частичным дроблением зоны эндоконтакта, что обусловило достаточно большое (до 20%) содержание ксенолитов ПК в пределах сохранившихся тел эруптивной кимберлитовой брекчии.

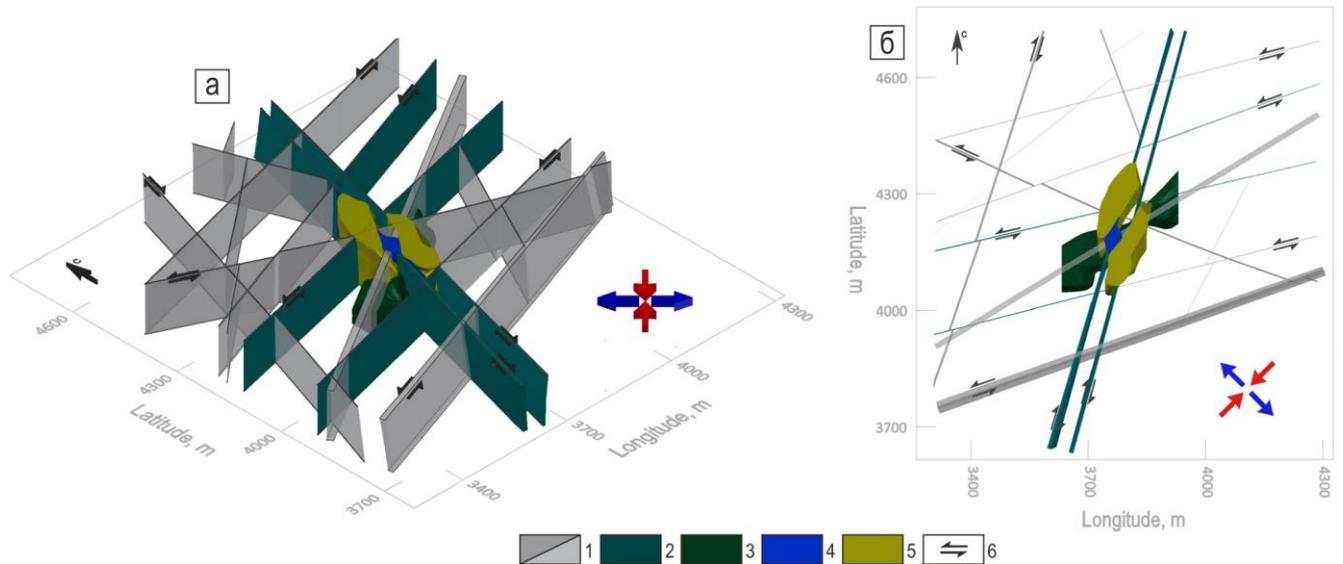


Рисунок 42. Объемная модель второго тектоно-магматического этапа. а – вид с юго-запада; б – вид сверху. 1 – не активизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие структуру растяжения; 3 – дайка по Ботуобинскому разлому; 4 – кимберлитовое тело первой магматической фазы; 5 – кимберлитовое тело второй магматической фазы; 6 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

Третий этап тектоно-магматической активизации ознаменовался внедрением в пределах тех же структур локального растяжения тела автолитовой кимберлитовой брекчии, которое по форме представляло собой вытянутый в субмеридиональном направлении шток (рис. 20, е). Общее количество вещества, локализованного в данный этап, значительно превосходит по объему суммарное количество внедрившегося материала за первые два этапа. Вероятной причиной этому могут быть интенсивные эксплозивные процессы, сопровождавшие подъем расплава. Как известно, автолитовые разновидности кимберлита содержат в большом количестве газовой-флюидные компоненты [Костровицкий, 1976], которые являются главным разрушающим агентом при формировании диатрем [Милашев, 1984]. Поток раскаленных газов, внедряющийся по рудовмещающей структуре оказывает термо-динамическое воздействие на стенки канала, что приводит к их интенсивному разрушению. В результате формируются достаточно большие полости, которые заполняются кимберлитовым расплавом (рис. 43). Описанный механизм внедрения третьей фазы объясняет не только значительные размеры сформированного тела, но и аномальное содержание в его пределах продуктов разрушения первых двух фаз, которое достигает 60 % его объема.

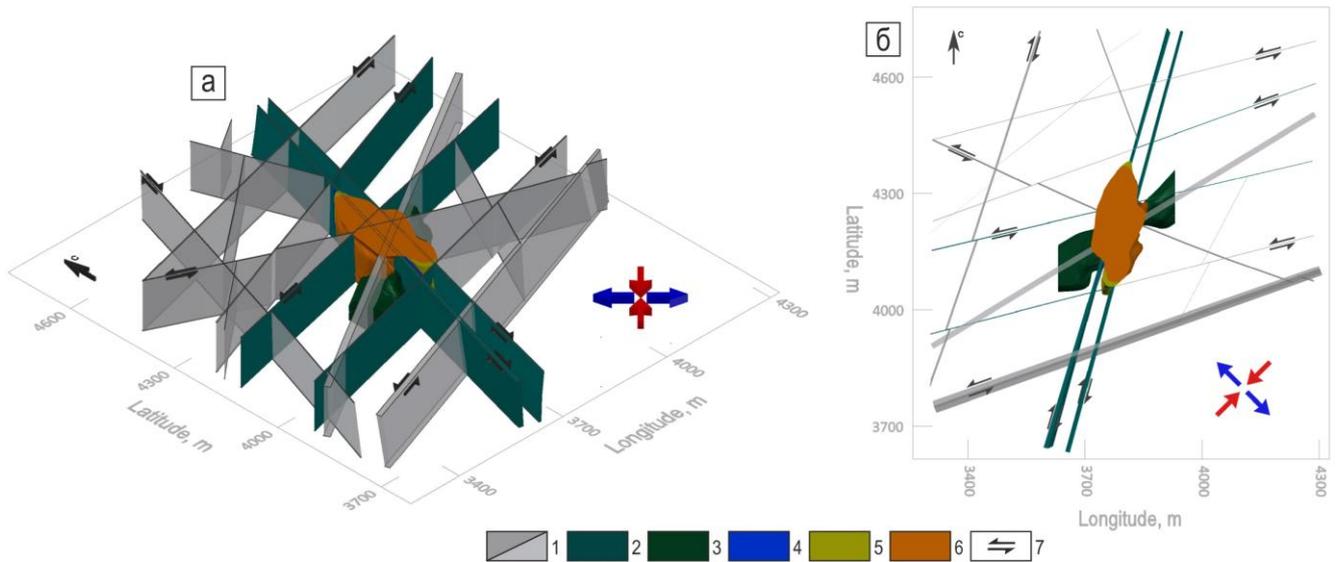


Рисунок 43. Объемная модель третьего тектоно-магматического этапа. а – вид с юго-запада; б – вид сверху. 1 – не активизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие структуру растяжения; 3 – дайка по Ботуобинскому разлому; 4 – кимберлитовое тело первой магматической фазы; 5 – кимберлитовое тело второй магматической фазы; 6 – кимберлитовое тело третьей магматической фазы; 7 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

Таким образом, первые три фазы кимберлита были локализованы в присдвиговых структурах растяжения, которые образованы в активизированных сегментах Диагонального рудовмещающего разлома, вычленяемых дислокациями Широтного нарушения. Это привело к формированию на каждом из этапов тел, вытянутых по направлению длинной оси Диагонального нарушения. Период их внедрения характеризовался устойчивым тектоническим режимом, что выражено в сохраняющемся на всем протяжении этапа магматической активности поле напряжений с осями растяжения, ориентированными в северо-западном направлении, а осями сжатия – в северо-восточном. В совокупности первые три фазы внедрения сформировали близкий к современному контур трубки «Нюрбинская».

Четвертый этап тектоно-магматической активизации характеризовался сменой регионального поля напряжений, при котором силы растяжения были ориентированы в северо-восточном направлении, а силы сжатия – в северо-западном. Это вызвало изменения в кинематике движения по разрывам. Так дислокации Широтного разлома оказались в положении, когда ось сжатия направлена практически перпендикулярно осевой линии разлома. В такой ситуации сколько-нибудь значимых перемещений по сместителям Широтного нарушения не наблюдалось, они находились в неактивном состоянии. По Диагональному разлому происходили левосдвиговые перемещения, а по разрывам северо-западной ориентировки – правосдвиговые. Таким образом, на заключительном этапе формирования трубки разгрузка напряжения осуществлялась путем сдвиговых перемещений по разрывам

субмеридиональной и северо-западной ориентировок, образующим х-образное узловое сочленение (рис. 44).

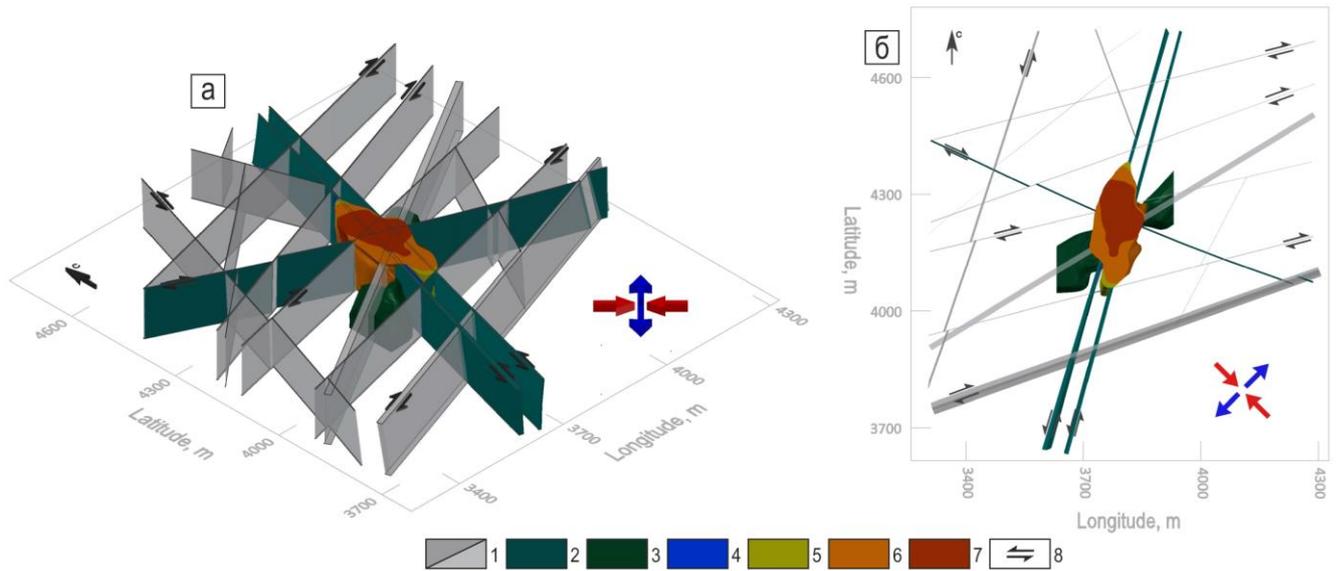


Рисунок 44. Объемная модель четвертого тектоно-магматического этапа. а – вид с юго-запада; б – вид сверху. 1 – не активизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие структуру растяжения; 3 – дайка по Ботубинскому разлому; 4 – кимберлитовое тело первой магматической фазы; 5 – кимберлитовое тело второй магматической фазы; 6 – кимберлитовое тело третьей магматической фазы; 7 – кимберлитовое тело четвертой магматической фазы; 8 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

Взаимодействие между активизированными разрывными нарушениями осуществлялось по принципу динамопары в условиях близортогонального расположения разломов. В результате подвижек как по левым, так и по правым сдвигам на участке сопряжения разрывов произошло образование области растяжения, которая, по всей видимости, стала местом локализации тела четвертой фазы внедрения. Пространственно оно занимает центральную часть тела автолитовой брекчии, сформированной на третьем этапе. Это позволяет предположить, что внедрение четвертой порции расплава происходило по каналу, выполненному еще не раскристаллизованным веществом третьей фазы, что подтверждается наличием между выделенными телами контактовых зон, выполненных гибридными породами.

Комплексный анализ результатов трехмерного моделирования разрывной структуры и особенностей вещественного строения позволил выявить основные черты структурно-вещественной организации рудоносной системы и определить этапность проявления процессов тектоно-магматической активизации, приведшей к формированию кимберлитовой трубки, что нашло отражение в трехмерной модели ее эволюции. По итогам моделирования выявлены четыре этапа тектоно-магматической активизации, в процессе которых сформирован современный контур трубки «Нюрбинская». Внедрение первых трех фаз происходило в

структурах присдвигового локального растяжения, сформированных на участках сопряжения Диагонального рудовмещающего разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями Широкой зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного направления. Завершающая фаза была локализована в узле пересечения двусторонних сдвигов, образованных Диагональным разломом и локальным нарушением северо-западной ориентировки.

3.2. Трубка «Ботубинская»

Трубка «Ботубинская», также как и «Нюрбинская», относится к числу «слепых», не выходящих на поверхность тел и перекрыта толщей мезо-кайнозойских терригенных отложений раннеюрского-голоценового возраста ($J_{1-2} - Q_4$), мощность которых составляет более 80 м [Харьков и др., 1998; Колганов и др., 2013]. Вмещающие трубку породы представлены нижнепалеозойскими карбонатными и терригенно-карбонатными образованиями мархинской E_3mgh и олдондинской $O_{10}O_{1-2}$ свит позднего кембрия – раннего ордовика. На уровне +170-+180 абс. м. по кровле рудного тела на глубину от 2 до 14 м отмечается кора выветривания, выраженная толщей рыхлых карбонатно-глинистых пород среднего-позднего триаса (T_{2-3}).

В отличие от трубки «Нюрбинская» комплекс магматических образований, развитых на участке локализации трубки «Ботубинская», представлен только щелочно-ультраосновой формацией, выраженной собственно кимберлитами трубки. Дайковых тел базальт-долеритовой формации Вилуйско-Мархинского интрузивного комплекса в ее пределах не обнаружено.

По морфологическим особенностям трубка «Ботубинская» представляет собой сложное сдвоенное тело, переходное, от дайки к типичной трубке (рис. 45). Его юго-западная часть представлена дайкообразным интрузивом, совмещенным с наклонной диатремой, а северо-восточная имеет форму типичной трубки, которая сформирована кратерной постройкой. Последняя имеет распространение до глубины -30 абс. метров, где зафиксировано дно кратерной чаши. Ниже этой отметки трубка представляет собой крутопадающее тело неправильной округло-овальной формы, постепенно сужающееся с глубиной, но при этом значительно вытягивающееся по длинной оси в юго-западном направлении. Средний угол падения равен 70-75°.

Максимальная длина дайкового тела трубки составляет 327 метров. Контакты с вмещающими отложениями в юго-западной части трубки преимущественно крутые, с углами 80-85°, в северо-восточной – более пологие, 75-80°. В плане на уровне донижнеюрского эрозионного среза (отметка +170 абс. метров), длинная ось трубки вытянута в северо-восточном направлении по азимуту 25-28°, который сохраняется до глубоких горизонтов.

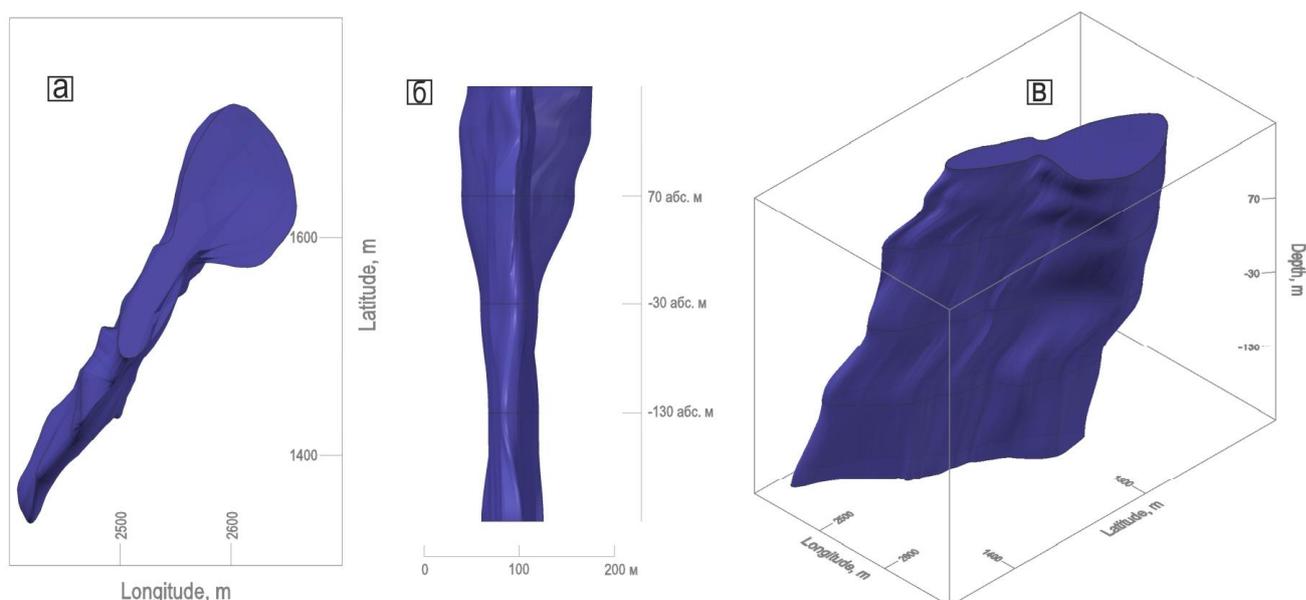


Рисунок 45. Объемная модель кимберлитовой трубки «Ботуобинская». а – вид сверху; б – продольный вид с юго-запада; в – вид с юго-востока.

По современным представлениям трубка «Ботуобинская» является многофазной. Выделяется от двух [Боланев и др., 2000ф; Колганов и др., 2013] до трех [Килижеков, 2017] магматических фаз, слагающих современный контур трубки. Общепринято выделять дайковую, кратерную и диатремовую фации. Более детальному рассмотрению внутреннего строения трубки посвящен раздел 3.2.1.

Изотопное датирование пород трубки «Ботуобинская» не позволяет однозначно установить возраст ее формирования. Немногочисленные определения абсолютного возраста трубки дают разброс в более чем 100 млн. лет (табл. 4). Находки в ксенолитах осадочных пород ископаемой фауны, представленной комплексом конодонтов, указывают на нижний рубеж формирования трубки, отвечающий границе живетского и франского ярусов девона и в абсолютном значении равный 370 млн. лет [Шаталов и др., 1999]. Единственным определением, отвечающим этому требованию из существующих на данный момент, является возраст 364 млн. лет, установленный Rb-Sr методом [Agashev et al., 1998].

Таблица 4. Возраст кимберлитов трубки «Ботуобинская».

Возраст, млн. лет	Метод	Литературный источник
447	Rb-Sr	[Брахфогель и др., 1997]
364	Rb-Sr	[Agashev et al., 1998]
384-448	Rb-Sr	[Земнухов и др., 2005; Копылова и др., 2005]
346-440	Ar-Ar	

Вопрос возрастного взаимоотношения кимберлитов трубок «Ботуобинская» и «Нюрбинская» дискуссионный. Специальных исследований, направленных на его решение, в настоящий момент в литературе не обнаружено. Проведенные палеомагнитные исследования

образцов кимберлитов из трубок «Ботуобинская» и «Нюрбинская», для которых установлен близкий вещественный состав, схожие петро- и палеомагнитные характеристики, указывают на единовременность формирования исследуемых трубок [Константинов, 2014]. Дополнительными доводами, свидетельствующими в пользу точки зрения цитируемого автора, являются близкое пространственное положение рассматриваемых кимберлитовых трубок и их приуроченность к единой кимберлитовмещающей структуре – Диагональному разлому [Кондратьев, Горев, 2005; Игнатов и др., 2006]. В рамках представляемой работы мы будем считать кимберлиты трубок одновозрастными.

Таким образом, общая последовательность формирования вещественных комплексов трубки «Ботуобинская» практически аналогична таковой для трубки «Нюрбинская», за исключением этапов формирования базитов, которых, как уже было отмечено, на участке локализации трубки «Ботуобинская» не обнаружено.

3.2.1. Особенности вещественного строения трубки «Ботуобинская»

Вещественное строение трубки «Ботуобинская» изучалось на этапе проведения детальных разведочных работ на месторождении посредством бурения наклонных и вертикальных скважин, а также системой подземных горных выработок [Боланев и др., 2000ф; Колганов и др., 2013; Костровицкий и др., 2015]. По их результатам установлено, что формирование трубки происходило в две фазы внедрения, субвулканическую (дайковая фация) и вулканическую (диатремовая и кратерная фации). Для каждой фации установлены специфические минералогическо-петрографические, текстурно-структурные признаки, а также содержание полезного компонента. Последнее, как показали исследования многофазных трубок Комсомольская и Юбилейная, существенно отличается между собой в разных магматических фазах, причем имеет место увеличение содержания алмаза от более ранних фаз внедрения к более поздним [Кошкарев и др., 2010; Егоров и др., 2015]. Это позволяет предложить трехфазную модель формирования трубки, где каждая выделенная фация была образована в отдельный этап внедрения. Порядок внедрения установлен по наличию обломков и автолитов одной генерации кимберлита в пределах основной массы других. В генерализованном виде последовательность становления трубки определена в следующем виде: порфировый кимберлит дайковой фации – кимберлитовая туфобрекчия кратерной фации – автолитовая кимберлитовая брекчия диатремовой фации (данные Д.А. Кошкарева).

Первая магматическая фаза, сложенная порфировым кимберлитом (ПК), в современном срезе выражена несколькими разрозненными блоками. Первый располагается в центральной части трубки и на изученном интервале (горизонты +170 - -230 абс. метров) представляет собой

бескорневое штокообразное тело неправильной формы, вытянутое по длинной оси трубки в северо-восточном направлении, с азимутом 25-30° (рис. 46, а).

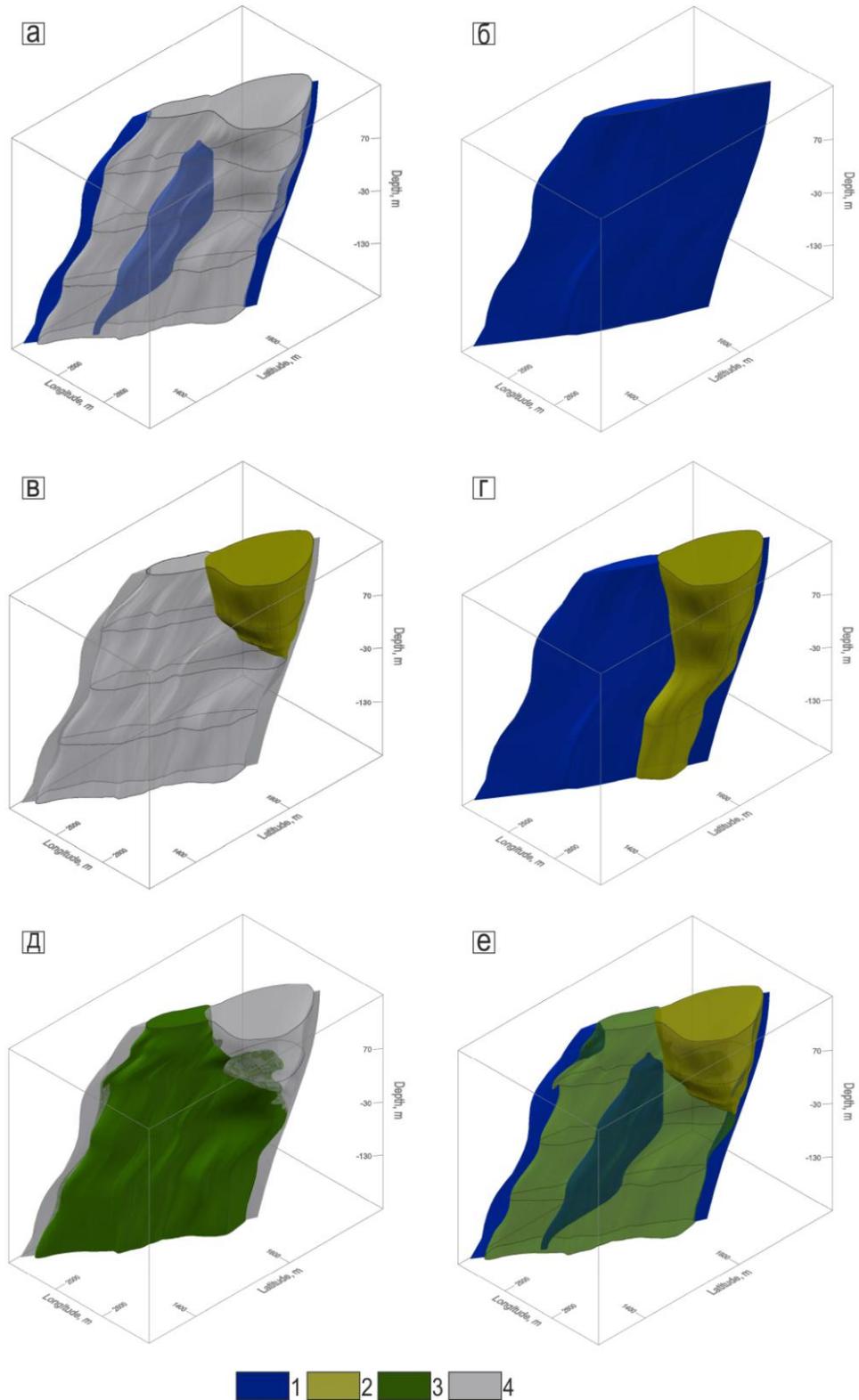


Рисунок 46. Объемные модели вещественных комплексов, слагающих трубку «Ботубинская». 1 – порфиновый кимберлит первой фазы; 2 – эруптивная кимберлитовая брекчия второй фазы; 3 – автолитовая кимберлитовая брекчия третьей фазы; 4 – современный контур трубки. Вид на модели с юго-востока.

Верхняя граница распространения штока зафиксирована скважинами на глубине +100 абс. метров. Выделенное тело разделяет трубку на две приблизительно равных части. Помимо этого в зоне экзоконтакта ПК слагают маломощные (до 4 метров) субвертикальные дайки, протяженностью 25-40 метров [Килижеков, 2017]. Породы первой фазы внедрения также диагностированы в виде обломков различных размеров, от 10 см до 25-30 метров в автолитовой кимберлитовой брекчии (АКБ) и кимберлитовой туфобрекчии (КТБ), как на верхних этажах, так и на глубоких горизонтах трубки. По зоне эндоконтакта с АКБ порфиновые кимберлиты раздроблены и пронизаны дайками и жилами, сложенными автолитовой брекчией.

По внешнему виду ПК представляют собой породы зеленовато-серого, голубовато-серого, реже коричнево-серого цвета (рис. 47). В качестве ксенолитов выступают сланцы, гнейсы, гранулиты (7-8% объема), а также эклогиты (менее 0,01 % объема) [Колганов и др., 2013]. Текстура породы преимущественно массивная, структура крупнопорфировая. Порфиновые вкрапления состоят из серпентина, хлорита, кальцита, пироксена.



Рисунок 47. Крупный обломок порфирового кимберлита в АКБ центральной части трубки «Ботуобинская», скв. 60/560, гор. +120 [Кошкарев, 2015ф].

Характерной особенностью этой фазы является то, что сохранившиеся до настоящего момента блоки ПК (рис. 46, а) располагаются в пространстве по длинной оси трубки, образуя шлейф обломков, который, по всей видимости, был сформирован в результате разрушения единого реликтового тела. Морфология этого тела была восстановлена путем анализа распределения обломков и автолитов ПК в более поздних генерациях кимберлита (рис. 46, б). Согласно полученной модели, на первом магматическом этапе произошло внедрение дайки ПК, вытянутой в северо-восточном направлении. В ее центральной части имеется раздув, отвечающий штокообразному телу. По форме выделенная дайка напоминает дайку ПК,

сформированную в первый магматический этап на трубке «Нюрбинская» (рис. 20, б), отличаясь лишь значительно большей средней мощностью.

До начала описания кимберлитов второй магматической фазы следует остановиться на номенклатурном названии пород, сформированных на этом этапе. В большинстве литературных источников, освещающих проблему вещественного строения кимберлитовой трубки «Ботуобинская» [Харькив и др., 1998; Колганов и др., 2013; Костровицкий и др., 2015 и др.] вторая фаза названа кимберлитовой туфобрекчией. Исходя из названия, порода в своем составе должна содержать кимберлитовую брекчию с туфовым (пепловым) материалом. Однако, как показали минералогические исследования рассматриваемого комплекса, в шлифах достоверного туфового материала обнаружено не было [Кошкарев, 2015ф]. Не исключено, что туфовые образования существовали на верхних горизонтах трубки, но затем были разрушены эрозией, мощность которой составляет около 650 м [Тарабукин и др., 2003]. В этой ситуации, как справедливо было замечено в [Кошкарев, 2015ф], приставку «туфо» использовать не совсем корректно. Поэтому в представляемой работе породы второй фазы внедрения, по аналогии с трубкой «Нюрбинская», будут именоваться эруптивной кимберлитовой брекчией (ЭКБ).

Кимберлитовые второй фазы внедрения в современном срезе формируют кратерную постройку на северо-восточном фланге трубки (рис. 46, в). На уровне палеоэрозионного среза (горизонт +170 абс. метров), площадь поперечного сечения тела составляет около 11,5 тыс. м². С глубиной она уменьшается до 9 тыс. м² на горизонте +70 абс. метров и затем резко сокращается до полного выклинивания на горизонте -30 абс. метров.

Макроскопически ЭКБ представлены породами зеленовато-серого, буровато-серого цвета (рис. 48), зависящим от цвета ксеногенного материала, которым они в значительной степени насыщены (более 60-70% объема породы).



Рисунок 48. Эруптивная кимберлитовая брекчия северо-восточного фланга трубки «Ботуобинская», скв. 66/640, гор. +115 [Кошкарев, 2015ф].

В центральной части кратера отмечается участок, где содержание ксенолитов вмещающих карбонатных пород составляет до 90-95% объема, при их среднем размере от 3-4 м до 10-15 м. В ксенолитах отмечаются многочисленные тектонические элементы смещения, зеркала, борозды скольжения. Участками ксенолиты раздроблены до состояния перетертой карбонатной алевролитовой массы. Помимо обломочного материала пород рамы в ЭКБ отмечено очень высокое содержание обломков и крупных блоков (более 30 м) порфировых кимберлитов первой фазы внедрения. Примечательно, что практически весь обломочный материал ПК распространен преимущественно на восточном фланге кратера, что свидетельствует о наклонном внедрении ЭКБ в тело ПК [Боланев и др., 2000ф]. В качестве границы между эруптивной брекчией и порфировым кимберлитом выступает переходная зона, представленная областью брекчирования ПК, мощностью несколько метров.

Ксенолиты ЭКБ в пределах основной массы ПК и АКБ имеют локальное распространение. Единичные обломки эруптивной брекчии различных размеров обнаружены под кратерной постройкой на северо-восточном фланге трубки вблизи зоны контакта с вмещающими отложениями. Их наличие, а также приведенные ранее данные о взаимоотношении ПК и ЭКБ позволяют предположить, что наблюдаемая в современном срезе кратерная постройка является останцом крупного субвертикального эруптивного аппарата, который был сформирован после становления дайки порфировых кимберлитов на первом магматическом этапе. Его модель приведена на рисунке 46 (г). Ввиду недостатка фактических данных, позволяющих уверенно проводить анализ пространственной распространенности обломков и автолитов ЭКБ в теле трубки, представленная модель носит вероятностный характер. Однако на данном этапе исследований с уверенностью можно говорить, что внедрение пород ЭКБ имело явно взрывную природу и продолжалось длительный период времени, о чем свидетельствует повышенное количество ксенолитов, как вмещающей рамы, так и ПК, дезинтегрированных до мелкообломочного, песчанистого состояния [Кошкарев, 2015ф].

Автолитовая кимберлитовая брекчия третьего магматического этапа окончательно сформировала современный контур трубки. Породы этой фазы внедрения слагают большую часть наклонной диатремы (рис. 46 д, е). В ее пределах АКБ образует два рудных столба, разделенных штокообразным телом порфировых кимберлитов. В их пределах АКБ визуальнo представляет собой серо-зеленую, реже серо-голубую породу брекчиевой текстуры (рис. 49). Обломочный материал представлен ксенолитами вмещающих карбонатно-терригенных (15-40 %), а также метаморфических (3%) пород. Спорадически присутствуют единичные обломки пород трапповой формации, что указывает на наличие на глубоких горизонтах тела

базальтоидов, контактирующего с корневой частью трубки. Связующая масса состоит из кальцита, хлорита, флогопита, серпентина и глинистых минералов.



Рисунок 49. АКБ Центральной части трубки «Ботуобинская», скв. 60/560, гор. +115 [Кошкарев, 2015ф].

Внедрение АКБ сопровождалось опробованием пород первых двух фаз, что отразилось в наличии разноразмерных обломков ПК и ЭКБ в пределах распространения основной массы автолитовой брекчии. Контакты выделенных генераций кимберлита резкие, инъекционные, без переходной зоны. Наличие в области эндоконтактной зоны ПК дайковых прожилков АКБ свидетельствует, что внедрение второй магматической фазы осуществлялось в уже полностью консолидированные кимберлиты первой фазы внедрения. При этом происходило активное брекчирование ПК с их дезинтеграцией и ассимиляцией. Породы, слагающие эруптивный столб второй магматической фазы, также были ассимилированы и диспергированы.

В целом, как показали приведенные выше данные, картина формирования трубки «Ботуобинская» более простая по сравнению с ранее рассмотренной трубкой «Нюрбинская» и включает три последовательных магматических этапа. На первом произошло внедрение протяженной дайки порфировых кимберлитов, ориентированных в север-северо-восточном направлении, совпадающим с простиранием трубки. На втором этапе происходили активные эксплозивные процессы, которые привели к формированию вулканического аппарата на северо-востоке современного контура трубки. Заключительный магматический этап ознаменовался протрузивной инъекцией АКБ в виде наклонной диатремы, которая частично ассимилировала и дезинтегрировала породы первых двух фаз внедрения. Временные интервалы между магматическими событиями были достаточными для практически полного застывания ранних фаз до начала внедрения более поздних. Об этом свидетельствуют наличие областей брекчирования, резкие, рвущие контакты между фазами, а также развитие прожилково-

дайковой вкрапленности АКБ в основной массе ПК. Выделенные особенности нашли отражение в объемной вещественной модели строения трубки «Ботуобинская».

3.2.2. Особенности проявления и распределения разрывных нарушений

Изучение разрывной тектоники в пределах карьерного поля трубки «Ботуобинская» началось с момента проведения горно-подготовительных и вскрышных работ (2013 год) и продолжается в настоящее время параллельно с углублением горной выработки. Синхронность в сборе фактического материала и развитии горных работ позволяет охарактеризовывать тектонические элементы в их исходном состоянии, еще не подверженные экзогенным (выветривание, морозобойное разрушение и др.) и техногенным (взрывные, очистные работы и др.) процессам, что является весьма значимым фактором при восстановлении разломной структуры и геодинамической обстановки, существовавшей на момент внедрения кимберлитового тела.

На настоящее время в карьере «Ботуобинский» реализована сеть точек геолого-структурных и тектонофизических наблюдений общим количеством 212. Подавляющее большинство из них расположены в гипсометрических отметках от +250 до +150 абс. м. Они характеризуют основные параметры структурных элементов распространенных в области развития перекрывающих отложений мезо-кайнозойского возраста и лишь незначительное их количество расположены в пределах вмещающих кимберлиты терригенно-карбонатных пород палеозоя. Всего за период полевых исследований в бортах карьера задокументировано около 2000 тектонических трещин, более 15 крупных сколов и около 60 выходов разломных зон разного масштаба.

3.2.2.1. Разломные зоны

Непосредственные полевые наблюдения, а также аналогия с разрывной сетью находящейся по близости трубки «Нюрбинская» позволили установить, что в разломно-блоковой структуре участка локализации трубки «Ботуобинская» определяющую роль играют субвертикальные и субгоризонтальные разрывные нарушения. Как и в карьере «Нюрбинский» они представлены преимущественно зонами повышенной трещиноватости, дробления и рассланцевания.

Субвертикальные разрывные нарушения. Субвертикальные нарушения, зафиксированные преимущественно в юго-западной и северо-восточной частях карьера, представлены зонами повышенной трещиноватости и дробления, мощностью от 0,1 до 10 м. Роза-диаграмма, построенная по простирациям субвертикальных зон (рис. 50, а), свидетельствует, что на уровне мезо-кайнозойского чехла определяющую роль в строении

разломной сети карьерного поля играют нарушения север-северо-восточного (аз. прост. 20 - 30°) и северо-западного (аз. прост. 300 - 310°) направлений с подчиненным значением разрывов других ориентировок. Установлено, что северо-западные нарушения характеризуются преимущественным падением на северо-восток (рис. 50, б). Для дизъюнктивов север-северо-восточной ориентировки наблюдается изменение направление падения «до обратного», с запад-северо-западного до восток-юго-восточного.

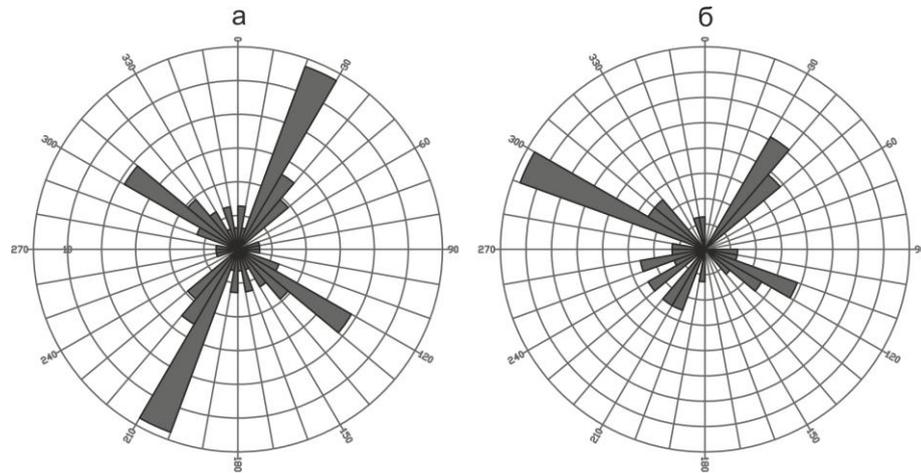


Рисунок 50. Розы-диаграммы простираний (а) и падений (б) субвертикальных зон разрывных нарушений, зафиксированных в карьере «Ботубинский» (39 замеров). Окно осреднения 10°.

Особенности пространственного распределения субвертикальных зон разрывных нарушений приведены на рисунке 51, где каждая зафиксированная зона представлена в виде трехмерного диска. Для более удобного восприятия, согласно построенной розе-диаграмме, все зафиксированные зоны условно разделены на две группы по направлениям: северо-восточные и северо-западные. Из числа северо-восточных выделяется крупное нарушение, расположенное на северном фланге карьера. Оно представляет собой зону повышенной трещиноватости мощностью около 30 м. Породы в пределах зоны раздроблены, лимонитизированы и по цвету выделяются среди окружающих менее деформированных отложений. Среди разрывов северо-западной ориентировки подобных крупных зон не наблюдается. В целом для них характерна небольшая мощность проявлений и выдержанность элементов залегания.

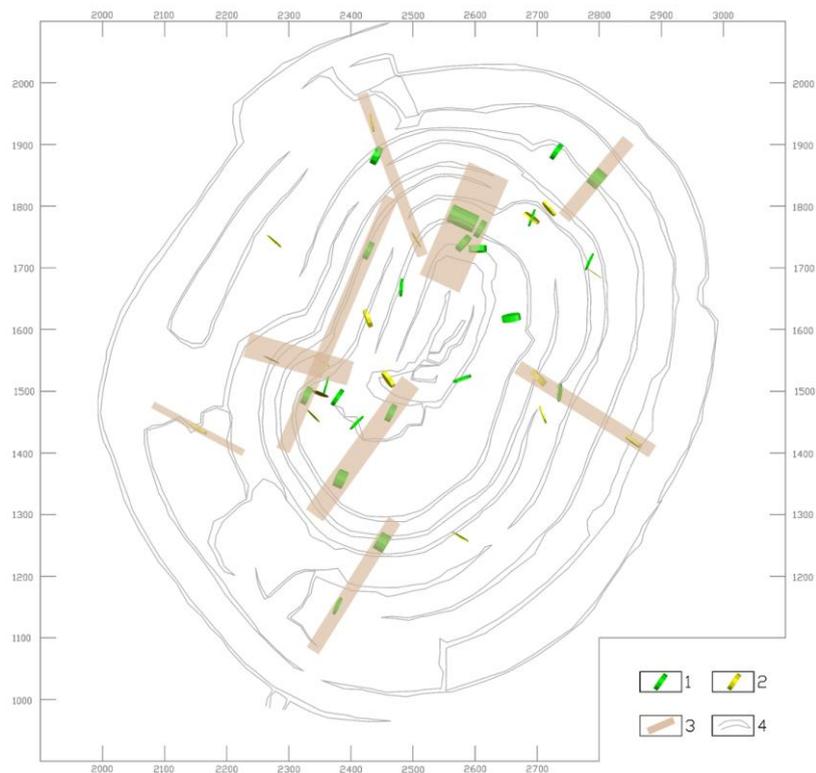


Рисунок 51. Трехмерная схема плоскостей субвертикальных зон нарушений, зафиксированных в точках наблюдения на различных горизонтах карьера «Ботуобинский». Ширина дисков пропорциональна мощности зон в масштабе схемы. 1 – зоны северо-восточной ориентировки; 2 – зоны северо-западной ориентировки; 3 – предполагаемые области влияния разломов; 4 – контур карьера «Ботуобинский».

Субгоризонтальные разломные зоны. Субгоризонтальные разрывные нарушения значительно менее развиты в карьерном поле, нежели субвертикальные. По внешнему виду они представляют собой зоны дробления, трещиноватости или расланцевания с мощностью от первых сантиметров до 1-2 метров, в редких случаях до 10 метров. В разрезе они развиты вдоль стратиграфических границ пород с разными реологическими свойствами и приурочены, как правило, к слоям алевролитов и плотных сцементированных мергелей (рис. 52, а). Пустоты, образованные пологими зонами зачастую заполнены крупными линзами льда, мощностью первые десятки сантиметров (рис. 52, б).

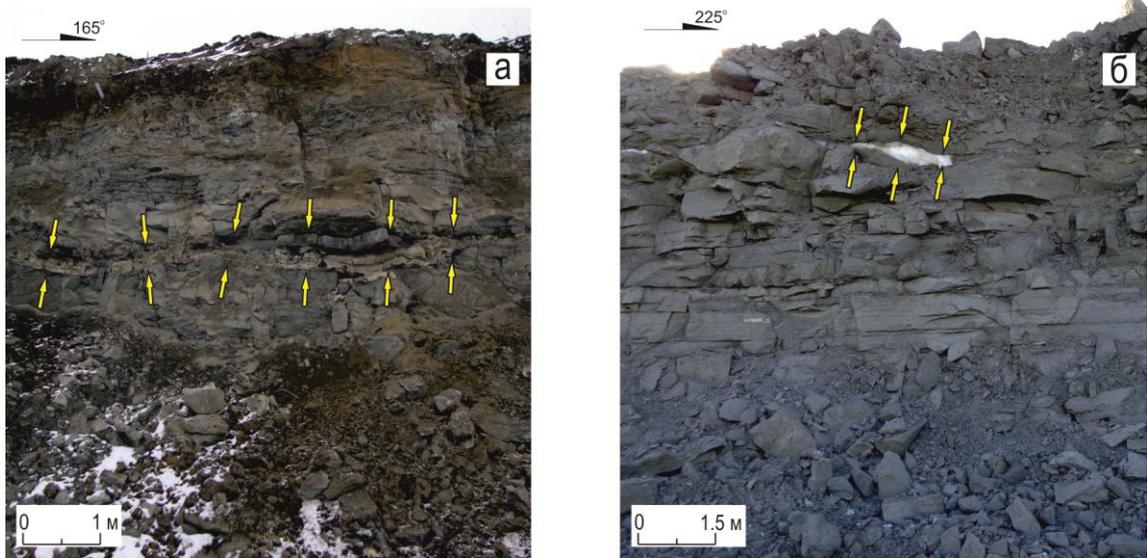


Рисунок 52. Формы проявления субгоризонтальных зон (фото А.С. Гладкова): а – зона послойного дробления; б – линза льда в полости пологой зоны.

Большая часть выявленных в карьере субгоризонтальных нарушений располагается на гипсометрическом уровне от + 195 до + 215 м. На отдельных участках такие дизъюнктивы имеют падения направленные в сторону вскрываемого пространства, что увеличивает риск возникновения осложнений, связанных с оползневыми явлениями и обрушениями бортов карьера.

3.2.2.2. Тектоническая трещиноватость

По результатам проведенных исследований установлено, что распределение трещиноватости в изученных бортах карьера «Ботубинский» в значительной степени повторяет таковое для верхних горизонтов карьера «Нюрбинский». В ориентировке основных систем трещин наблюдается явный максимум север-северо-восточного направления (аз. прост. $350-60^\circ$), включающий в себя 53% от общего количества выявленных систем (рис. 53, а). По всей видимости это направление отражает приразломную трещиноватость, субпараллельную основным разломным зонам. Оставшиеся два максимума северо-западной ($300-320^\circ$) и восток-северо-восточной ($70-100^\circ$) ориентировок имеют подчиненное значение. В падениях систем отмечается наличие двух пар близсимметричных максимумов запад-северо-западной – восток-юго-восточной и северо-западной – юго-восточной направленностей, а также субширотный максимум (рис. 53, б).

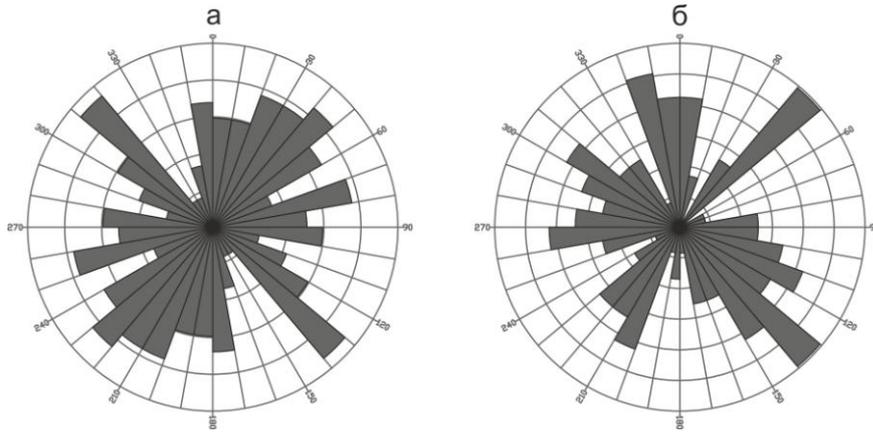


Рисунок 53. Розы-диаграммы простираний и падений основных систем трещин, зафиксированных в карьере «Ботубинский» (118 замеров). а – роза-диаграмма простираний систем трещин; б – роза-диаграмма падений систем трещин. Окно осреднения 10° .

Схожесть наблюдается и в общем рисунке трещинной сети, для которого характерно наличие извилистых, прерывистых, непротяженных по простиранию и падению трещин. Это вызвано присутствием в разрезе большого количества включений песчаника с чешуйчатой, шаровой отдельностью, крупных прослоев конгломератов, дресвяников и галечника. Зачастую трещиноватость на таких участках либо затухает, либо полностью изменяет направление развития. В приповерхностных горизонтах широко распространены трещины отрыва. Часть из них нетектонического происхождения (трещины бортового отпора) и возникли в результате проведения взрывных работ и передвижения тяжелой техники. Другая часть образовалась при локальном снятии напряжения из-за разгрузки вышележащих слоев (трещины расширения). Как правило, это открытые трещины, зияние составляет от нескольких миллиметров до первых десятков сантиметров. Общую картину распределения трещиноватости значительно усложняют листрические и флексуорообразные трещины, осевая линия которых плавно изменяет направление.

Для установления закономерностей пространственной позиции основных систем трещин построена схема распределения показателя линейной плотности (рис. 54).

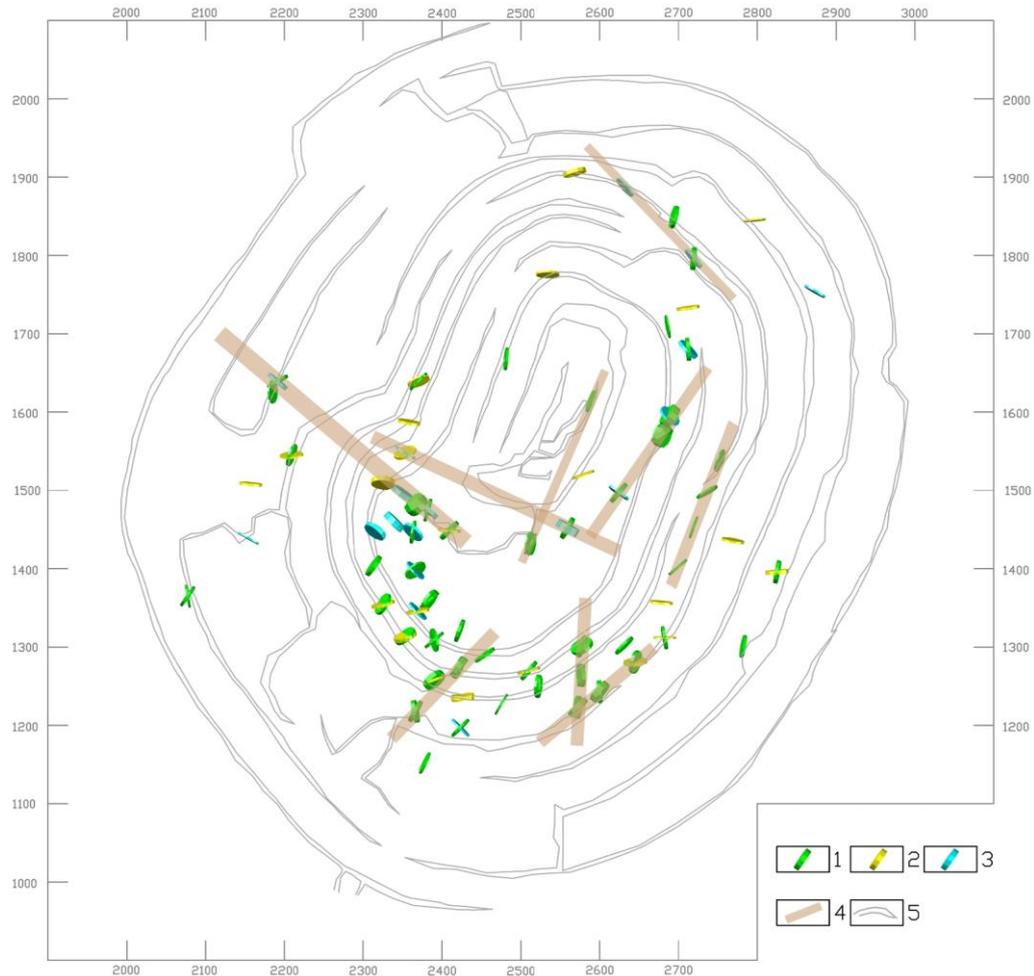


Рисунок 54. Трехмерная схема распределения основных систем трещин, зафиксированных в точках наблюдения на различных горизонтах карьера «Ботуобинский». Ширина дисков пропорциональна показателю Γ_i в масштабе схемы. 1 – системы трещин север-северо-восточной ориентировки; 2 – системы трещин восток-северо-восточной ориентировки; 3 – системы трещин северо-западной ориентировки; 4 - предполагаемые области влияния разломов; 5 - контур карьера «Ботуобинский».

Системы наиболее густых трещин сфокусированы в южном окончании карьера. Здесь преимущественным распространением пользуются системы северо-восточной ориентировки. Для них характерно повышенное значение показателя Γ_i , которое для отдельных систем составляет 10 тр/пог. м. Отсутствие систем трещин по самым верхним горизонтам объясняется слабой сцементированностью и рыхлостью пород на этом гипсометрическом уровне. В целом имеется несколько линейно выстроенных систем трещин северо-восточной и северо-западной ориентировок. Они свидетельствуют о наличии в исследуемом объеме разрывных нарушений выделенных направлений.

Как указывалось выше, в процессе выполнения полевых работ были собраны данные, позволяющие охарактеризовать в каждой точке наблюдения параметр N – количество трещин на 1 м^2 . Для визуализации имеющихся данных о распределении исследуемого параметра была

построена трехмерная модель в программе RockWorks 2002 при помощи алгоритма Directional Weighting. (рис. 55).

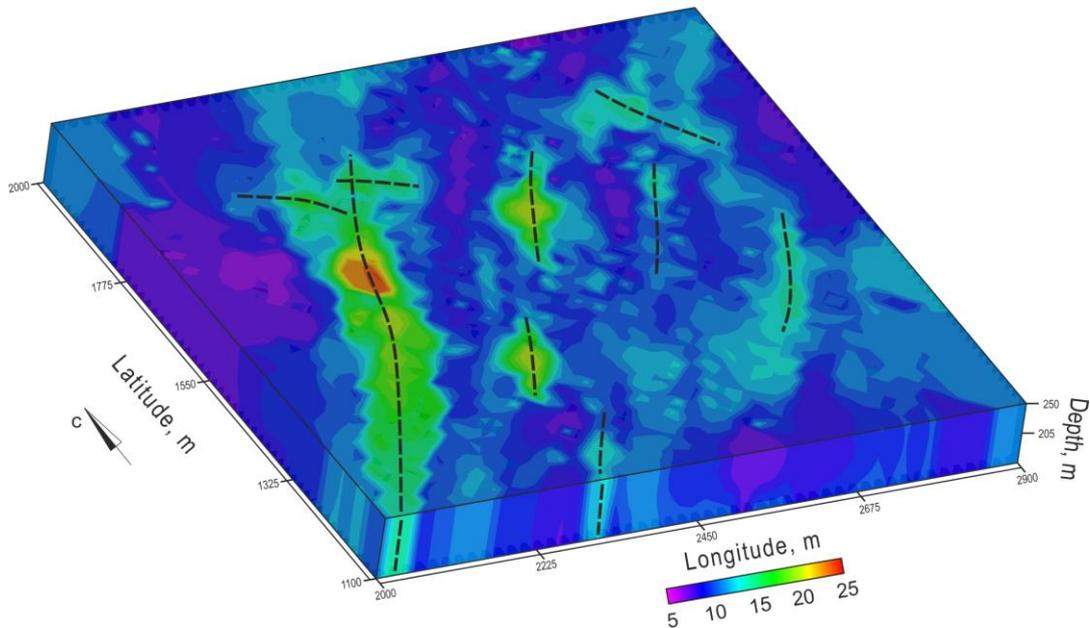


Рисунок 55. Трехмерная модель распределения параметра плотности трещин (N) (вид с юго-запада).

Представленная модель дополняет и отражает основные элементы, выявленные путем анализа разломных зон и густоты систем трещин. Наблюдаемая серия максимумов плотности север-северо-восточного направления подчеркивает преобладающую роль разрывов этой ориентировки в общей тектонической структуре массива. В подчиненном количестве зафиксированы максимумы северо-западной и субширотной ориентировок. Наличие изометричных аномалий плотности, с высоким значением показателя N (до 20-25 тр/м²), по всей видимости, отвечает узлам пересечения разноориентированных разрывов. Следует отметить, что на представленной объемной модели хорошо подчеркивается субвертикальный характер выделенных нарушений, а также тот факт, что они прослеживаются на глубины до ста метров в пределах верхних изученных горизонтов, что соответствует мощности развития перекрывающего чехла.

3.2.2.3. Реконструкция полей тектонических напряжений

К моменту написания данной работы доступным для прямых геолого-структурных наблюдений в пределах карьера «Ботуобинский» был комплекс перекрывающих трубку отложений, породы коры выветривания, а также верхний слой вмещающих образований. Разрывная структура, развитая в этих отложениях и охарактеризованная в предыдущих разделах диссертации, отражает, главным образом, посткимберлитовый этап деформаций и лишь косвенно позволяет судить о полях тектонических напряжений, существовавших в момент формирования кимберлитового тела. Поэтому для решения задач, связанных с

созданием структурно-вещественной модели трубки «Ботуобинская» были использованы результаты реконструкции напряженного состояния в пределах участка локализации трубки «Нюрбинская». Подобное допущение на наш взгляд не является критическим с нескольких позиций. Во-первых, рассматриваемые трубки расположены в пределах единой кимберлитоконтролирующей структуры, которой является Диагональный разлом [Игнатов и др., 2006, 2008]. Во-вторых, схожесть разломных узлов, вмещающих кимберлитовые трубки. Наконец, в-третьих, близкий возраст рудных тел, а также некоторое единообразие морфологических параметров различных генераций кимберлита.

Таким образом, на данном этапе исследований мы принимаем, что формирование трубки «Ботуобинская» происходило в едином с трубкой «Нюрбинская» поле напряжений, которое на начальном этапе характеризовалось ориентировкой осей растяжения в северо-западном направлении, а осей сжатия в северо-восточном. На завершающем этапе произошла переориентировка осей напряжения до обратной.

3.2.3. Модель разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Ботуобинская»

Изучение тектоники карьерного поля трубки «Ботуобинская» позволило получить необходимую информацию для построения итоговой модели разломно-блокового строения участка ее локализации. Собранные данные, включающие замеры элементов трещиноватости и разрывных нарушений, характеризуют общую тектоническую позицию месторождения на уровне мезо-кайнозойского перекрывающего чехла.

Построение модели производилось по схеме, реализованной в карьере «Нюрбинский». На первом этапе анализировались выходы разломных зон, зафиксированные в бортах карьера при натурных исследованиях. Подбирались зоны с близкими параметрами и проходящими через одну плоскость, которая принималась в качестве осевой для разлома (рис. 51). Затем полученные данные были дополнены результатами анализа количественных параметров тектонической трещиноватости. Таким образом были отрисованы основные сместители разломных зон, определена их приблизительная мощность и элементы залегания. Результаты выполненных построений приведены на рис. 56.

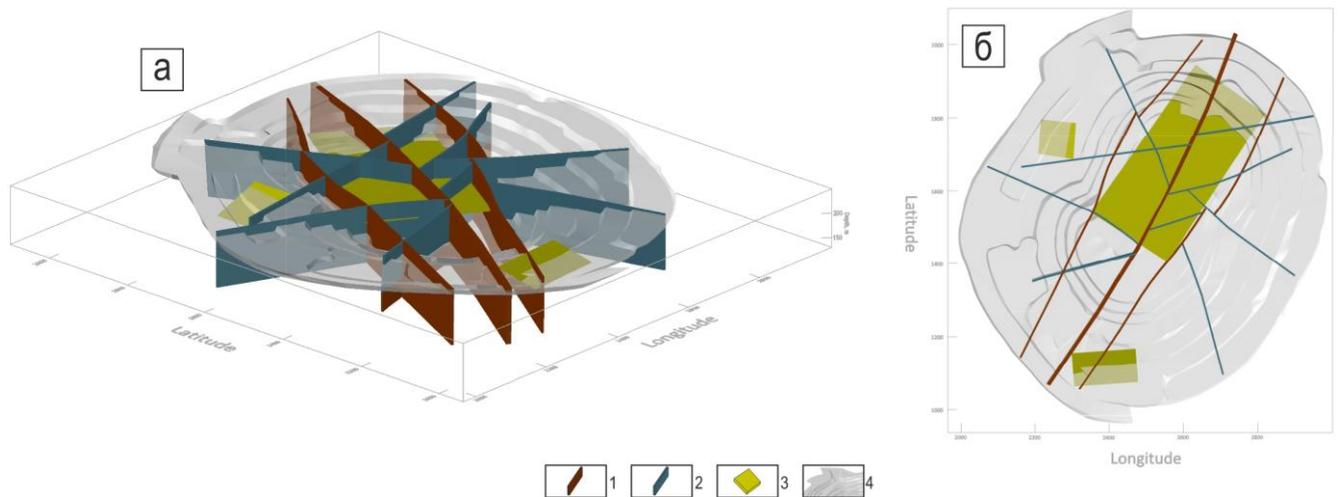


Рисунок 56. Трехмерная модель разломно-блокового строения участка локализации кимберлитовой трубки «Ботуобинская». 1 – дислокации Диагонального разлома; 2 – локальные разломные зоны; 3 – пологие разломные зоны; 4 – контур карьера «Ботуобинский». а – вид на модель с юго-запада; б – вид на модель сверху.

Представленная картина отражает общую разломно-блоковую структуру участка локализации трубки «Ботуобинская» и включает субвертикальные и субгоризонтальные разрывные нарушения. Наклонные разрывы на ней не показаны, поскольку полученных данных пока недостаточно для их уверенного выделения.

Разрывную структуру определяют субвертикальные разломы север-северо-восточного, северо-западного, восток-северо-восточного и северо-восточного направлений. Выделенные разломы разбивают горный массив (в плане) на 3-, 4- и 5-угольные блоки различного масштаба. Учитывая, что зоны разломов характеризуются значениями ширины от первых метров до десятков метров, размеры вычленяемых блоков колеблются от сотен м² до десятков тысяч м². Наиболее мелкие из них наблюдаются в северной части карьерного поля на участках пересечения нескольких разломных зон. Наименее нарушенными смотрятся центральная и южная части массива, где преобладают разломы север-северо-восточного и северо-западного направлений. Субгоризонтальные нарушения развиты в виде немногочисленных локальных зон, не образующих единых сместителей. Следовательно, на данный момент исследования выделить горизонтальные границы блоков, образованных субвертикальными разрывными нарушениями, не представляется возможным.

3.2.4. Структурно-вещественная модель формирования кимберлитовой трубки «Ботуобинская»

Результаты полевых тектонофизических и геолого-структурных исследований вкупе с известными данными о вещественном строении рудного тела [Харьков и др., 1998; Боланев и др., 2000ф] послужили основной для создания структурно-вещественной модели становления кимберлитовой трубки «Ботуобинская». Согласно проведенным исследованиям в вещественном

строении трубки выделяется три фазы внедрения, образованные в три этапа тектономагматической активизации. Учитывая сопоставимый возраст образования трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская», а также их пространственную близость предполагается, что активизация разрывной сети и внедрение кимберлита происходили в едином поле тектонических напряжений.

Рудоконтролирующей структурой для трубки «Ботуобинская» является Дяхтарский разлом [Кондратьев, Горев, 2005; Масленникова, 2007ф; Килижеков, 2017]. Он не находит прямой пространственной сопряженности с телом трубки, а удален от нее на расстояние около 500 метров (рис. 12, 13), что является существенным отличием от ранее рассмотренной трубки «Нюрбинская», для которой установлена прямая корреляция с рудоконтролирующим Ботуобинским разрывом. По данным бурения на всем протяжении дизъюнктив сопровождается небольшими крутопадающими дайкообразными телами миндалекаменных щелочных базитов, имеющих прерывистую кулисообразную форму. Существование подобного нарушения обеспечило возможность подъема кимберлитового расплава с глубин его формирования в гипабиссальную зону. Здесь движение расплава продолжалось по рудовмещающему Диагональному разлому, который пересекает магмаподводящий канал. В его приповерхностных частях под действием главенствующего поля тектонических напряжений формировались структуры локального растяжения, послужившие местами локализации порций кимберлитового расплава. Для выявления особенностей строения указанных структур и определения условий внедрения трубки «Ботуобинская» проведено сопоставление данных о разрывных нарушениях, формирующих разрывную структуру участка внедрения с данными о вещественных комплексах, слагающих трубку.

Согласно разработанной вещественной модели на первом магматическом этапе произошло внедрение порфирировых кимберлитов, представленных дайкообразным телом (рис. 46, а). Как и в трубке «Нюрбинская», оно пространственно тяготеет к Диагональному разлому и выполняет его осевую зону. Протяженность дайки составляет порядка 400 метров при средней мощности около 10 метров. Сильно вытянутая форма тела ПК отвечает жерлу трещинного типа, характерному для начальных стадий формирования диатрем [Милашев, 1984]. Наиболее мощная часть дайки ограничена сегментами разрывов восток северо-восточной ориентировки, что позволяет предположить, что внедрение первой фазы происходило именно в этой области в структуре присдвигового растяжения аналогичной той, что была сформирована на первом этапе в трубке «Нюрбинская» (рис. 57). Далее происходило растекание слабвязкого расплава ПК и заполнение открытых полостей Диагонального разлома. Отличительной особенностью в морфологии тел первой фазы, образованных на начальной стадии внедрения трубок, является

отсутствие в теле ПК Ботуобинской трубки ярко выраженного субвертикального штока. По всей видимости, это связано с удаленностью трубки от рудоконтролирующего Дяхтарского разлома.

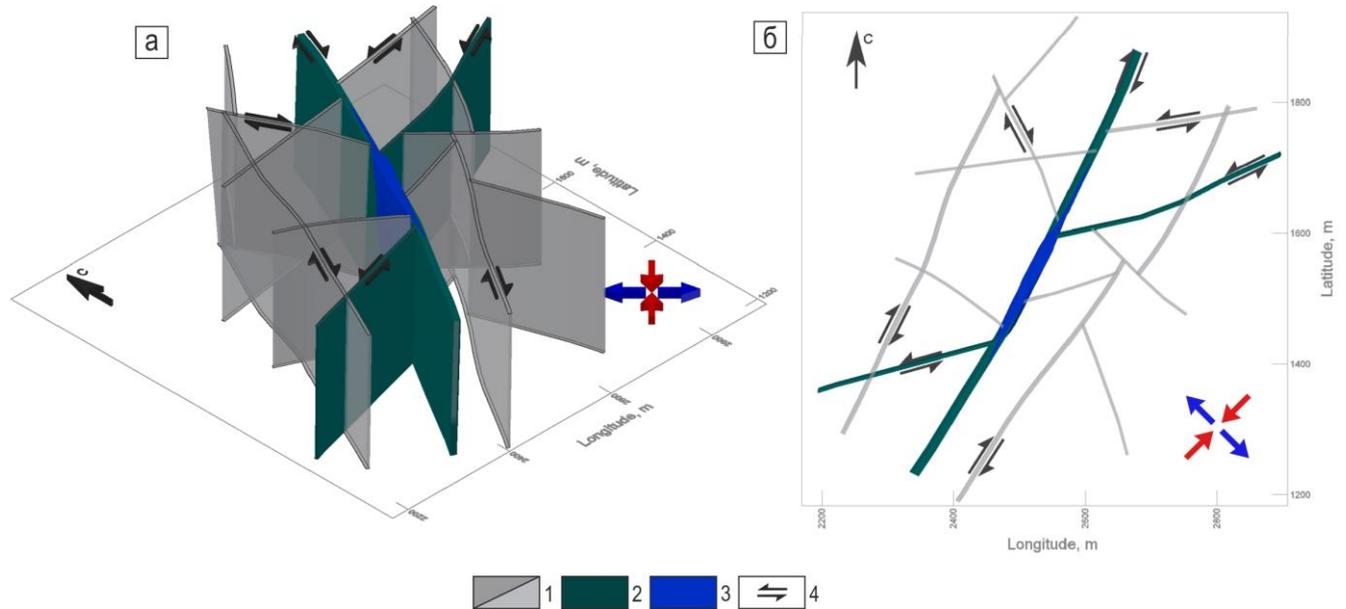


Рисунок 57. Объемная модель первого тектоно-магматического этапа. а – вид с юго-запада; б – вид сверху. 1 – не активизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие рудовмещающую структуру; 3 – кимберлитовое тело первой магматической фазы (ПК); 4 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

На протяжении всего периода консолидации вещества первой фазы внедрения по разрывам север-северо-восточного и восток-северо-восточного направлений продолжались сдвиговые перемещения. Это привело к изменению формы тела первой фазы и появлению флексуобразного в плане изгиба ее контуров, наиболее проявленному на глубоких горизонтах трубки.

На этапе, когда практически закристаллизованный кимберлит утратил пластические свойства, перемещения по указанным разрывам, а также активизация сегментов нарушений северо-западной ориентировки способствовали формированию в пределах тела первой фазы тектонических зон дробления, которые унаследовали структуру разрывных нарушений. В ходе дальнейшей активизации разломного узла в сохраняющемся поле напряжений, за счет взаимодействия сегментов нарушений северо-северо-восточной (правый сдвиг), восток-северо-восточной (левый сдвиг) и северо-западной (правый сдвиг) ориентировок на северо-восточном фланге области развития порфировых кимберлитов сформировался участок локального растяжения. Мы предполагаем, что именно по нему происходили взрывные процессы, приведшие к брекчированию и диспергации ПК, а также образованию трубообразной полости, которая была заполнена продуктами второй фазы внедрения (рис. 58).

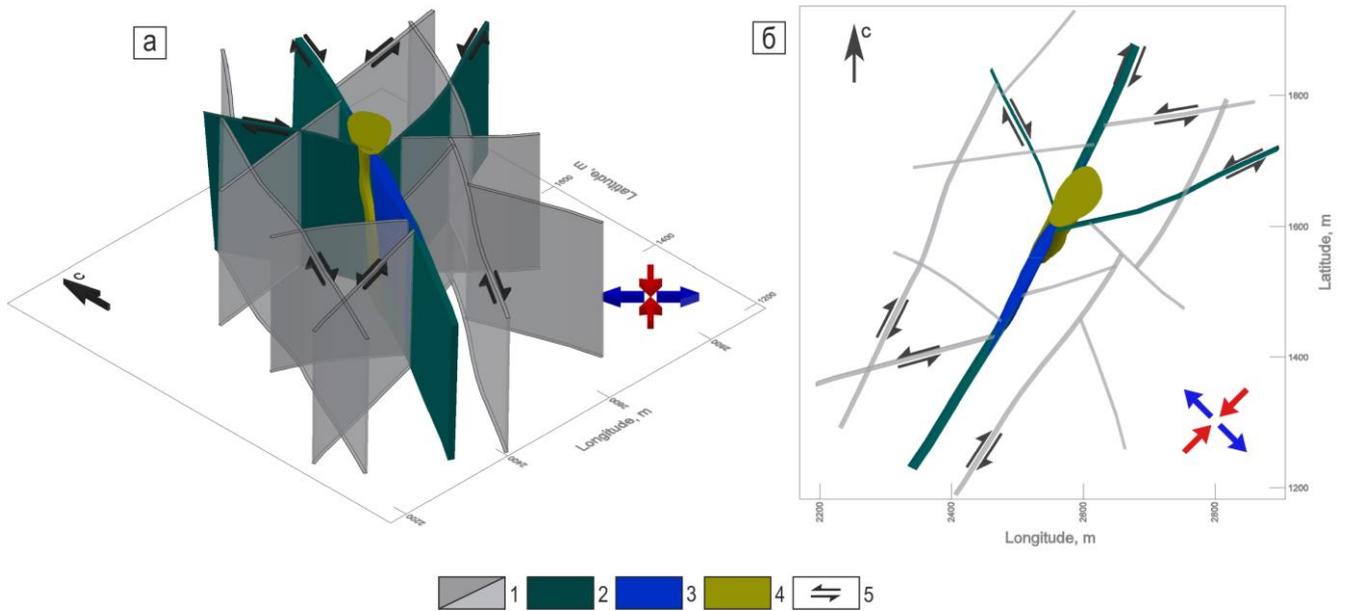


Рисунок 58. Объемная модель второго тектоно-магматического этапа. а – вид с юго-запада; б – вид сверху. 1 – не активизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие рудовмещающую структуру; 3 – кимберлитовое тело первой магматической фазы (ПК); 4 – кимберлитовое тело второй магматической фазы (ЭКБ); 5 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

Структура, сформированная на участке пересечения выделенных разносторонних сдвигов, достаточно длительное время находилась в «открытом» состоянии, о чем свидетельствует высокий процент ксенолитов, дезинтегрированных до мелкообломочного состояния. За этот период интенсивному дроблению были подвержены не только ПК, но и породы карбонатного цоколя, что выражено наличием в пределах сохранившегося тела ЭКБ участков, содержащих до 90-95 % ксенолитов вмещающих отложений.

Наконец, на завершающем третьем магматическом этапе было сформировано тело автолитовой кимберлитовой брекчии, которое по морфологии представляет собой дайку, вытянутую по осевой линии Диагонального разлома (рис. 46, д, е). По простирацию дайка ограничена теми же сегментами разрывов восток-северо-восточной ориентировки, что и дайка ПК первой фазы внедрения, что позволяет сделать вывод о единстве вмещающей структуры первого и последнего этапов (рис. 59). Механизм внедрения АКБ был аналогичен механизму образования пород первой фазы, за исключением того, что на этапе формирования третьей фазы деструкции подверглись в равной мере вмещающие породы, дайка ПК и тело ЭКБ. Это отразилось в присутствии в пределах интрузии АКБ большого количества разноразмерных ксенолитов указанных вещественных комплексов. Самый крупный из таких ксенолитов располагается в центральной части тела АКБ и представляет собой останец дайки ПК первой фазы внедрения (рис. 46, а). Его ненарушенное залегание свидетельствует об обтекании расплавом геологических границ тела ПК.

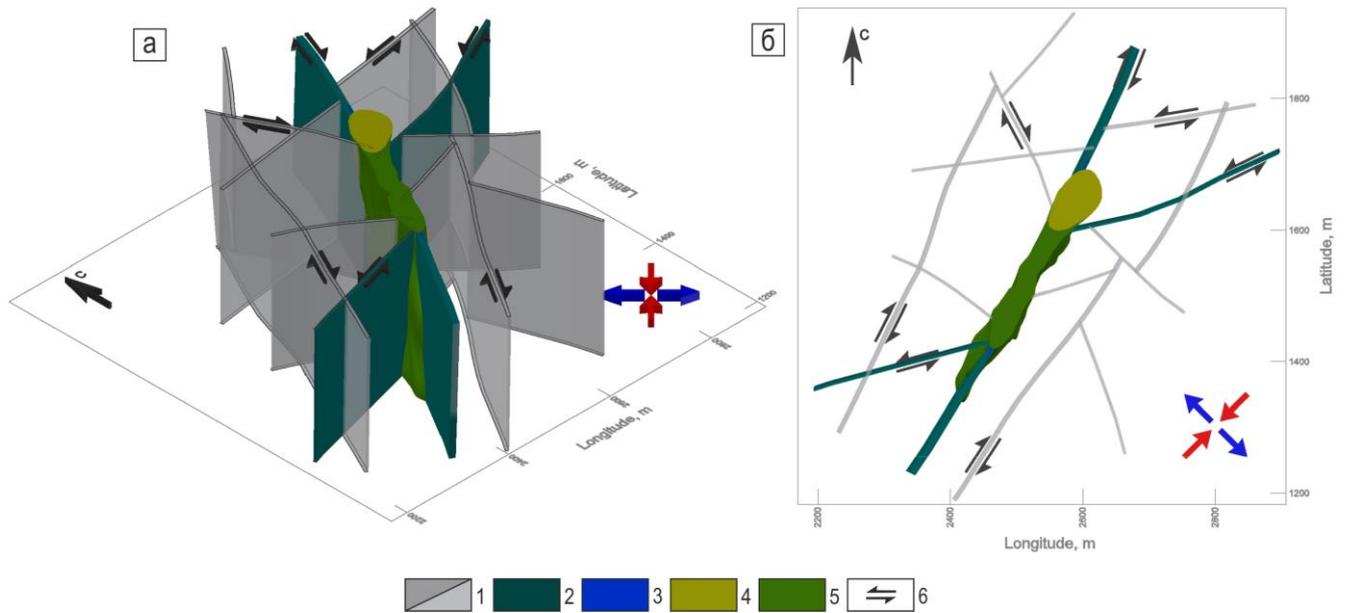


Рисунок 59. Объемная модель третьего тектоно-магматического этапа. а – вид с юго-запада; б – вид сверху. 1 – не активизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие рудовмещающую структуру; 3 – кимберлитовое тело первой магматической фазы (ПК); 4 – кимберлитовое тело второй магматической фазы (ЭКБ); 5 – кимберлитовое тело третьей магматической фазы (АКБ); 6 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

Таким образом, современный облик трубки «Ботуобинская» был сформирован в течение трех этапов тектоно-магматической активизации. Доставка дискретных во времени, но пространственно коррелирующих порций кимберлитового расплава от магматических камер к приповерхностным горизонтам земной коры осуществлялась по рудоконтролирующей зоне, выраженной Дяхтарским разломом. Локализация кимберлитовых тел происходила в структурах присдвигового растяжения. Для начальной и заключительной фаз внедрения в качестве таковых выступали структуры локального растяжения, сформированные на участке сопряжения Диагонального рудовмещающего разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями разрывных нарушений восток-северо-восточного направления. Вторая фаза внедрения была локализована в тройственном узловом пересечении двусторонних сдвигов, образованных Диагональным разломом, а также локальными нарушениями восток-северо-восточной и северо-западной ориентировок.

3.3. Прогнозно-поисковая модель кимберлитовой трубки Накынского поля

На сегодняшний момент весь комплекс алмазопроисковых работ базируется на прогнозно-поисковых моделях, разработанных для всей иерархической цепочки алмазных таксонов, от провинции до трубки, с выделением в каждой из них промежуточных поисковых объектов [Ваганов и др., 1995]. Каждая из моделей включает ряд предпосылок или признаков, отражающих кимберлитонность площади исследования. Это геологические, геофизические,

геохимические, структурно-тектонические, минералогические и др. признаки. Их разрешающая способность и применимость сугубо индивидуальна для каждого таксона и зависит от типа поисковой обстановки. Применительно к Накынскому полю, территория которого относится к «закрытым» по степени обнаженности, а сами трубки в его пределах слабо проявлены в геофизических полях и не образуют поверхностных ореолов рассеяния минералов-спутников алмазов (МСА), наиболее подходящими для целей прогнозирования являются структурно-тектонические предпосылки. В целом их сущность заключается в приуроченности кимберлитовых тел к разломным зонам либо узлам разрывных нарушений определенных направлений, которые могут быть выделены в качестве поисковых объектов. При этом для разработки наиболее полной прогнозно-поисковой модели, основанной на структурных предпосылках, последняя должна содержать в себе информацию не только о пространственной ориентировке разломов, но и учитывать их масштабные характеристики, глубину проникновения, этапы активизации, кинематику, что существенно влияет на контроль кимберлитового магматизма. Для создания подобной модели Накынского поля проведен сравнительный анализ структурно-вещественных моделей эталонных объектов – трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская».

В вещественном плане для каждой из трубок присущи специфические особенности строения как собственно диатрем, так и слагающих их фаз. По морфологии диатрем [Милашев, 1990] трубка «Нюрбинская» относится к группе собственно трубок взрыва с соотношением короткой и длинной осей на разных гипсометрических уровнях от 1:2 до 1:3, а трубка «Ботуобинская» – к группе сплюснуто-трубчатых тел, с соотношением осей 1:5 – 1:10. Диатрема трубки «Нюрбинская» характеризуется постепенным сужением с глубиной и в первом приближении представляет собой обратный конус. Для диатремы трубки «Ботуобинская» свойственно наклонное залегание с падением по длинной оси в юг-юго-западном направлении под углом 70-75°.

Изученные объекты относятся к числу многофазных. В строении трубки «Нюрбинская» выделено 4 фазы внедрения, сформированные в следующей последовательности: порфиновый кимберлит, эруптивная кимберлитовая брекчия, две фазы автолитовой кимберлитовой брекчии, отличающиеся содержанием мантийных и коровых включений. Для трубки «Ботуобинская» установлена та же схема внедрения порций кимберлитового расплава, за исключением завершающей фазы автолитовой брекчии. Фазы порфириновых кимберлитов в обеих трубках сформировали близкие по морфологии тела, представленные дайками, вытянутыми в север-северо-восточном направлении. Морфологические параметры тел остальных фаз в значительной степени варьируют, изменяясь от близизометричных до овально-вытянутых.

Оба кимберлитовых тела локализованы в пределах разломных узлов, имеющих схожее строение. Для трубки «Нюрбинская» узел включает в себя разрывные нарушения север-северо-восточной (Диагональный разлом), восток-северо-восточной (Широтный разлом), северо-восточной (Ботуобинский разлом) и северо-западной ориентировок (рис. 38). Разломы первых трех направлений по протяженности отвечают региональному уровню, а последнего – локальному уровню согласно ранговой шкале дизъюнктивных структур [Лобацкая, 1987]. Для трубки «Ботуобинская» выделены те же основные направления развития разрывных структур, но из них региональному уровню отвечают только дизъюнктивы север-северо-восточного направления, являющиеся продолжением Диагонального разлома. Как известно более протяженные разрывы обладают большей глубиной активного проникновения, амплитудой смещения, зоной динамического влияния [Шерман, 1977; Саньков, 1989]. Следовательно, разломы регионального и более высоких рангов и в еще большей степени узлы их пересечения образуют высокопроницаемые для флюидов зоны, что может являться одной из причин формирования в их пределах наиболее крупных по размеру кимберлитовых тел. Данный вывод справедлив по отношению к изученным объектам, для которых установлено более чем двукратное превосходство в объеме внедрившегося магматического материала трубки «Нюрбинская» над трубкой «Ботуобинская».

Локализация порций кимберлитового расплава для рассматриваемых трубок происходила в структурах присдвигового растяжения двух типов. Первые представляют собой локальные области растяжения, образованные на участках сопряжения Диагонального рудовмещающего разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного направления. В подобных структурах сформированы первые три фазы кимберлитовой трубки «Нюрбинская», а также первая и заключительная фазы трубки «Ботуобинская». Близкие по строению структуры. Остальные генерации кимберлита были внедрены на участках пересечения двусторонних сдвигов, одним из которых в обоих случаях являлся Диагональный разлом. Приуроченность большей части фаз внедрения, в том числе и самых ранних, к структурам растяжения первого типа указывает на их определяющую роль в локальном контроле кимберлитового магматизма исследуемого района.

Выделенные структуры развиты преимущественно в гипабиссальной зоне и отвечают за непосредственную локализацию порций кимберлитового расплава. Его транспортировка от магматических камер к приповерхностным горизонтам происходит по глубинным рудоконтролирующим разломам. Прямая пространственная корреляция рудолокализирующих и рудоконтролирующих структур приводит к созданию весьма благоприятных условий для миграции и локализации расплавов. В таких тектонических зонах магма обладает наиболее

высокой механической активностью, вызванной постоянной подпиткой от магматической камеры [Коробков, 2014], что приводит к формированию крупных месторождений. Подобное наложение структур наблюдается на участке локализации трубки «Нюрбинская», для которой рудоподводящим является Ботуобинский разлом (рис. 60).

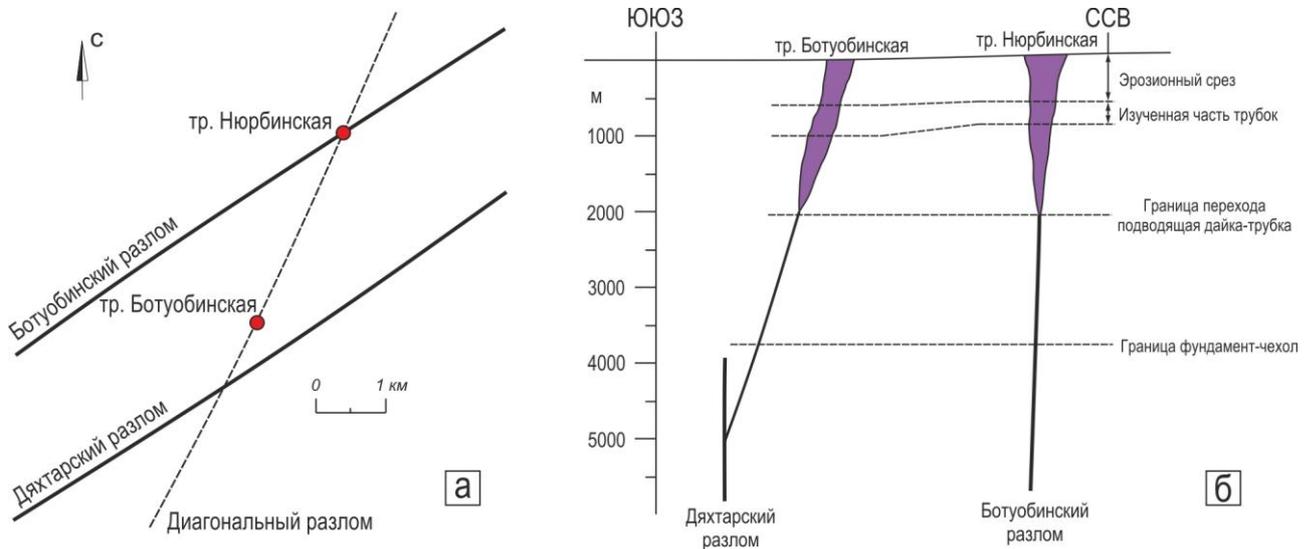


Рисунок 60. а – план расположения рудовмещающего и рудоконтролирующих разломов; б – схематический разрез по осевой линии Диагонального разлома.

Несколько иная картина формирования получена для трубки «Ботуобинская». Структуры, отвечающие за локализацию тела трубки, находятся приблизительно в 500 метрах от осевой линии рудоконтролирующего Дяhtarского разлома (рис. 60, а). При этом известно, что внедрение трубки происходило не строго вертикально, а под наклоном, о чем свидетельствует падение диатремы по длинной оси на юг-юго-запад под углом $70-75^\circ$. Реконструировав форму трубки «Ботуобинская» с учетом эрозионного среза, глубина которого составляет 650 м [Тарабукин и др., 2003] и известных данных о переходе диатремы к подводящему каналу на глубинах порядка 2 км [Hawthorne, 1975; Харьков и др., 1998] установлено, что рудовмещающий разрыв пересекается с подводящим каналом на глубине около 5 км от палеоповерхности (рис. 60, б). Перемещение расплава от магматической камеры до этой глубины происходило по Дяhtarскому разлому, а далее – по наклонной зоне. Это привело к формированию наклонного дайкообразного тела, относительно небольшой мощности и размеров.

Таким образом, кимберлитовые тела могут внедряться как непосредственно над рудоконтролирующей структурой, так и на небольшом удалении от нее в пределах зоны динамического влияния разрыва. По мере удаления предполагается смена кимберлитовых фаций от трубчатой к дайковой и жильной.

Проведенный сравнительный анализ структурно-вещественных моделей трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская» позволяет выделить два главных элемента прогнозно-поисковой модели кимберлитовой трубки Накынского поля.

1) Глубинный рудоконтролирующий разлом обеспечивающий возможность подъема расплава от магматических камер к приповерхностным горизонтам, создавая каналы повышенной проницаемости.

2) Приповерхностная структура присдвигового растяжения, образованная на участках сопряжения разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного направления.

При этом весьма важным фактором является пространственная корреляция выделенных элементов. В случае их расположения на некотором удалении друг от друга по простиранию рудовмещающего разлома могут формироваться условия, благоприятные для внедрения аналогов трубки «Ботуобинская». В случае их полного наложения создаются исключительно благоприятные условия для внедрения магматических тел, в том числе кимберлитовых трубок типа трубки «Нюрбинская».

Выводы по главе 3.

Предложена методика интегрированного подхода к изучению структурных и вещественных особенностей коренных месторождений алмаза. По результатам структурно-вещественного моделирования созданы модели формирования кимберлитовых трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская», отражающие в объемном варианте динамику процессов взаимодействия отдельных фаз рудного тела и рудовмещающей структуры в рамках функционирования единой тектоно-магматической системы. Использование объемного моделирования, как одного из наиболее прогрессивных методов геологического познания, позволило учесть высокую степень изменчивости (анизотропии) вещественных комплексов, слагающих кимберлитовые трубки, а также невыдержанность структурно-морфологических свойств рудовмещающей структуры. Проведенные исследования показали, что рассматриваемые кимберлитовые трубки характеризуются аналогичным внутренним строением, близки по набору вещественных комплексов, сформированы в пределах схожих по строению разломных узлов, а отдельные фазы внедрения локализованы в пределах единых рудовмещающих структур. Полученные результаты позволяют сформулировать первое защищаемое положение: *локализация дискретных порций кимберлитового расплава многофазных трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская» происходила в структурах присдвигового растяжения, образованных на участках сопряжения Диагонального*

рудовмещающего разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного и северо-западного направлений.

Структурная составляющая разработанных моделей использовалась нами как главный критерий при формировании прогнозно-поисковой модели кимберлитовой трубки Накынского поля. Установлено, что определяющее значение в локализации кимберлитовых тел играли узловое сочленения, образованные разрывными нарушениями платформенного чехла север-северо-восточной и восток-северо-восточной ориентировок. Выделенные структуры распространены в гипабиссальной части земной коры и отвечают за формирование диагрен трубок. В качестве рудоподводящих элементов выделены Ботуобинский и Дяхтарский разломы фундамента, которые образуют проницаемые зоны, используемые магмой, в том числе кимберлитового состава, для подъема с глубин ее генерации. В совокупности, указанные структуры составляют единые флюидопроницаемые зоны, благоприятные для формирования кимберлитовых месторождений и выделены нами как поисковые объекты для проведения районирования площади Накынского кимберлитового поля и прилегающей территории на возможность обнаружения месторождений – аналогов трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская». Полученные выводы позволяют обосновать второе защищаемое положение: *в качестве структурных ловушек на территории Накынского поля выступают узлы разрывных нарушений платформенного чехла север-северо-восточного и восток-северо-восточного направлений, пространственно сопряженные с разломами фундамента.*

Глава 4. РАЗРЫВНАЯ ТЕКТОНИКА И СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НАКЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ

4.1. Разломная сеть Накынского кимберлитового поля

Как было показано в завершающей части предыдущей главы прогнозно-поисковая модель кимберлитовой трубки для Накынского поля содержит в своей основе два главных элемента: глубинный разлом и локальную структуру присдвигового растяжения, которые в совокупности формируют в земной коре стволовые проницаемые зоны, благоприятные для миграции расплавов. Структурной основой для применения разработанной модели является схема разрывных нарушений, от полноты которой зависит эффективность прогноза. С этой позиции наиболее кондиционными выглядят схемы, составленные по результатам применения комплекса исследований, включающих разнотипные приемы выделения дизъюнктивов. В представляемой работе используются материалы геофизических исследований Накынского поля, включающие детальную магнито-, электро- и сейсморазведку, выполненные силами БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), дополненные результатами структурного дешифрирования. Первые в большинстве своем направлены на выявление разломов глубокого заложения, которые в геофизических полях выражены линейными среднечастотными аномалиями в гравитационном и магнитном полях, участками с потерей корреляции сейсмических волн, близвертикальными зонами пониженных сопротивлений [Ваганов и др., 1995]. Последние позволяют картировать разрывные нарушения, развитые преимущественно в платформенном чехле и являющиеся поверхностным отражением глубинных структур. Они представлены парагенезисом разрывов 2-го порядка, образующим широкие зоны проявления тектонитов [Семинский К, Семинский Ж, 2016].

4.1.1. Разрывные нарушения, выделяемые по результатам геофизических исследований

В связи с открытием трубки «Ботуобинская» (1994 год) и отнесению Накынской площади к числу высокоперспективных на обнаружение коренных месторождений алмаза ее территория детально изучена с помощью бурения поисково-картировочных скважин и применения комплекса геофизических методов. Поисковые работы выполнены БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) по объектам Промышленный [Пыжьянов, 2004ф], Ханнинский [Спиваков, 2004ф], Нижне-Накынский [Масленникова, 2007ф], Промышленный-3 [Килижеков, 2008ф] и др. По их результатам составлена структурно-тектоническая карта Накынского поля, которая стала

основой для определения разрывной структуры площади исследования (рис. 61). Регулярная сеть поисково-картировочных скважин и геофизических профилей, организованная в пределах Накынского поля, позволила выявить подавляющее большинство разрывных, пликативных и интрузивных структур, которые зачастую сопряжены и составляют единые системы.

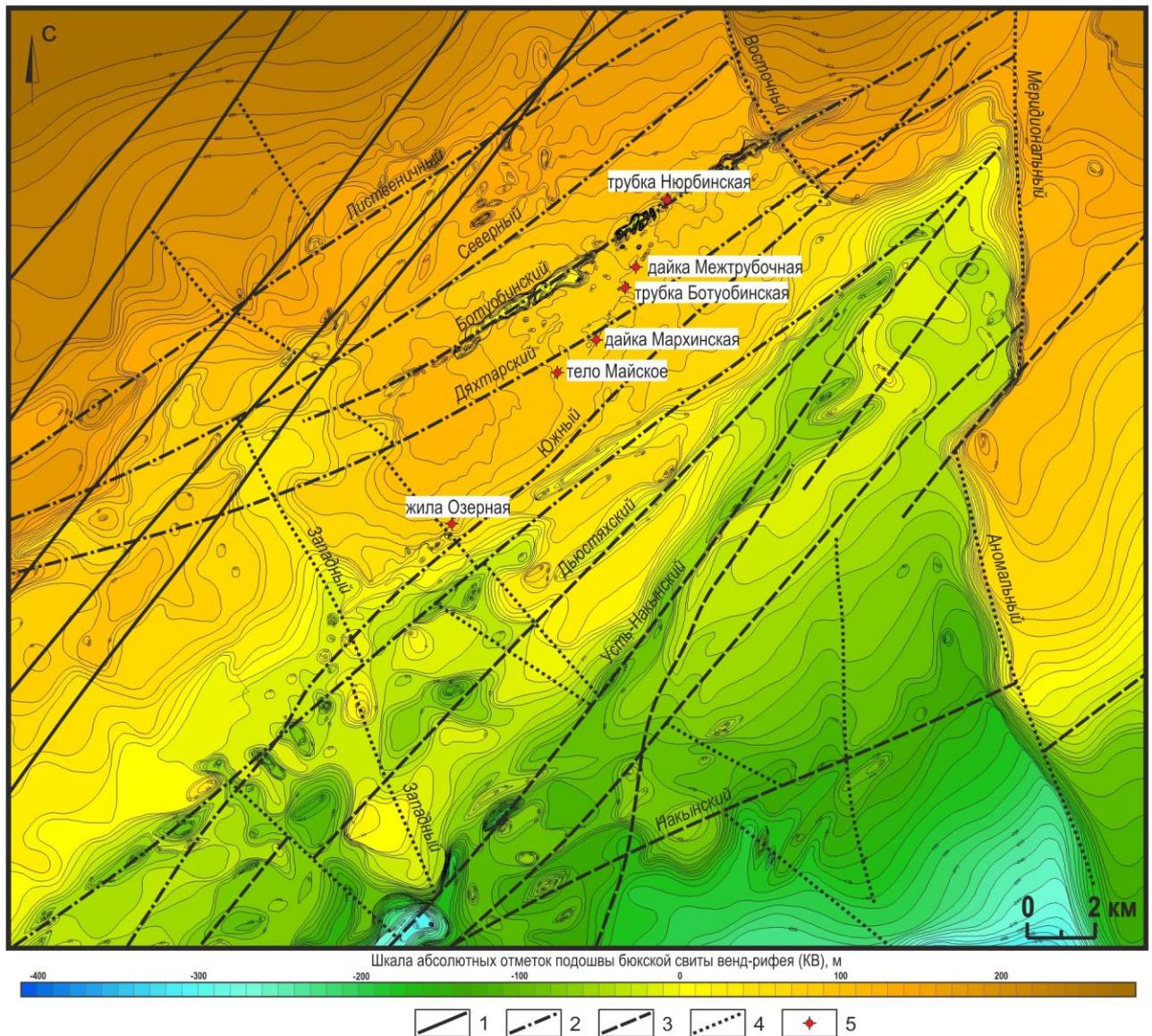


Рисунок 61. Структурно-тектоническая карта Накынского кимберлитового поля (составлена по результатам поисковых работ, выполненных геофизической службой БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО)). 1-3 – разломы Вилюйско-Мархинской зоны: 1 – Лиендокитская ветвь, 2 – Дяхтарская ветвь, 3 – Накынская ветвь; 4 – разломы Средне-Мархинской зоны; 5 – известные кимберлитовые тела.

Согласно проведенным исследованиям на площади Накынского поля выделено две близортогональных крупных разломных зоны – Вилюйско-Мархинская и Средне-Мархинская. Разломы каждой из представленных зон достаточно хорошо прослеживаются в геофизических полях. Поскольку часть разрывов, составляющих зоны, залечены интрузивными телами долеритов, на картах магнитных вариаций они фиксируются в виде положительных аномалий

магнитного поля. При этом наблюдаются аномалии двух типов. Первый тип – узлокальные, линейно выстроенные, протяженные аномалии различной интенсивности. Они связаны с дайками среднепалеозойских долеритов, выходящими или не выходящими на доюрскую поверхность. Второй тип – широкие (1-2 км) линейные и изометричные аномалии интенсивностью до 20 нТл, интерпретируемые как разломы, фрагментарно залеченные дайками долеритов, не выходящие на поверхность нижнепалеозойского цоколя. На временных сейсморазрезах разрывные нарушения представлены зонами потери корреляции, участками разрыва осей синфазности, общим снижением интенсивности волнового поля. Зоны отсутствия корреляции характерны для интродуцированных разломов, а разрывы осей синфазности – для «сухих» разломов. На картах геоэлектрических сопротивлений зоны тектонических нарушений отмечаются как линейные области пониженных значений кажущихся сопротивлений.

Вилуйско-Мархинская зона. Нарушения Вилуйско-Мархинской зоны на площади Накынского кимберлитового поля системно включают в себя три серии (ветви): северо-западную Лиендокитскую, центральную Дяхтарскую и юго-восточную Накынскую (рис. 61).

Лиендокитская ветвь разломов является северо-западной границей Накынского поля. В региональном плане она выражена совокупностью сближенных протяженных даек долеритов со средним азимутом простирания $35-40^\circ$, которые объединены в 3 основные зоны: Бадаран-Лиендокитскую, Южную и Усть-Накынскую. В магнитном поле контрастность этих даек изменяется в широких пределах от 50 до 550 нТл. Согласно [Килижеков, 2008ф] разломы ветви не имеют закономерного расположения по отношению к общему структурному плану кровли кембрийских отложений и лишь в незначительной степени подчеркивают низы структурного перегиба. Ветвь представлена следующими разломами: Лиендокитский-1, 2, 3, 4, и Лиственичный.

Дяхтарская ветвь характеризуется серией прямолинейных гравимагнитных аномалий, имеющих общий азимут простирания $55-60^\circ$ и включает несколько крупных разломов: Северный, Ботуобинский, Дяхтарский, Нюрбинский, Широтный и Южный разломы, а также ряд более мелких структурных форм: разломы Джекиндинский, Южный-1 и Широтный-2. По результатам бурения в зонах разрывных нарушений зафиксированы крупные дайки среднепалеозойских долеритов, объединенных в Моройдан-Тюнгскую, Ханнинскую и Бадаран-Салакутскую зоны. Некоторые исследователи считают, что месторождения Накынского поля локализованы в узлах пересечения разломов данной ветви (разломы «Ботуобинский», «Нюрбинский», «Дяхтарский») с Диагональным рудовмещающим разломом [Масленникова, 2007ф и др.].

Накынская ветвь образована рядом разрывных нарушений, имеющих азимут простирания 60-70° (разломы Накынский, Усть-Накынский, Дьюстяхский, Тастахский). Отличительным признаком этой серии разломов является явное, хотя и слабое, падение сместителей в юго-восточном направлении [Масленникова, 2007ф].

Средне-Мархинская зона. Средне-Мархинская зона на площади Накынского кимберлитового поля представлена серией разрывных нарушений преимущественно северо-западной ориентировки. К их числу относятся Среднемархинский (Чебыдинский), Кулисообразный (Уэен-Уолбинский), Оту-Селингдинский (включая Меридиональный, Широтный и Аномальный участки) и Северо-Западный разломы. Они имеют сложную извилистую морфологию, прерывистое строение, часто смещаются нарушениями Вилуёйско-Мархинской зоны, что указывает на их более древний возраст формирования [Кондратьев, Горев, 2005]. В структуре вмещающих пород их отражением являются протяженные линейные депрессии. Некоторые исследователи наделяют частные разломы этой зоны большой прогностической значимостью. Так согласно [Килижеков, 2008ф] в пределах зоны влияния Среднемархинского разлома находится Накынское кимберлитовое поле, а к западному его продолжению тяготеет Далдынское поле.

Кимберлитовмещающий разлом. Как уже не раз было отмечено, принципиальное значение в контроле кимберлитового магматизма Накынского поля большинством исследователей отдается Диагональному разлому восток-северо-восточной ориентировки. Впервые его фрагменты были выделены в 1994 году по результатам аэромагнитной съемки масштаба 1:10000. Его осевая линия диагонально расположена относительно Северного и Южного разломов, ограничивающих Накынский тектонический блок, откуда он и получил свое название. Характерной особенностью нарушения является очень слабая проявленность в геофизических полях, малая амплитуда подвижек и отсутствие интрузирующих даек. По комплексным геофизическим данным Диагональный разлом имеет сложное кулисообразное строение. В волновом поле он выражен линейными субвертикальными зонами потери корреляции отраженных волн с небольшими амплитудами смещения отражающих горизонтов (до 3-5 м). По данным электроразведки фиксируется широкой (до 1200 м) зоной низкоомных пород (700 Ом*м), представленной на вертикальных разрезах в виде чашеобразной структуры. В осадочном чехле не имеет четко выраженной ленточной структуры. Его центральная ветвь, представленная разломом Диагональный-1, выделена по результатам интерпретации временных разрезов сейсморазведки между Дяхтарским и Южным разломами в виде нескольких зон нарушения волнового поля. В электрическом поле ему соответствует линейная узлокальная зона пониженных сопротивлений, шириной около 200-400 м. В поле силы тяжести разлом

выделяется цепочкой отрицательных аномалий, которые обусловлены разуплотнением пород за счет их выветрелости и трещиноватости.

Таким образом, за длительный период изучения разрывной структуры Накынского поля с применением геофизических методов выявлены и охарактеризованы многочисленные протяженные разломные зоны, составляющие раму региональных разрывов, входящих в Виллойско-Мархинскую и Средне-Мархинскую зоны глубинных разломов. Они контрастно проявлены в геофизических полях в виде линейных аномалий, имеют большую протяженность, высокую концентрацию на площади и могут играть роль рудоподводящих структур. В то же время, несмотря на высокую детальность проводимых исследований, разрешающая способность геофизических методов применительно к платформенным условиям недостаточна для выявления всего ансамбля разноранговых разрывных структур и в особенности для тех, которые распространены в осадочном чехле. В геофизических полях слабо или вовсе не проявлены разломы не интродуцированные, не имеющие больших амплитуд вертикальных смещений, а также перекрытые трапповыми интрузиями. Это с учетом слов В.А. Милашева о том, что «...подавляющее большинство кимберлитолокализующих разломов характеризуются отсутствием значительного смещения толщ и, кроме того, не сопровождается внедрением крупных порций некимберлитовых магматических расплавов» [Милашев, 1979, с. 39], а также представленных ранее данных о различиях в строении разрывной сети в фундаменте и платформенном чехле свидетельствует о недостаточном количестве информации о дизъюнктивах, установленных геофизическими методами и, как следствие, неполноте разломной схемы. Для восполнения пробелов в схеме и выделения нарушений, которые могли остаться неоткартированными по результатам геофизических исследований, нами проведено структурное дешифрирование территории Накынского поля, основные результаты которого отражены в следующем разделе.

4.1.2. Результаты структурного дешифрирования Накынского кимберлитового поля

Возможности структурного дешифрирования, как дополнительного источника информации о трещинно-разломном строении участков земной коры, детально описаны в работах [Гольбрайх и др., 1968; Амурский и др., 1988]. Согласно им «... изучение мегатрещиноватости дает более полную характеристику разрывной сетки, поскольку даже в хорошо обнаженных районах не могут быть выявлены геологическими методами все разрывы и трещинные зоны» [Гольбрайх и др., 1968, с. 135]. Опираясь на данный постулат нами, с целью уточнения разломного строения сети исследуемой площади, были выполнены работы по структурному дешифрированию. В качестве исходных материалов использовались листы

государственных топографических карт масштаба 1:100 000, серия Q-50, номера 101, 102, 103, 104, 113, 114, 115, 116.

В связи со сложным геоморфологическим строением территории Накынского поля и повышенной заболоченностью основными элементами дешифрирования были спрямленные участки русел временных и постоянных водотоков, уступы в рельефе, мелкая зональность в ландшафте. Проанализировав их пространственное положение, получена следующая картина распределения локальных линеаментов (рис. 62, пунктирные линии).

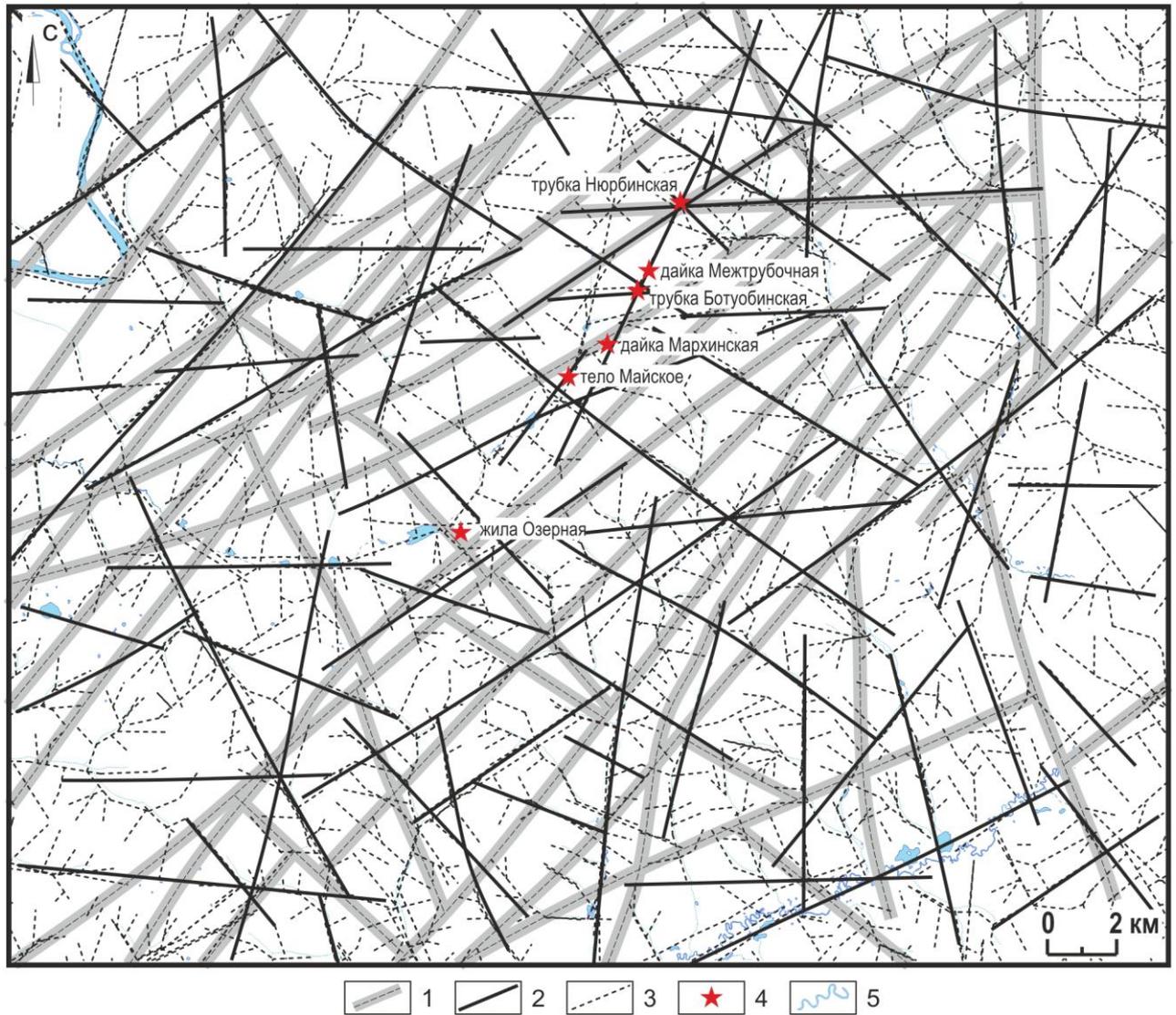


Рисунок 62. Схема разрывных нарушений Накынского кимберлитового поля и прилегающей территории. 1 – разломы фундамента, выделенные по результатам интерпретации геофизических материалов; 2 – разломы осадочного чехла, выделенные по результатам структурного дешифрирования; 3 – линеаменты; 4 – известные кимберлитовые тела; 5 – гидросеть.

Она содержит многочисленные разноориентированные непротяженные мегатрещины и в значительной степени повторяет контур гидросети района. Для определения преимущественных направлений развития сети трещин построена роза-диаграмма (рис. 63, б).

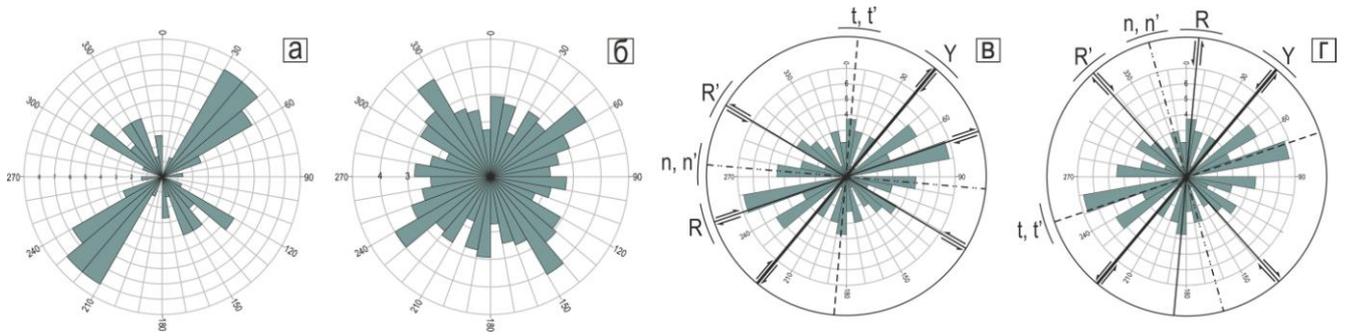


Рисунок 63. Розы-диаграммы простираний разломов фундамента (а), линеаментов (б) и интерпретация совокупности платформенных структур в рамках праводвигового (в) и леводвигового (г) парагенезисов. Y – магистральный сместитель, R и R' – сколы Риделя, t и t' – разрывы сжатия, n и n' – разрывы растяжения.

Представленная схема (рис. 62), а также роза-диаграмма простираний выделенных линеаментов (рис. 63, б) показывает, что в платформенном чехле Накынского кимберлитового поля и прилегающей территории в рельефе наиболее отчетливо отражены линеаменты, образующие две близортогональные системы. Первая представлена мегатрещинами северо-восточного и северо-западного простираний, которые в целом сонаправлены с разрывными структурами фундамента (рис. 63, а), входящими в Вилуйско-Мархинскую и Средне-Мархинскую зоны глубинных разломов. Вторая система состоит из линеаментов субширотной – субмеридиональной ориентировок. Они характеризуют менее масштабные, оперяющие разрывные структуры второго порядка, но при этом носящие важное прогностическое значение, поскольку к их числу относят Диагональный и Широтный разломы, которые образуют рудоконтролирующие структуры для изученных трубок Накынского поля.

При дальнейшем рассмотрении полученной схемы (рис. 62) было установлено, что на ней выделяется ряд упорядоченных систем линеаментов, которые образуют линеаментные пояса (рис. 62, сплошные линии). В нашем понимании такие линейные зоны отождествляются с разрывными нарушениями. Поскольку исследуемый район территориально располагается в центральной части Сибирской платформы, которая характеризуется устойчивым режимом развития без крупных структурных перестроек, это могут быть как разломы осадочного чехла, так и разломы фундамента. Сравнительный анализ выделенных структур фундамента и чехла показал, что большая часть нарушений имеют близкие ориентировки, но располагаются на некотором удалении, что, как уже отмечалось, связано с вертикальной зональностью в строении разломов. Для части разрывных нарушений характерно телескопирование, т.е. прямое пространственное наложение осевых линий, как, например, для Ботуобинского, Лиендокитского и некоторых других разломов (рис. 62).

Формирование разрывных структур платформенного чехла происходило в результате движения по разрывам фундамента, входящим в Вилуйско-Мархинскую зону, о чем

свидетельствует их значительная протяженность (более 800 км), линейность, высокая концентрация. При этом кинематика движений отвечала сдвиговым перемещениям, поскольку именно сдвиги обладают максимальной проникающей способностью [Уткин, 1989], что обеспечивает возможность подъема магматических расплавов, в том числе кимберлитовых, с больших глубин. Косвенным признаком этому служит выполнение осевых зон разрывных нарушений магматитами преимущественно базитового состава, образующих Вилуйско-Мархинский рой даек [Киселев и др., 2014]. Отсюда, возникновение платформенных дизъюнктивов связано со сдвиговыми перемещениями по разломам Вилуйско-Мархинской зоны, частные нарушения которой выступают в качестве магистральных сместителей. Парагенетический анализ совокупности разрывов чехла [Семинский, 2003; Семинский и др., 2005] показал, что их формирование происходило в два этапа, отличающихся направлением движения крыльев разломов. На первом в результате правосдвиговых перемещений по нарушениям фундамента были образованы разрывные структуры восток-северо-восточной и запад-северо-западной ориентировок, отражающие положение сколов Риделя (R' и R), а также ортогональные системы разрывов север-северо-восточного и субширотного простираний, отвечающие t , t' и n , n' разрывам (рис. 63, в). На втором этапе при смене векторов движения по разломам Вилуйско-Мархинской зоны на противоположное, наряду с формированием нового парагенезиса (север-северо-западные n , n' -разрывы), большую роль сыграла трансформация ранее образованных структур: разрывы t и t' были преобразованы в R -сколовые нарушения (рис. 63, г). При этом произошла смена кинематики движения со взбросовой, характерной для t -разрывов на сдвиговую, присущую нарушениям R -типа. Кинематические характеристики разрывных нарушений север-северо-восточного, восток-северо-восточного и северо-западного направлений на данном этапе полностью соответствуют таковым, полученным при изучении эталонных объектов (трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская»). То есть именно с этим этапом необходимо связывать формирование структур, благоприятных для локализации кимберлитовых тел.

Представленная выше интерпретация формирования разрывной сети Накынского поля подтверждается результатами физического моделирования на эквивалентных материалах [Черемных и др., 2017]. Согласно полученным авторами данным разрывные структуры платформенного чехла могли образоваться в результате реверсных сдвиговых перемещений блоков фундамента по разломам Вилуйско-Мархинской зоны. При этом картина распределения разломов, наиболее близкая к природной, возникает в случае параллельности простирания Южного разлома и векторов смещения блоков.

По всей видимости, в истории развития рассматриваемой территории подобные реверсные сдвиговые обстановки возникали неоднократно, на что указывает достаточно сложная картина распределения линеаментов, отражающих наименее масштабные структурные формы (рис. 63, б). Причинами высокой тектонической и, как следствие, магматической активности могли быть крупные события, происходящие в пределах Вилуйской рифтовой системы [Киселев и др., 2014], на западном плече которой территориально располагается Накынский блок.

Таким образом, в платформенном чехле Накынского кимберлитового поля наиболее отчетливо проявлены разрывные структуры восток-северо-восточного, северо-восточного и северо-западного направлений с подчиненным значением нарушений других ориентировок. Они являются производными сдвиговых перемещений блоков фундамента по глубинным разломам Вилуйско-Мархинской зоны.

4.2. Локальный прогноз коренных месторождений Накынского кимберлитового поля

Несмотря на длительный период проведения геолого-разведочных работ (более 20 лет) и их высокую степень детальности перспективы коренной алмазоносности Накынского кимберлитового поля не исчерпаны выявленными к настоящему времени кимберлитовыми телами. Наличие высококонтрастных ореолов индикаторных минералов кимберлитов и аномальных точек, содержащих повышенные концентрации пиропов, хромшпинелидов с высокой степенью сохранности, а также находки микрообломков кимберлитов по отдельным пробам из поисковых скважин указывают на возможность обнаружения в пределах исследуемого района новых коренных месторождений алмазов. Для установления их пространственной позиции в представляемой работе использовалась прогнозно-поисковая модель, базирующаяся на структурных предпосылках (см. раздел 3.3), а основой для прогнозных построений послужила схема разрывных нарушений Накынского кимберлитового поля и прилегающих территорий, полученная путем комплексирования результатов геофизических исследований и результатов структурного дешифрирования (см. раздел 4.1.2, рис. 62). В качестве структурных ловушек, согласно разработанной модели, на территории Накынского поля выступают узлы разрывных нарушений платформенного чехла север-северо-восточного и восток-северо-восточного направлений, пространственно коррелирующие с глубинными разломами фундамента. На рассматриваемой территории таких узлов – т.е. структур, гипотетически могущих вмещать кимберлитовые трубки, было выделено восемь (рис. 64).

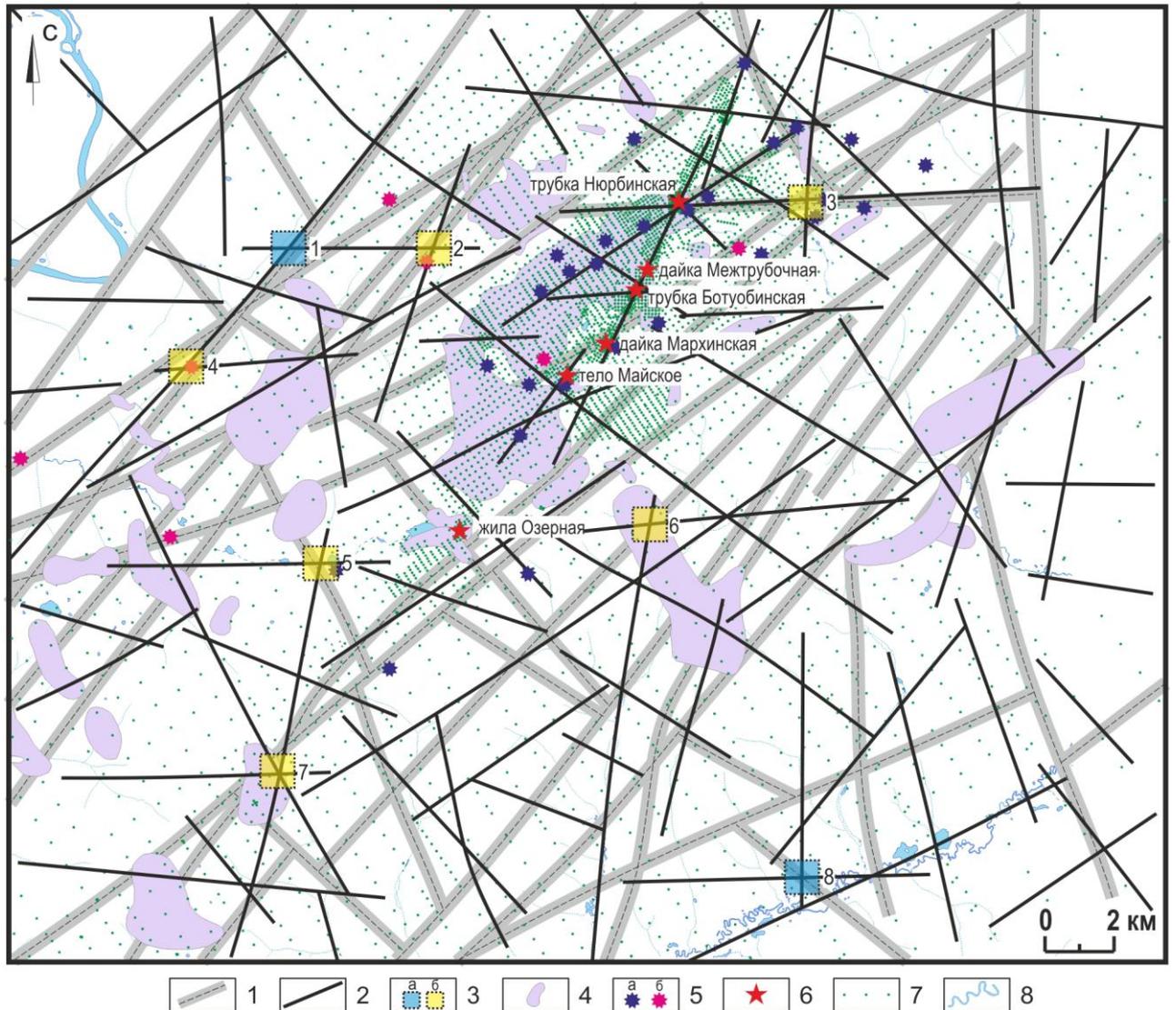


Рисунок 64. Схема разломного строения Накынского кимберлитового поля и прилегающих территорий с прогнозными участками. 1 – разломы фундамента; 2 – разломы осадочного чехла; 3 – прогнозные участки: а - выделенные на основе структурных признаков, б - выделенные по комплексу признаков; 4 – ореолы МСА; 5 – проявления: а - брекчий щелочных базитов [по Игнатов и др., 2010], б - эксплозивных брекчий [по рабочим материалам БГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО)]; 6 – известные кимберлитовые тела; 7 – сеть поисковых скважин; 8 – гидросеть.

Их прогнозный потенциал (степень перспективности) определялся с использованием как собственно структурных предпосылок: максимальное соответствие узлов модельным представлениям, прямая корреляция с глубинными структурами и др., так и применяя магматические и шлихоминералогические признаки. К числу последних относится, прежде всего, пространственное взаимоотношение выделенных перспективных участков с ореолами распространения минералов спутников алмаза (МСА), зафиксированных в базальном горизонте мезозойских отложений – укугутской свите ранней юры. При этом учитывались палеогеографические и литолого-фациальные условия их формирования. Согласно имеющимся данным ореолы рассеяния МСА и россыпи ближнего сноса известных кимберлитовых тел

контролируются Дюлюнг-Дяхтарской депрессией, вытянутой в северо-восточном направлении [Килижеков, 2017], а снос материала происходил преимущественно в юго-западном направлении по пути развития временных и постоянных палеоводотоков. Следовательно, положение перспективного участка в непосредственной близости с ореолом, либо на небольшом удалении на северо-восток является максимально благоприятным. Дополнительным фактором, увеличивающим прогнозный потенциал площади, является наличие в их пределах магматических образований некимберлитовой природы – брекчий щелочных базитов, которые, как известно, имеют с кимберлитовыми трубками близкую пространственную связь, схожие механизм образования и морфологию тел.

С учетом вышеперечисленного, наиболее перспективными по комплексу признаков являются участки со второго по седьмой (рис. 64).

Участок № 7 располагается на юго-западе площади в 10 км от жилы Озерная. Он представляет собой сложнопостроенный узел разрывных нарушений, в который помимо модельных разрывов восток-северо-восточного и север-северо-восточного направлений входит также дизъюнктив северо-западной ориентировки. Он наиболее полно повторяет строение разломных узлов, контролирующих трубки «Ботубинская» и «Нюрбинская». В качестве рудоподводящего разлома выступает один из глубинных дизъюнктивов Дяхтарской ветви Вилуйско-Мархинской зоны (рис. 61). К выделенной перспективной структуре приурочен небольшой ореол МСА, вытянутый в юго-западном направлении.

Также к числу высокоперспективных нами отнесен участок № 6, находящийся юго-восточнее тела Майское, в 4 километрах от него. В его строении принимают участие локальные разрывы восток-северо-восточного и север-северо-восточного направления. Последний является одной из ветвей Диагонального рудоконтролирующего разлома. Структурой глубинного заложения является Дьюстяхский разлом, принадлежащий Накынской ветви ВМЗ. По волновому облику разлом представляет собой расширяющуюся кверху грабенообразную структуру, подобную Ботубинскому и Дяхтарскому разломам, позиционирующимся как рудоподводящие для известных кимберлитовых тел [Масленникова, 2007ф]. Выделенная структура располагается в пределах линейно-вытянутого в юго-восточном направлении ореола МСА. Пространственно он коррелирует с Дяхтар-Уолбинской депрессией, прослеживающейся от р. Ханья до среднего течения р. Накын.

Участки № 2, 3, 4 и 5 также полностью отвечают требованиям прогнозной модели. В их пределах наблюдаются узловое сочленения разрывов платформенного чехла, телескопирующиеся с разломами фундамента, системно входящими в Лиендокитскую ветвь

ВМЗ. Также в их пределах наблюдаются тела брекчий базитов, которые могут ассоциировать с проявлениями кимберлитового магматизма.

Оставшиеся участки, № 1 и 8 располагаются за пределами шлиховых ореолов, в их границах не наблюдается проявлений эксплозивного вулканизма и выделены они только на основе структурных предпосылок, в связи с чем данные участки отнесены к разряду менее перспективных.

Выполненные прогнозные построения позволили локализовать на площади Накынского кимберлитового поля восемь участков перспективных на обнаружение коренных месторождений алмаза. Для уверенного подсечения искомого объекта наиболее эффективным методом будет являться поисковое бурение по определенной сети. Учитывая неравномерную опосредованность площади горнобуровыми работами, а также относительно небольшие линейные размеры наиболее крупных кимберлитовых тел поля (трубка «Нюрбинская» 360 x 175 м, а трубка «Ботуобинская» 260 x 70 м) в пределах прогнозных участков необходимо реализовать сеть бурения 100 x 100 м. Глубина проходки скважин должна составлять не менее 80 метров, что соответствует средней мощности перекрывающих отложений.

Выводы по главе 4.

Площадные структурно-тектонические исследования территории Накынского кимберлитового поля с использованием результатов геофизических исследований, а также результатов структурного дешифрирования позволили выявить разномасштабные элементы разрывной сети, распространенные на разных уровнях земной коры. Подтверждено, что в фундаменте развиты дизъюнктивы двух близортогональных зон – Виллойско-Мархинской северо-восточного и Средне-Мархинской северо-западного направления. Они играют роль магмапроводов и отвечают за транспортировку расплавов к приповерхностным горизонтам, в пределах которых помимо выделенных направлений разломов развиты структуры север-северо-восточной и восток-северо-восточной ориентировок, имеющих первостепенное прогностическое значение. Результаты практического применения полученных выводов положены в основу третьего защищаемого положения: *разработана прогнозно-поисковая модель, с помощью которой оценены остаточные перспективы коренной алмазоносности Накынского поля и выделены восемь участков перспективных по структурным предпосылкам на обнаружение новых кимберлитовых тел.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе нашли отражение результаты комплексного подхода к детальному изучению структурной и вещественной позиции коренных месторождений Накынского кимберлитового поля – трубок «Нюрбинская» и «Ботуобинская». Структурная составляющая изучалась посредством применения геолого-структурных и тектонофизических методов, направленных на выявление особенностей разрывной сети и полей тектонических напряжений в пределах участков локализации кимберлитовых тел. Проведенные исследования показали, что определяющую роль в строении структур, контролирующих кимберлитовые трубки Накынского поля, играют узловые сочленения субвертикальных разрывов платформенного чехла север-северо-восточного, восток-северо-восточного и северо-западного направлений.

Исследования минералого-петрографических особенностей и специфики алмазности различных генераций кимберлита, слагающих трубки «Нюрбинская» и «Ботуобинская», позволили восстановить морфологию и пространственное положение каждого из выделенных комплексов как в современном срезе, так и на этапе внедрения. Комплексный анализ результатов моделирования разрывной структуры и особенностей вещественного строения позволил выявить основные черты структурно-вещественной организации рудоносной системы и определить этапность проявления процессов тектоно-магматической активизации, приведшей к образованию кимберлитовых трубок, что нашло отражение в эволюционных моделях эталонных объектов Накынского поля. Согласно полученным моделям формирование трубок происходило в приповерхностных структурах присдвигового растяжения, образованных на участках сопряжения разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного и северо-западного направлений в результате нескольких этапов тектоно-магматической активизации. При этом доставка дискретных порций кимберлитового расплава от источника происходила по глубинным разломам, выступающим в качестве каналов повышенной проницаемости. В совокупности выделенные дизъюнктивные элементы представляют собой структуры, благоприятные для локализации кимберлитовых тел и составляют прогнозно-поисковую модель Накынского кимберлитового поля.

Анализ результатов геофизических исследований площади Накынского поля в совокупности с данными, полученными по результатам структурного дешифрирования топографических материалов, позволил определить особенности строения сети разрывных нарушений развитых в пределах фундамента и осадочного чехла изучаемой территории, что

отражено в схеме разрывных нарушений. Разрывы фундамента образуют близортогональную сеть, представленную дизъюнктивами северо-восточной (Вилуйско-Мархинская зона) и северо-западной (Средне-Мархинская зона) ориентировки. В платформенном чехле, к указанным направлениям разрывов добавляются нарушения север-северо-восточного и восток-северо-восточного простираний, имеющие определяющее прогностическое значение для рассматриваемой территории.

Применение разработанной прогнозно-поисковой модели совместно с уточненной схемой разрывных нарушений дало возможность оценить остаточные перспективы коренной алмазности Накынского поля и выделить в его пределах восемь участков, перспективных по структурным предпосылкам на обнаружение новых кимберлитовых тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абельский, А.М. К вопросу о закономерностях пространственного размещения кимберлитовых тел на северо-востоке Сибирской платформы / А.М. Абельский // Прогнозирование и методы поисков месторождений никеля, олова и алмазов в Советской Арктике. – 1968. – С. 77-78.

Агашев, А.М. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции / А.М. Агашев, Н.П. Похиленко, А.В. Толстов, В.В. Поляничко, В.Г. Мальковец, Н.В. Соболев // ДАН, 2004, т. 399, № 1, с. 95-99.

Амурский, Г.И. Дистанционные методы изучения тектонической трещиноватости пород нефтегазоносных территорий / Г.И. Амурский, Г.А. Абраменок, М.С. Бондарева, Н.Н. Соловьев. – М.: Недра. – 1988. – 164 с.

Арсеньев, А.А. О закономерности размещения кимберлитов в восточной части Сибирской платформы / А.А. Арсеньев // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 137, № 5. – С. 1170-1173.

Арсеньев, А.А. Трещинная тектоника и алмазоносность восточной части Сибирской платформы / А.А. Арсеньев // Геология алмазных месторождений. Серия геологическая – 1963. – № 9. – С. 39-44.

Артюшков, Е.В. Механизм подъема с глубины кимберлитовых магм / Е.В. Артюшков, С.В. Соболев // ДАН. – 1977. – Т. 236. – № 3.

Атласов, И.П. Тектоника северо-восточной части Сибирской платформы / И.П. Атласов // Тектоника северо-восточной части Сибирской платформы и Предтаймырского прогиба. – Л., Гостоптехиздат. – 1960. – С. 3-169. – (Тр. НИИГА. т. 106).

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.

Балакшин, Г.Д. Строение фундамента в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе / Г.Д. Балакшин, Р.А. Пляскина // Геология и геофизика. – 1970. – № 6. – С. 95-103.

Барышев, А.С. Физико-геологическая модель кимберлитового поля и оптимальный комплекс геологических, геофизических и геохимических прогнозно-поисковых критериев / А.С. Барышев // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. – Мирный, 1998. – С. 233-235.

Биезайс, Я.Я. Геолого-геофизическая модель Мирнинского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции / Я.Я. Биезайс, Е.И. Борис, Л.В. Максимкина // Проблемы алмазоносной геологии и некоторые пути их решения. – 2001. – Воронеж. – С. 4-18.

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.

Бобриевич, А.П. Некоторые данные по геологии и петрографии сибирских кимберлитов / А.П. Бобриевич, Б.М. Крятов, В.Н. Щукин // Алмазы Якутии. Петрография, минералогия и геология. – 1961. – Серия геологическая. – № 6. – С 24-36.

Божевольный, И.И. Закономерности размещения среднепалеозойских кимберлитовых полей юго-восточной части Якутской алмазоносной провинции / И.И. Божевольный, С.Д. Черный // Отечественная геология. – 1997. – № 5. – С. 7-9.

Божевольный, И.И. Перспективы выявления новых кимберлитовых тел в юго-восточной части Якутской алмазоносной провинции / И.И. Божевольный, А.В. Минаков, С.Д. Черный, В.Е. Якутин // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов и других полезных ископаемых. – 1998. – Мирный: изд. МГТ – С. 235-237.

Боланев, В.С. Отчет о результатах детальной разведки коренных месторождений алмазов – кимберлитовых трубок Нюрбинская и Ботуобинская в 1994-2000 гг. / В.С. Боланев, В.И. Сафьянников и др. – Мирный, 2000.

Борис, Е.И. Особенности проявления глубинных разломов в чехлах древних платформ / Е.И. Борис // Геология промежуточных коллекторов алмазов. – 1991.

Брахфогель, Ф.Ф. Возраст кимберлитовых магматитов – основа прогнозирования алмазоносности территорий / Ф.Ф. Брахфогель, А.И. Зайцев, Э.А. Шамшина // Отечественная геология. – 1997. – № 9. – С. 20-24.

Бушков, К.Ю. Структура Накынского кимберлитового поля и признаки скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.11 / К.Ю. Бушков. – М.: РГГРУ, 2006.

Ваганов, В.И. Алмазные месторождения России и мира / В.И. Ваганов. – М.: Геоинформмарк. – 2000. – 371 с.

Ваганов, В.И. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ / В.И. Ваганов, П.Ф. Иванкин, П.Н. Кропоткин и др. – М.: Наука, 1985. – 200 с.

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.

Василенко, В.Б. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) / В.Б. Василенко, Н.Н. Зинчук, Л.Г. Кузнецова // Вестник Воронеж. ун-та. Сер. геология. – 2000. – Вып. 9. – С. 37-55.

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.

Вольфсон, Ф.Н. Структуры рудных полей и месторождений (Учебное пособие) / Ф.Н. Вольфсон, П.Д. Яковлев. – М.: Недра, 1975. – 271 с.

Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. Т. 3. Р–Я. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – 440 с.

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

Гладков, А.С. Внутреннее строение и кинематика зон кимберлитовмещающих разломов Сибирской платформы / А.С. Гладков // Области активного тектоногенеза в современной и древней истории Земли. Т. 1. – Мат-лы. XXXIX тект. совещ. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 157-159.

Гладков, А.С. Структурно-вещественная модель становления кимберлитовой трубки Нюрбинская (Средне-Мархинский район Якутской алмазоносной провинции) / А.С. Гладков, Д.А. Кошкарев, А.В. Черемных, Ф. Жоао, М.А. Карпенко, М.В. Марчук, И.А. Потехина // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7. – №3. – С. 435-458.

Гладков, А.С. Тектонофизические исследования при алмазопроисковых работах. Методическое пособие / А.С. Гладков, С.А. Борняков, А.В. Манаков, В.А. Матросов. – М.: Научный мир. – 2008. – 175 с.

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.

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.

Гринсон, А.С. Формирование и размещение кимберлитов восточной части Сибирской платформы в связи с особенностями ее глубинного строения / А.С. Гринсон // Известия Академии Наук СССР. Серия геологическая. – № 3. – 1984.

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

Дукардт, Ю.А., Контроль кимберлитового вулканизма Якутской алмазоносной провинции палеорифтовыми структурами / Ю.А. Дукардт, Е.И. Борис // Отечественная геология. – 1996. – № 10. – С. 28-34.

Дукардт, Ю.А. Структурно-тектонические особенности размещения кимберлитов на древних платформах / Ю.А. Дукардт, Е.И. Борис // Прогнозирование и поиски коренных алмазных месторождений. – 1999. – Симферополь. – С.10-14.

Духовский, А.А. Связь кимберлитовых образований со структурами Анабарского мегаблока / А.А. Духовский, Н.А. Артамонова, Г.М. Беляев, К.Н. Никишов // Советская геология. – 1986. – № 9. – С. 79-88.

Егоров, К.Н. Структурно-вещественная эволюция и алмазоносность многофазной кимберлитовой трубки «Комсомольская» (Алакит-Мархинское поле, Якутия) / К.Н. Егоров, Д.А. Кошкарёв, А.С. Гладков // Отечественная геология. – 2015. – № 3. – С. 16-23.

Еременко, А.В. О механизме формирования кимберлитовых диатрем Архангельской алмазоносной провинции / А.В. Еременко // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2003. – № 1. – С. 160-165.

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

Зведер, Л.Н. К вопросу о природе разрывов на Даалдынском кимберлитовом поле / Л.Н. Зведер, В.Н. Щукин // Геология и геофизика. – 1960. – С. 132-134.

Зведер, Л.Н. Структуры Даалдын-Алакитского кимберлитового поля и некоторые закономерности распределения коренных месторождений алмазов / Л.Н. Зведер // Материалы по геологии Восточной Сибири. Инф. сборник № 2. – Иркутск. – 1959. – С. 97-106.

Земнухов, А.Л. Базитовый магматизм Ханья-Накынского междуречья (Якутия) / А.Л. Земнухов, А.И. Зайцев, А.Г. Копылова, М.Д. Томшин, Ю.Т. Яныгин // Геология алмаза – настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). – Воронеж: Воронежский государственный университет. – 2005. – С. 482-493.

Зуев, В.М. Структуры, контролирующие положение кимберлитов Среднемархинского района / В.М. Зуев, С.М. Безбородов, С.Д. Черный, Ю.Т. Яныгин, Ю.Д. Молчанов, П.А.

Игнатов, Я.И. Штейн // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. – Мирный, 1998. – С. 260-262.

Игнаткин, Е.И. Теплопроводность кимберлитов / Е.И. Игнаткин, С.К. Оникиенко, М.А. Афанасьева, А.Ю. Шишков // Изв. вузов. Геол. и разведка. – 1989. – № 2. – С. 145-147.

Игнатов, П.А. Ареал брекчий базитов Накынского кимберлитового поля / П.А. Игнатов, К.Ю. Бушков, К.В. Новиков, А.В. Толстов // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – № 2. – 2010. – С. 31-36.

Игнатов, П.А. Геологические и минералого-геохимические признаки структур, контролирующих алмазоносные кимберлиты Накынского поля Якутии / П.А. Игнатов, К.Ю. Бушков, Я.И. Штейн, А.В. Толстов, Ю.Т. Яныгин // Руды и металлы. – 2006. – № 4. – С. 59-67.

Игнатов, П.А. Картирование скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур в Накынском поле / П.А. Игнатов, К.Ю. Бушков, А.В. Толстов, Ю.Т. Яныгин // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях. – 2008. – Якутск. Изд. ЯНЦ СО РАН. – С. 325-331.

Игнатов, П.А. Типы локальных структур, контролирующих кимберлиты центральной Якутии / П.А. Игнатов, Я.И. Штейн // Руды и металлы. – 1997. – № 6. – С. 61-66.

Игнатов, П.А. Особенности палеотектонического положения различных структурно-морфологических типов кимберлитовых тел Накынского поля / П.А. Игнатов, К.Ю. Бушков, Я.И. Штейн и др. // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (алмазы-50). – СПб.: ВСЕГЕИ. – 2004. – С. 151-154.

Килижеков, О.К. Отчет о результатах поисков месторождений алмазов в пределах Накынского кимберлитового поля в 2005-2008 г.г. (объект «Промышленный – 3») / О.К. Килижеков, Е.Н. Малышева. – Мирный, 2008.

Килижеков, О.К. Закономерности локализации и особенности разведки погребенных россыпей алмазов Средне-Мархинского района (Якутская алмазоносная провинция): дис. ... к-та геол.- минерал. наук: 25.00.11. Килижеков Олег Константинович. – Мирный, 2017. – 160 с.

Киселев, А.И. Взаимоотношения кимберлитового и базитового магматизма в Накынском поле Якутской алмазоносной провинции / А.И. Киселев // Вестник ИрГТУ. – 2008. – № 4 (36). – С. 18-21.

Киселев, А.И. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилюйского рифта (Сибирский кратон) / А.И. Киселев, В.В. Ярмолук, А.В. Иванов, К.Н. Егоров // Геология и геофизика. – 2014. – т. 55. – № 2. – С. 185-196.

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

Колганов, В.Ф. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии / В.Ф. Колганов, А.Н. Акишев, А.В. Дроздов. – АК «АЛРОСА», Ин-т «Якутнипроалмаз». – Мирный: Мирнинская городская типография. – 2013. – 568 с.

Колдаев, С. М. О размещении кимберлитовых тел / С.М. Колдаев // Геология и геофизика. – 1976. – № 12. – С. 16-24.

Кондратьев, А.А. Тектоническое строение и история развития Средне-Мархинского алмазоносного района Западной Якутии / А.А. Кондратьев, Н.И. Горев // Геология алмаза – настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). – Воронеж: Воронежский государственный университет. – 2005. – С. 95-105.

Константинов, К.М. Петро- и палеомагнитные характеристики структурно-вещественных комплексов месторождения алмазов трубка Нюрбинская (Среднемархинский район, Западная Якутия) / К.М. Константинов, А.А. Яковлев, Т.А. Антонова, И.К. Константинов, Ш.З. Ибрагимов, Е.В. Артемова // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 1. – С. 135-169.

Константинов, К.М. Магнетизм кимберлитов и траппов зоны сочленения Вилюйской и тунгусской синеклиз Сибирской платформы: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. Константинов Константин Михайлович. – Иркутск, 2014. – 368 с.

Копылова, А.Г. Петрохимические особенности щелочных базитов Накынского кимберлитового поля / А.Г. Копылова, А.Л. Земнухов, М.Д. Томшин // Отечественная геология. – 2005. – № 5. – С.65-73.

Корнилова, В.П. Новый тип алмазоносных кимберлитовых пород на Сибирской платформе / В.П. Корнилова, А.С. Фомин, А.И. Зайцев // Региональная геология и металлогения. – 2001. – № 13-14. – С. 105-117.

Коробейников, А.Ф. Теоретические основы моделирования месторождений полезных ископаемых. Учебник для вузов / А.Ф. Коробейников. – Томск, 2009. – 183 с.

Коробков, И.Г. Структурно-тектоническое строение Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) / И.Г. Коробков, А.А. Евстратов, А.И. Коробкова // Вестник СПбГУ. – 2010. – Сер. 7. – Вып. 4. – С. 47-57.

Коробков, И.Г. Структурно-тектонические, литолого-фациальные и магматические факторы минерагенического районирования и локального прогноза алмазоносности на востоке Тунгусской синеклизы (Якутская алмазоносная провинция): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.11. Коробков Илья Георгиевич. – Томск, 2014. – 370 с.

Костровицкий, С.И. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / С.И. Костровицкий, З.В. Speziус, Д.А. Яковлев, Г.С. Фон-дер-Флаас, Л.Ф. Суворова, И.Н. Богуш. – 2015. – 480 С.

Костровицкий, С.И. Физические условия, гидравлика и кинематика заполнения кимберлитовых трубок / С.И. Костровицкий. – Новосибирск: Наука, 1976. – 96 с.

Кошкарев, Д.А. Основные параметры алмазоносности геолого-технологических типов кимберлитовых руд трубки Юбилейная, Якутия / Д.А. Кошкарев, К.Н. Егоров, М.А. Карпенко, И.В. Маковчук // Руды и металлы. – 2010. – № 4. – С. 27-34.

Кошкарев, Д.А. Отчет о результатах научно-исследовательских работ по теме: «Геолого-технологическая типизация кимберлитовых руд верхних горизонтов трубки «Ботуобинская» с целью повышения эффективности их опережающей разбраковки по уровню алмазоносности и ситовым характеристикам» (вещественный состав разнотипных кимберлитов трубок «Ботуобинская») / Д.А. Кошкарев, Г.В. Орлова, Л.Г. Андрющенко, М.Г. Карнаушенко. – Иркутск, 2015.

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

Крутойарский, М.А. Кимберлиты бассейнов рек Омоноса и Укукит / М.А. Крутойарский, Б.Г. Лопатин, Г.А. Быстрова, А.В. Уханов, С.Ф. Духанин, К.С. Забурдин // Сб. статей по геологии арктики. – 1959. – Выпуск 13. – С. 79-105.

Левашов, К.К. Геологическая история областей среднепалеозойского континентального палеорифтогенеза / К.К. Левашов // Советская геология. – 1980. – № 5. – С. 21-25.

Левашов, К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы / К.К. Левашов // Советская геология. – 1975. – № 10. – С. 49-58.

Лелюх, М.И. О закономерностях пространственного размещения кимберлитов в Айхальском районе / М.И. Лелюх, А.И. Крючков, В.И. Устинов // Проблемы кимберлитового магматизма. – 1989. – С. 88-97.

Леонтьев, Л.Н. О природе кимберлитовых трубок Якутии / Л.Н. Леонтьев, А.А. Каденский // Доклады АН СССР. – 1957. – Т. 115, № 2.

Лобацкая, Р.М. Структурная зональность разломов / Р.М. Лобацкая. – М.: Недра, 1987. – 129 с.

Малич, Н. С. Тектоническое развитие чехла Сибирской платформы / Н.С. Малич. – М.: Недра. – 1975. – 216 с.

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

Масленникова, Э.А. Отчет о результатах поисков месторождений алмазов в пределах перспективных участков Накынского кимберлитового поля и прилегающих площадей в 2003-2007 г.г. (объект Нижне-Накынский) / Э.А. Масленникова, Е.Н. Малышева. – Мирный, 2007.

Масуренков, Ю.П. Вулканы над интрузиями / Ю.П. Масуренков. – М.: Наука, 1979. – 219 с.

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

Милашев, В.А. Кимберлиты и глубинная геология / В.А. Милашев. – Л.: Недра, 1990. – 167 с.

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.

Милашев, В.А. Структуры кимберлитовых полей / В.А. Милашев. – Л.: Недра, 1979. – 183 с.

Милашев, В.А. Трубки взрыва / В.А. Милашев. – Л.: Недра, 1984. – 268 с.

Минорин, В.Е., Некоторые черты кимберлитового вулканизма Сибирской платформы / В.Е. Минорин, А.Д. Харьков // Вулканизм и геодинамика. – 1977. – С. 236-244.

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.

Мокшанцев, К.Б. Структурный контроль проявлений кимберлитового магматизма на северо-востоке Сибирской платформы / К.Б. Мокшанцев, В.В. Еловских, В.В. Ковальский, Г.И. Штех, С.Д. Адамов, Ф.Ф. Брахфогель, Т.В. Голубева, Л.А. Зимин. – 1974.

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.

Молчанов, Ю.Д. Физико-геологическая характеристика разломов Вилюйско-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.

Невский, В. А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений / В. А. Невский. – М.: Недра, 1979. – 224 с.

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.

Николаев, П. Н. Методика тектонодинамического анализа / П. Н. Николаев. – М., Недра, 1992. – 295 с.

Никулин, В.И. Геотермодинамические и формационные особенности кимберлитоконтролирующих структур / В.И. Никулин // Проблемы кимберлитового магматизма. – 1989. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. – С. 59-65.

Никулин, В.И. О критериях прогноза кимберлитовых полей / В.И. Никулин, В.А. Ерхов, В.И. Поспеев // Советская геология. – 1988. – № 11. – С. 3-42.

Никулин, И.И. Литология алмазоносных нижнеюрских отложений Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия) / И.И. Никулин, А.Д. Савко. – Воронеж: Воронежский государственный университет. – 2009. – 134 с.

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.

Одинцов, М. М. Основные черты геологии Сибирской алмазоносной провинции / М.М. Одинцов // Изв. вост. фил. АН СССР, № 1, 1957.

Пейве, А. В. Глубинные включения, кимберлиты и проблема дрейфа континентов / А.В. Пейве, А.С. Перфильев, Г.Н. Савельева // Советская геология. – 1976. – № 5. – С. 18-31.

Первов, В.А. Кимберлитовая трубка Катока (Республика Ангола): Палеовулканогическая модель формирования / В.А. Первов, С.В. Сомов, А.В. Коршунов, Е.В. Дулапчий, Ж.Т. Феликс // Геология рудных месторождений. – 2011. – т. 53. – № 4. – С. 330-345.

Пономаренко, А.И. Проявление кимберлитового магматизма на южном склоне Анабарского поднятия / А.И. Пономаренко, А.А. Панкратов, В.А. Побережский // Геология, петрография и минералогия магматических образований северо-восточной части Сибирской платформы. – 1970.

Потуроев, А.А. О трещинно-разрывной тектонике Далдыно-Алакитского района / А.А. Потуроев // Магматические образования северо-востока Сибирской платформы (Геология, петрография, минералогия и геохимия). – 1975. – Часть 1. – Якутск. – С. 57-72.

Пыжьянов, С.А. Отчет о результатах поисков коренных и россыпных месторождений алмазов на водоразделе рр. Ханья-Накын за 2000-2004 гг. (Объект «Промышленный») / С.А. Пыжьянов, В.С. Боланев. – Мирный, 2004.

Рац, М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М. В. Рац, С. Н. Чернышев. – М.: изд-во «Недра», 1970. – 164 с.

Рожков, И.С. Условия образования и размещения кимберлитовых тел в восточной части Сибирской платформы / И.С. Рожков, В.В. Ковальский // Международный геологический конгресс. XII сессия. Доклады советских геологов. Проблема 16: Вопросы металлогении. – 1965. – Москва. – С. 168-181.

Розен, О.М. Якутская кимберлитовая провинция: положение в структуре Сибирского кратона, особенности состава верхней и нижней коры (по данным изучения керн скважин и включений в кимберлитах) / О.М. Розен, В.П. Серенко, З.В. Специус, А.В. Манаков, Н.Н. Зинчук // Геология и геофизика. – 2002. – т. 43. – № 1. – С. 3-26.

Саблуков, С.М. Вулканические породы трубки Нюрбинская: отражение состояния верхней мантии региона от рифея до карбона, геодинамические следствия / С.М. Саблуков, Л.И. Саблукова, Ю.Б. Стегницкий, М.А. Карпенко, С.В. Спиваков // Глубинный магматизм, его источники и плюмы. Труды VIII межд. Семинара. – Иркутск. – 2008. – С. 132-165.

Савко, А.Д. Новый взгляд на роль авлакогенеза в формировании тел алмазоносных магматитов / А.Д. Савко, Л.Т. Шевырев // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2002. – № 1. – С. 7-18.

Сараев, А.К. Особенности проявления кимберлитовмещающего разлома в Накынском поле по данным АМТЗ / А.К. Сараев, М.И. Пертель, А.Б. Никифоров и др. // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. – Воронеж: Воронежский госуниверситет, 2003. – с. 539-543.

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.

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

Семинский, К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект / К. Ж. Семинский, А.С. Гладков, О.В. Лунина, М.А. Тугарина – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 291 с.

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.

Семинский, К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алакит-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции / К.Ж. Семинский, Ж.В. Семинский. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 204 с.

Серебряков, Е.В. Детализированная схема разрывной структуры месторождения «Трубка Нюрбинская» по результатам тахеометрической съемки / Е.В. Серебряков // Материалы XX Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: ТПУ. – 2016. – С. 255-256.

Серебряков, Е.В. Новые данные о разломно-блоковой структуре участка локализации кимберлитовой трубки Ботуобинская (Якутская алмазоносная провинция) / Е.В. Серебряков, А.С. Гладков, Д.А. Кошкарёв, И.А. Потехина // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. – 2016. – № 1 (54). – С. 20-32.

Серебряков, Е.В. Разломно-блоковая структура месторождения «Трубка Нюрбинская» (Якутская алмазоносная провинция) / Е.В. Серебряков // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2017. – С. 123-125.

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.

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

Соболев, В.С. Геология месторождений алмазов Африки, Австралии, Борнео и Северной Америки / В.С. Соболев. – М.: Госгеолтехиздат, 1951.

Сорохтин, О.Г. Субдукционный механизм происхождения алмазов / О.Г. Сорохтин, Н.О. Сорохтин // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2006. - № 1. – С. 5-36.

Спиваков, С.В. Отчет о результатах детальных поисков месторождений алмазов в пределах Накынского кимберлитового поля за 2000-2003 гг. (Объект «Ханнинский») / С.В. Спиваков, М.В. Покровский. – Мирный, 2004.

Спижарский, Т.Н. Геологическое районирование Сибирской платформы и основные закономерности размещения полезных ископаемых на ее территории / Т.Н. Спижарский // Геологическое строение и полезные ископаемые Восточной Сибири. – Москва. – 1958. – С. 22-41.

Страхов, Л.Г. Тектонические условия образования трубок взрыва на Сибирской платформе / Л.Г. Страхов // Глубинные разломы юга Восточной Сибири и их металлогеническое значение. – 1971. – С. 109-114.

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

Суворов, В. Д. Сейсмические особенности поверхности мантии в южной части Якутской кимберлитовой провинции / В.Д. Суворов, Е.В. Шарапов // Геология и геофизика. – 1991. – № 7. – С. 12-17.

Табунов, С.М. К вопросу о связи кимберлитового вулканизма с разрывными нарушениями в земной коре / С.М. Табунов // Кимберлитовый вулканизм и перспективы коренной алмазоносности Северо-Востока Сиб. платф. – 1971. – С. 62-64.

Тарабукин, В.П. Оценка эрозионного среза кимберлитовых трубок Накынского поля / В.П. Тарабукин, А.Н. Реймерс, И.В. Нефедова // Отечественная геология. – 2003. – № 6, – С. 84-85.

Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.:МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571с.

Томсон, И.Н. Особенности строения ослабленных зон над скрытыми разломами фундамента в складчатых областях Дальнего Востока / И.Н. Томсон // Тр. ИГЕМ. – 1962. – вып. 84.

Томшин, М.Д. Особенности магматических образований Накынского кимберлитового поля Якутской провинции / М.Д. Томшин, А.С. Фомин, В.П. Корнилова, С.Д. Черный, Ю.Т. Яныгин // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 12. – С. 1693-1703.

Томшин, М.Д. Характер становления базитов в Накынском кимберлитовом поле Якутии / М.Д. Томшин, А.И. Зайцев, А.Л. Земнухов, А.Г. Копылова // Отечественная геология. – 2004. – № 5. – С. 44–49.

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

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

Уткин, В.П. Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование / В.П. Уткин. – М.: Наука. – 1989. – 166 с.

Фомин, Ю.М. Структурная позиция алмазоносных полей востока Сибирской платформы / Ю.М. Фомин // Изв. АН СССР. Сер. геол. – № 12. – 1992. – С. 152-155.

Францессон, Е.В. Кимберлитовый магматизм древних платформ / Е.В. Францессон, Б.Г. Лутц. – Москва. – 1995. – 342 с.

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

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

Хелмштедт, Х.Х. Геодинамический контроль кимберлитов – какую роль играют горячие точки и плитная тектоника? / Х.Х. Хелмштедт, Дж.Дж. Герни // Геология и геофизика. –1997. – Т.38, № 2. – С. 461-476.

Хорева, Б.Я. Петрологические особенности зон смятия и характер связи их с глубинными разломами / Б.Я. Хорева //Глубинные разломы. – М.: Недра. – 1964. – С. 139-146.

Цыганов, В.А. / Локальные критерии структурного контроля кимберлитового магматизма Западной Якутии / В.А. Цыганов, И.П. Микоев, С.Д. Черный // Советская геология. – 1988. – № 7. – С. 36-46.

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 Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2014. – Т. 44. – № 1. – С. 35-43.

Черемных, А.В. Экспериментальное исследование формирования сети разрывов Накынского поля Якутской алмазной провинции / А.В. Черемных, А.С. Гладков, А.С. Черемных // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2017. – Т. 40. – № 1. – С. 66-82.

Чернышев, С.Н. Трещины горных пород / С. Н. Чернышев. – М.: Наука, 1983. – 240 с.

Шаталов, В.И. Уточнение возраста кимберлитов Накынского поля / В.И. Шаталов, В.П. Тарабукин, В.С. Боланев, М.Д. Томшин // Отечественная геология. – 1999. – № 4. – С. 3–4.

Шейнман, Ю.М. Некоторые закономерности распространения вулканических явлений на платформах / Ю.М. Шейнман // В сб.: Материалы по региональной геологии. – 1956. – Выпуск 2.

Шерман, С.И. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования) / С.И. Шерман, С.А. Борняков, В.Ю. Буддо. – Новосибирск: Наука. – 1983. – 112 с.

Шерман, С.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения / С.И. Шерман, Ю.И. Днепровский. – Новосибирск: Наука. – 1989. – 157 с.

Шерман, С.И. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков, В.Ю. Буддо, Р.М. Лобацкая, А.Н. Адамович, В.А. Трусков, А.А. Бабичев. – Новосибирск: Наука. – 1991. – 261 с.

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

Шпунт, Б.Р. Кимберлитоконтролирующие структуры Сибирской платформы / Б.Р. Шпунт // Тр. ЦНИГРИ. – 1991. – Вып. 250. – С. 38-50.

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.

Эрлих, Э.Н. Тектоника Анабарской антеклизы и закономерности проявления кимберлитового и траппового вулканизма / Э.Н. Эрлих // Геология алмазных месторождений. Серия геологическая. – 1963. – № 9. – С. 22-38.

Янсе, А.Д. Новый подход и классификация кратонов / А.Д. Янсе // Геология и геофизика. – 1992. – № 10. – С. 12-32.

Agashev, A.M. Preliminary age determination of recently discovered kimberlites of the Siberian Kimberlite province / A.M. Agashev, A.S. Fomin, T. Watanabe, N.P. Pochilenko // Ext. Abstr. 7-th Intern. kimberlite conf. – Cape Town, April, 1998. – P. 9-10.

Agashev, A.M. Geochemistry of kimberlites from the Nakyn field, Siberia: evidence for unique source composition / A.M. Agashev, T. Watanabe, D.A. Budaev, N.P. Pokhilenko, A.S. Fomin, K. Maehara, J. Maeda // Geology. – 2001. – V. 29, № 3. – P. 267-270.

Bogatikov, O.A. Variations in chemical and isotopic compositions of the Yakutian kimberlites and their causes / O.A. Bogatikov, V.A. Kononova, Y.Y. Golubeva, N.N. Zinchuk, I.P. Plupin, A.Y. Rotman, L.K. Levsky, G.V. Ovchinnikova, I.A. Kondrashov // Geochemistry International. – 2004. – V. 42 (9). – P. 799-821.

Field, M. Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review / M. Field, J. Stiefenhofer, J. Robey, S. Kurszlauskis // Ore Geology Reviews. – 2008. – V. 34. – P. 33-75.

Hawthorne, J.B. Model of a kimberlite pipe / J.B. Hawthorne // Physics and Chemistry of the Earth. – 1975. – № 9, P. 1-15.

Hetman, C.M. Geology of the Gahcho Kue' kimberlite pipes, NWT, Canada: root to diatreme magmatic transition zones // C.M. Hetman, B.H. Scott Smith, J.L. Paul, F. Winter // Lithos. – 2004. – V. 76. – P. 51-74.

Kurszlaukis, S. Formation of «Tuffisitic Kimberlites» by phreatomagmatic processes / S. Kurszlaukis, V. Lorenz // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2008. – V. 174. – P. 68-80.

Mitchell, R.H. Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology / R.H. Mitchell. – Plenum Press. – 1986. – New York. – 442 p.

Nowicki, T. The geology of kimberlite pipes of the Ekati property, Northwest Territories, Canada / T. Nowicki, B. Crawford, D. Dyck, J. Carlson, R. McElroy, P. Oshust, H. Helmstaedt // *Lithos*. – 2004. – V. 76. – P. 1-27.

Sablukov, S.M. Kimberlites and basalts with differing age of the Nyurbinskaya pipe (Nakyn field, Yakutia): a portrayal of regional upper mantle evolution from the Riphean to the Carboniferous time, and its geodynamic relationships / S.M. Sablukov, L.I. Sablukova, Yu. B. Stegnitsky, M.A. Karpenko, R.G. Neustroev // *Abstracts of XXVII International Conference School “Geochemistry of Alkaline rocks”*. Moscow-Koktebel. – Geochemistry of magmatic rocks. – 2010. – P. 152-153.

Tevelev, Arc. V. Early Proterozoic PGE Provinces in the Eastern Baltic Shield / Arc. V. Tevelev, T.L. Grokhovskaya // *5th Zonenshain conference on plate tectonics*. – 1995. – GEOMAR, Kiel, – P. 95-96.

Tomshin, M.D. The sequence of magmatic events within the Nakyn kimberlite field / M.D. Tomshin A.V. Travin, K.M. Konstantinov // *Large igneous provinces, mantle plumes and metallogeny in the Earth's history (Abstract volume)* (Irkutsk – Listvyanka, September 1–8, 2015). Publishing House of V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS. – 2015. P. 128–129.

Twiss, R.J. Structural geology / R.J. Twiss, E.M. Moores. – N.Y.: W.N. Freeman and Company, 1992. – 532 p.

Webb, K.J. Geology of the Victor Kimberlite, Attawapiskat, Northern Ontario, Canada: cross-cutting and nested craters / K J. Webb, B.H. Scott Smith, J. L. Paul, Casey M. Hetman // *Lithos*. – 2004. – V. 76. – P. 29-50.