

УДК 551.243

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ РАЗЛОМНОГО УЗЛА РАЙОНА КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ «МИР» (ЯКУТСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

А.В. Черемных¹, А.С. Гладков², А.М. Афонькин³, И.А. Потехина⁴,
Е.В. Серебряков⁵, И.В. Кузьмин⁶

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

Приведены результаты экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния в окрестностях разломного узла, вмещающего кимберлитовую трубку «Мир». В опытах, отличающихся спецификой сети дислокаций разломного узла и граничными условиями воздействия на модель, были воспроизведены различные сочетания разрывов района исследования. Показано, что благоприятные для локализации трубки дизъюнктивные структуры формируются в результате активизации северо-западных и субмеридиональных разрывов в сдвиговом поле напряжений с ориентировкой оси сжатия ~ 290–310°.

Библиогр. 6 назв. Ил. 5.

Ключевые слова: моделирование напряженно-деформированного состояния; поляризационно-оптический метод; разломный узел; Якутская алмазоносная провинция.

STRESS-STRAIN STATE SIMULATION IN FAULT CLUSTER BOUNDARIES ENCLOSING “MIR” KIMBERLITE DIAMOND PIPE (YAKUTSK DIAMOND-BEARING PROVINCE)

A.V. Cheremnykh, A.S. Gladkov, A.M. Afonkin, I.A. Potekhina, E.V. Serebryakov,
I.V. Kuzmin

Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

The article presents the results of experimental research of stress-strain state in the boundaries of the fault cluster enclosing the “Mir” kimberlite diamond pipe. Various combinations of faults in the area under investigation have been simulated in the experiments differing by the features of fault cluster dislocation pattern and boundary conditions of the impact on the model. The structures favorable for pipe localization are shown to form as a result of reactivation of NW and N-S trending faults under transcurrent stress regime with ~ 290-310° orientation of compression axis.

6 sources. 5 figures.

Key words: simulation stress-strain state; polarization-optical method; fault junction; Yakutskaya Diamond Province.

¹Черемных Александр Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики, e-mail: cherem@crust.irk.ru

Cheremnykh Alexander Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Tectonophysics, e-mail: cherem@crust.irk.ru

²Гладков Андрей Станиславович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

Gladkov Andrei, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Tectonophysics, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

³Афонькин Андрей Максимович, аспирант Института земной коры СО РАН, e-mail: andrei.afonkin@mail.ru

Afonkin Andrei, Postgraduate of the Institute of the Earth's Crust SB RAS, e-mail: andrei.afonkin@mail.ru

⁴Потехина Инна Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории тектонофизики, e-mail: ip@crust.irk.ru

Potekhina Inna, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Researcher of the Laboratory of Tectonophysics, e-mail: ip@crust.irk.ru

⁵Серебряков Евгений Валерьевич, старший лаборант лаборатории тектонофизики.

Serebriakov Evgenii, Senior Laboratory Assistant.

⁶Кузьмин Игорь Владимирович, аспирант Института земной коры СО РАН, e-mail: flabber007@yandex.ru

Kuzmin Igor, Postgraduate of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS, e-mail: flabber007@yandex.ru

Введение. Алмазоносная кимберлитовая трубка «Мир» приурочена к долгоживущему разломному узлу, имеющему сложное строение. Формирование, развитие и активизация нарушений, составляющих разломный узел, являются определяющим фактором для внедрения кимберлитового тела и последующих разрывных деформации в его пределах. Существуют разные взгляды [1, 5] на строение разломного узла, вмещающего трубку.

По данным предшествующих исследований [2] внедрение трубки «Мир» происходило при активизации сети разрывных нарушений в сдвиговом поле тектонических напряжений, которое характеризовалось северо-западной ориентировкой оси сжатия и северо-восточной – растяжения.

Массовые замеры трещин, выполненные на верхних горизонтах карьера, вкупе с результатами площадных работ в Мало-Ботуобинском алмазоносном районе позволили предположить [2], что трубка «Мир» локализована на участке пересечения серии сближенных нарушений север-северо-восточной ориентировки и дизъюнктивов восток-северо-восточного, северо-западного и север-северо-западного направлений.

Для оценки условий формирования разломных структур участка нами проведено экспериментальное изучение напряженно-деформированного состояния при активизации дизъюнктивов, образующих разломный узел, в пределах которого расположена трубка «Мир».

Методика исследования. Для экспериментального изучения кинематического типа разрывов и напряженно-деформированного состояния вмещающих их пород было проведено физическое моделирование поляризационно-оптическим методом. Метод оптического моделирования традиционно используется для изучения специфики перераспределения поля напряжений вблизи разрывов и других неоднородностей верхней части земной коры [4]. Применение в качестве модельного материала упругого желатино-

вого студня позволяет воспроизводить в опытах статические поля напряжений и деформаций. Основной особенностью метода является специфика напряженного состояния, когда главные нормальные напряжения лежат в горизонтальной плоскости модели, что согласуется с доминирующим соотношением напряжений в районе исследования.

Эксперименты выполнены в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН. Установка для моделирования состоит из полярископа-поляриметра ПКС-250 и деформационного стола, позволяющего прикладывать к моделям различные виды нагрузки (рис. 1).

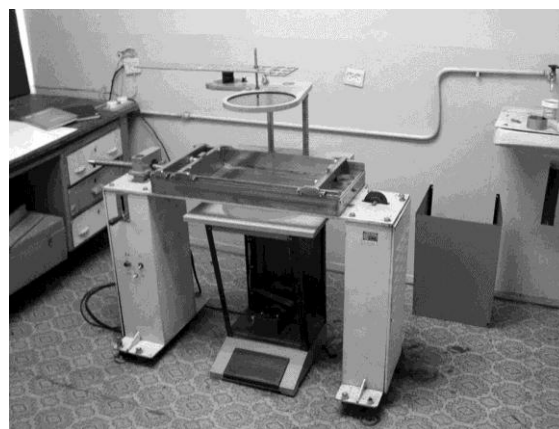


Рис. 1. Оборудование для оптического моделирования

Для моделирования использовались студни оптически активного материала с концентрацией желатина 25–30%. Свойства желатиновых студней детально охарактеризованы Д.Н. Осокиной [3], которая показала, что для студней с концентрацией желатина 10–30% достаточно полно соблюдаются условия подобия, предложенные М.В. Гзовским.

Поскольку эксперименты проводились в естественных условиях силы тяжести, а плотность желатина незначительно (~2,5 раза) меньше плотности горных пород, основное требование – соответствие множителей подобия модулей упругости и геометрических размеров объекта исследования в природе

и модели. Разрывы в моделях имеют размеры 1–15 см, чему в природе соответствуют разрывы длиной километры – десятки километров: множитель подобия размеров составляет 10^5 . Модуль упругости горных пород составляет $1 \cdot 10^3$ – $1 \cdot 10^5$ МПа. Упругие свойства желатиновых студней (без примесей) зависят от концентрации желатина и режима изготовления. При концентрации желатина в растворе порядка 25–30% модуль упругости затвердевшего студня $\sim 7 \cdot 10^4$ – $1 \cdot 10^5$ Па.

Таким образом, главным требованием при проведении экспериментов было соблюдение единых требований к составу студней при изготовлении моделей в каждой серии опытов, т.к. от этого зависят физические и соответственно оптические свойства модельного материала и достоверность результатов эксперимента.

Все модели приготавливались по следующей методике: желатин расплавлялся на водяной бане, заливался в специальную форму (размер 2x30x45 см) и выдерживался в ней 22 часа. Моделирование осуществлялось через 30 минут после извлечения желатинового студня из формы.

Непосредственно перед проведением эксперимента производилась градуировка, в процессе которой определялось соотношение деформации и разности хода лучей (цвета модели при скрещенных николях поляризатора и анализатора), что необходимо для дальнейшего выявления участков относительного увеличения и уменьшения значений максимальных касательных напряжений (τ_{\max}), вызванного внесением в модель неоднородностей в виде разрывов и их сочетаний. За фоновое значение τ_{\max} приняты границы распространения в нагруженных моделях оранжевого и красного цветов.

После градуировки на модель переносилась схема эксперимента, включающая сеть разломов. Таким образом,

учитывались особенности разломно-блокового строения земной коры в окрестностях трубки. Все разрывы наносились в виде вертикальных прорезей на всю толщину модели со смазкой их поверхностей водой, что продиктовано особенностями метода, при котором воспроизводится плоское напряженное состояние. В ходе эксперимента картина распределения в моделях цветов (изохромы и изоклины), необходимая для изучения напряженного состояния, фиксировалась фотоаппаратом для последующей обработки полученных результатов.

Результаты моделирования и их обсуждение. Проведено 15 экспериментов, воспроизводящих те или иные элементы природной сети разрывных нарушений. Эксперименты отличались граничными условиями силового воздействия на модель – ориентировкой осей сжатия и растяжения. Сеть разрывов подвергалась деформированию в сдвиговом поле с ориентировкой оси сжатия северо-запад – юго-восток (соответственно оси растяжения – северо-восток – юго-запад). Ориентировка оси сжатия в экспериментах варьировала от субширотной (265°) до северо-северо-западной (330°). Неоднородности в виде разрывов добавлялись в модель поэтапно, что позволило исследовать напряженно-деформированное состояние как в окрестностях относительно простых узлов сочленения разломов, так и при более сложной разломно-блоковой структуре.

Первая серия экспериментов состояла из трех опытов, которые моделировали сочленения:

- двух разрывов северо-западного и субмеридионального простираний (два эксперимента);
- трех разрывов – северо-западной, субмеридиональной и субширотной ориентировки (один эксперимент).

Во всех опытах граничные условия воздействия на модель воспроизводили сдвиговое поле напряжений с СЗ-ЮВ сжатием и СВ-ЮЗ растяжением.

Так, в первом опыте ориентировка оси сжатия принята по азимуту 320° , а во втором и третьем – 310° .

В первом опыте воспроизведено напряженно-деформированное состояние в окрестностях У-образного сочленения разрывов северо-западного и субмеридионального простирания в сдвиговом поле с ориентировкой оси сжатия 320° . Он показал, что раскрытие разлома северо-западного простирания возможно не только (даже не столько) из-за его ортогональности к оси растяжения, но и в результате внедрения в тело дизъюнктива клиновидных блоков (рис. 2, А). Клиновидная форма блоков формируется в результате сочленения разрывов северо-западной и субмеридиональной ориентировки. Последние активизируются как сдвиги с левосторон-

ней компонентой перемещения крыльев, а наибольшие касательные напряжения и соответственно вторичные разрывные нарушения формируются на их дистальных северном и южном окончаниях.

Во втором эксперименте (рис. 2, Б, В) также было воспроизведено напряженно-деформированное состояние в окрестностях У-образного сочленения разрывов северо-западного и субмеридионального простирания. По сравнению с первым опытом, в этом эксперименте изменились граничные условия воздействия на модель – ориентировка оси сжатия принята 310° . При такой геометрии в модели исключается раскрытие северо-западного разлома за счет внедрения в его тело клиновидных блоков (рис. 2, Б). Раздвиговое переме-

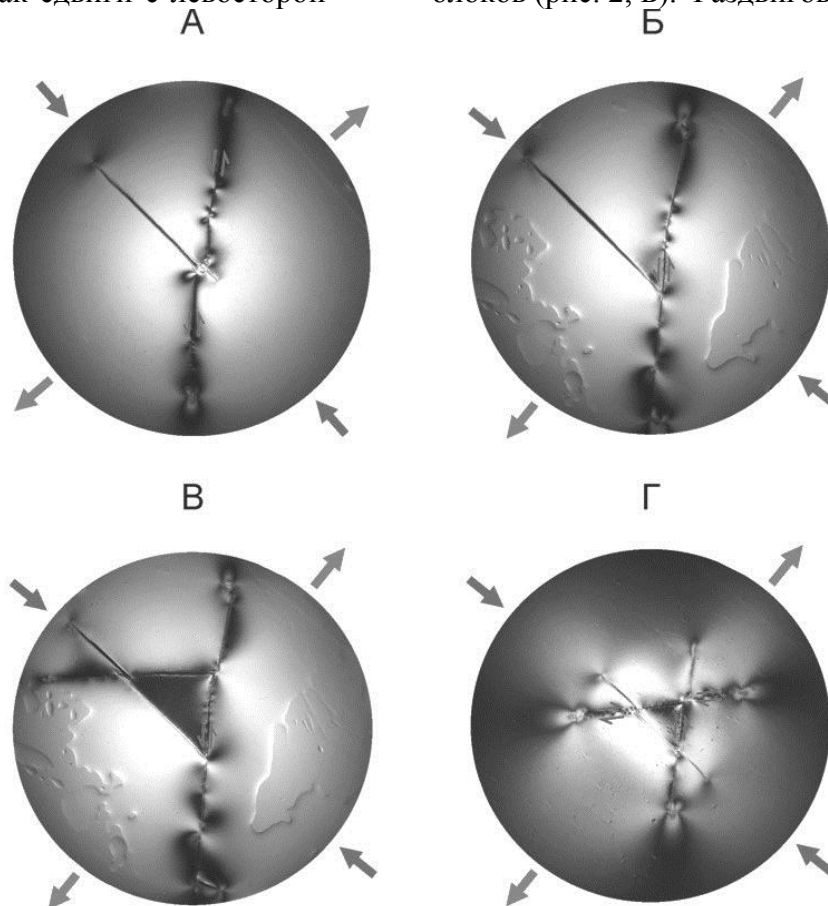


Рис. 2. Моделирование взаимодействия разрывов различной ориентировки.

На фотографиях экспериментов буквами обозначены разные варианты опытов: А – опыт 1; Б – опыт 2, первый вариант; В – опыт 2, второй вариант; Г – опыт 3. Жирные стрелки – ориентировка внешних воздействий на границах модели, тонкие стрелки на модельном материале – направление сдвиговых перемещений крыльев разрывов. Остальные пояснения см. в тексте.

шение крыльев разлома северо-западного простирания происходит в его центральной части и значительно уменьшается к дистальным окончаниям. Взаимодействие этого дизъюнктива с субмеридиональным разломом, характеризующимся левосторонней сдвиговой компонентой смещения крыльев, не вносит существенного искажения в кинематический тип разрывов (рис. 2, Б). Высокие касательные напряжения, как и в первом опыте, фиксируются на концах субмеридионального дизъюнктива, где и начинают формироваться вторичные отрывные дислокации. Добавление в модель еще одной неоднородности – сегмента разрыва субширотного простирания – способствует тому, что раздвиговая компонента наблюдается только у северо-западного сегмента рудовмещающего (северо-западного) разрыва (рис. 2, В). При этом фиксируется увеличение амплитуды раздвиговых перемещений крыльев центрального сегмента субширотного разрыва с запада на восток (в модельном исполнении), что происходит из-за вращения северного блока против часовой стрелки. Вращение, по-видимому, связано с повышенным трением на границах северного сегмента субмеридионального разлома.

Третий опыт (рис. 2, Г) был направлен на изучение напряженно-деформированного состояния в окрестностях узла пересечения разрывов трех направлений: субширотного, субмеридионального и северо-западного. Все разрывы имели одинаковую длину и сочленялись с обособлением трех сегментов каждого из разрывов (рис. 2, Г). Расположение раздвиговых сегментов в пределах узла в целом подобно завершающей стадии предыдущего эксперимента (рис. 2, В). Наблюдается вращение и северного блока против часовой стрелки, которое в данном случае обусловлено спецификой взаимодействия субмеридионального и субширотного разломов.

Полученные в первой серии опытов результаты во многом объясняют известные особенности структурного положения большинства небольших кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района: трубок Таежная, Амакинская, Дачная, Интернациональная и жилы 21 [5]. Практически все они расположены в зонах нарушений северо-западной ориентировки на некотором удалении от узлов пересечения последних с разломами субмеридионального направления. Согласно результатам моделирования, именно такие участки характеризуются наибольшим раскрытием при указанных условиях (действии северо-западного сжатия и северо-восточного растяжения) и соответственно являются наиболее благоприятными для внедрения кимберлитовых тел.

Вторая серия экспериментов более подробно воспроизводила разломно-блоковое строение в окрестностях трубки «Мир», т.к. кооперативное поведение сети разломов под нагрузкой значительно изменяет внешнее поле напряжений как по величине, так и по ориентировке главных осей [6].

Моделирование показало (рис. 3), что благоприятные для формирования трубки структурные условия характерны при активизации разломов (либо их сегментов) в сдвиговом поле напряжений с ориентировкой оси сжатия в интервале $\sim 290\text{--}310^\circ$ (ось растяжения $\sim 20\text{--}40^\circ$). При субширотной ориентировке оси сжатия (рис. 3, А), а также когда данная ось находится в интервале $311\text{--}330^\circ$, растяжения центральных сегментов разломов (район локализации трубки) не наблюдается (рис. 3, Б).

Поэтапное воспроизведение сегментов перечисленных направлений разломов в окрестностях трубки «Мир» позволило выявить следующие особенности. Условия, благоприятные для формирования трубки, появляются при взаимодействии северо-западного дизъюнктива с сегментами системы субмеридиональ-

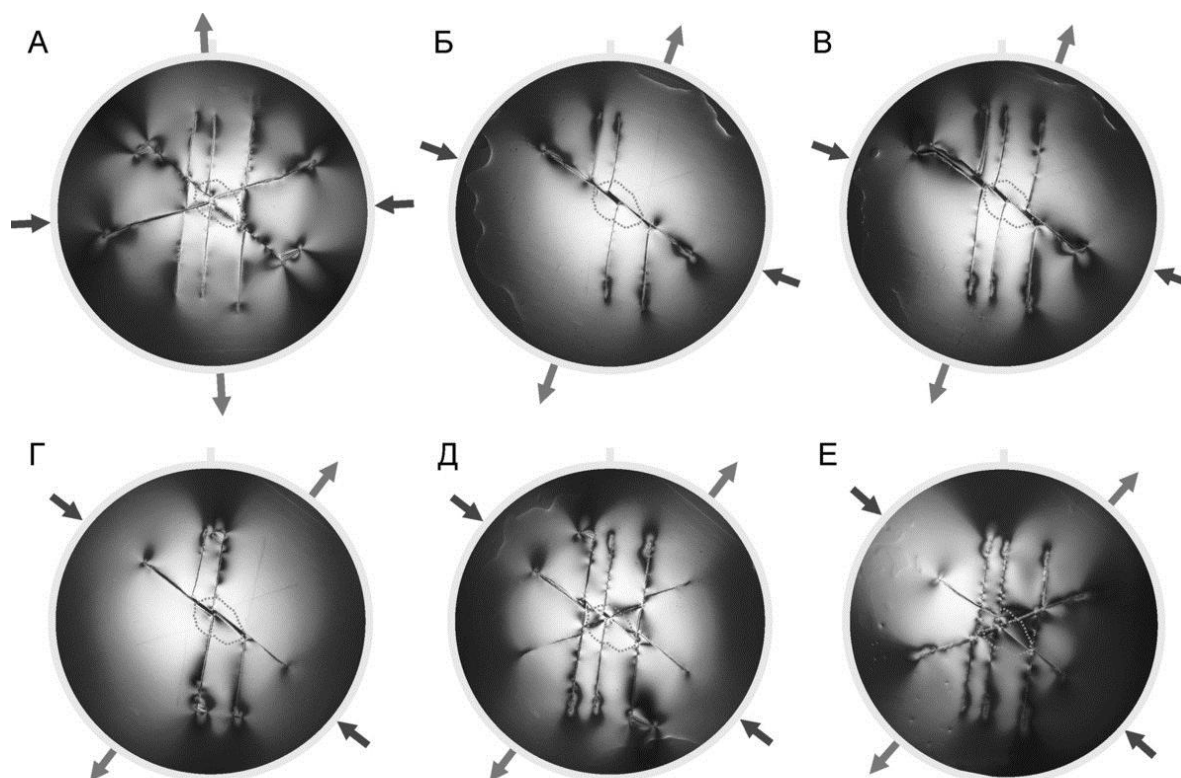


Рис. 3. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир» при разных граничных условиях опытов (фото экспериментов):

А – сжатие 265° – растяжение 355° ; Б, В – сжатие 290° – растяжение 20° ; Г, Д – сжатие $\sim 310^\circ$ – растяжение $\sim 40^\circ$; Е – сжатие 312° – растяжение 42° . Светло-серым изометричным контуром в центре модели обозначено положение выхода на поверхность трубки «Мир». Стрелками показана ориентировка внешних воздействий на границах модели.

ного разлома (рис. 3, Б-Д). При этом наиболее хорошие условия фиксируются при сдвиговом поле напряжений с ориентировкой оси сжатия близкой к 310° (рис. 3, Г). Однако даже незначительное (на 2°) отклонение простирания оси сжатия по направлению часовой стрелки (к северу) приводит к смыканию берегов сегментов разрывов центральной части (рис. 3, Е). Более существенное отклонение (320 – 330°) способствует почти полному смыканию берегов разрывов в моделях.

Отдельного рассмотрения заслуживает изучение особенностей вероятных этапов развития структуры, проведенное в рамках данной серии опытов. Как уже говорилось выше, поэтапное добавление в ходе эксперимента разрывов позволило проследить специфику

эволюции напряженно-деформированного состояния как в окрестностях относительно простых сочетаний разрывов, так и при достаточно сложной разломно-блоковой структуре. Весьма показательны следующие опыты, отличающиеся как граничными условиями моделирования, так и последовательностью активизации неоднородностей – разрывов или их сегментов.

В рамках первого эксперимента (рис. 4, А-В) в сдвиговом поле с ориентировкой оси сжатия 317° (ось растяжения 47°) последовательно воспроизводилось предполагаемое строение разломного узла. На первом этапе в результате взаимодействия разрывов субмеридионального и северо-западного направлений происходит неравномерное, убывающее к дистальным окончаниям разрывов раскрытие северо-

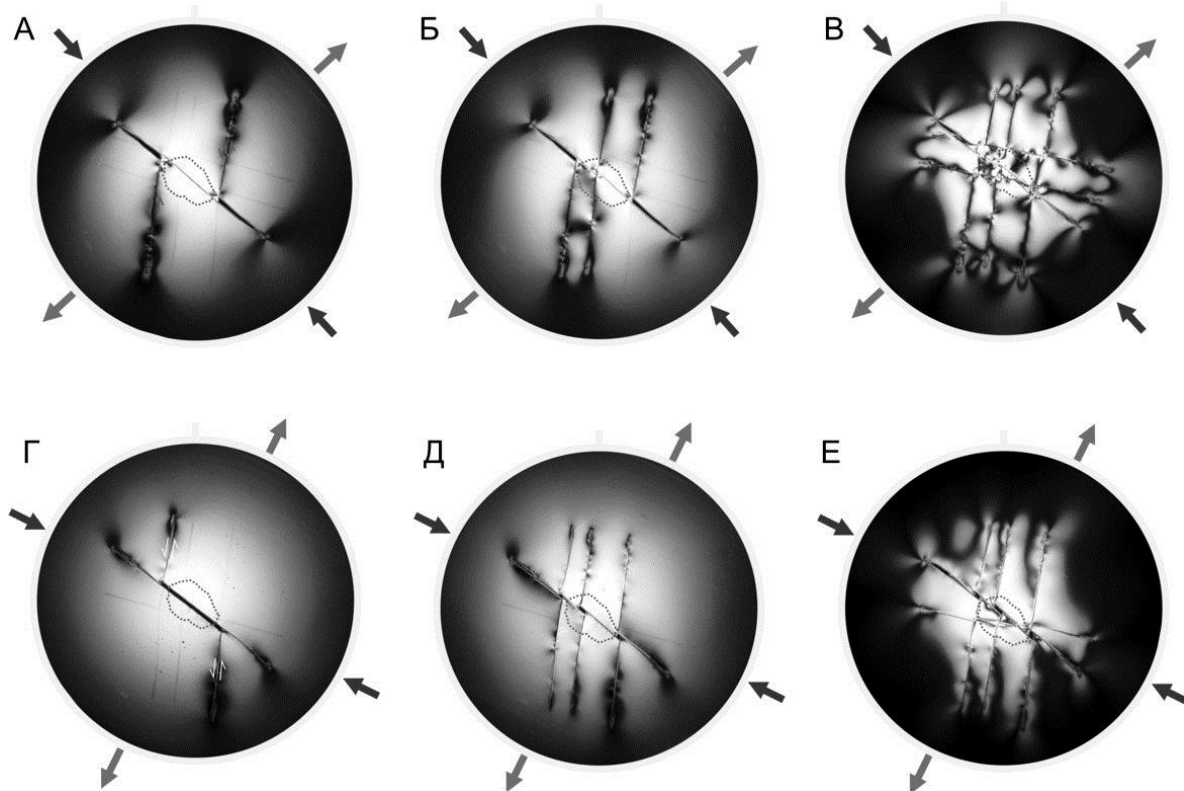


Рис. 4. Поэтапное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов разломного узла, вмещающего трубку «Мир». Пояснения в тексте. Буквами обозначены варианты опытов: А, Б, В, Г, Д, Е.

западного и юго-восточного сегментов рудовмещающего дизъюнктива (рис. 4). Эта особенность, как и в первой серии опытов (см. рис. 2, А), связана с внедрением в тело дизъюнктива северо-западного простирания блоков клиновидной формы.

Добавление в модель на втором этапе еще одного протяженного разрыва, относящегося к системе субмеридионального разлома, лишь частично снимает напряжения, что выражается в незначительном уменьшении амплитуды раздвигового смещения дистальных сегментов северо-западного дизъюнктива (рис. 2, Б). Амплитуда раздвигового смещения дистальных сегментов рудовмещающего дизъюнктива еще более уменьшается при воспроизведении всех разрывов системы субмеридионального разлома полностью. Однако даже при моделировании относительно сложной разломно-блоковой структуры дистальные сегменты рудовмещающего разрыва остаются открытыми, хотя амплитуды раздвигов и их протяженность

уменьшаются (см. рис. 2, В). Раскрытия центральных сегментов разломов при этом не происходит.

Во втором эксперименте воспроизведено сдвиговое поле с ориентировкой оси сжатия 296° (ось растяжения 26°). На первом этапе данного эксперимента при взаимодействии разрывов субмеридионального и северо-западного направлений наблюдается открытие центрального сегмента дизъюнктива северо-западного простирания (рис. 4, Г). Кроме того, в моделях фиксируется раздвиговое смещение крыльев северо-западного сегмента рудовмещающего разрыва, хотя и с существенно меньшей амплитудой. В результате воспроизведения в модели на втором этапе всех трех разрывов системы субмеридионального разлома происходит изменение напряженно-деформированного состояния с образованием в Х-образных сочленениях северо-западного дизъюнктива и субмеридиональных дислокаций, структур типа пулл-апарт (рис. 4, Д). Эти дислокации и северо-западный

сегмент одноименного дизъюнктива остаются «открытыми» и при значительной деформации разломно-блоковой структуры, образованной сетью разломов различной ориентировки (рис. 4, Е).

При использовании возможностей оптического моделирования с помощью изоклин построены траектории главных напряжений в моделях разломного узла (рис. 5).

Анализ траекторий позволил выявить специфику напряженного состояния в окрестностях разломного узла при последовательном добавлении в модель разрывов и изменении силового поля на границах желатинового студня. Так, при достаточно простой модели разломного узла раскрытие центральной части происходит не только за счет растяжения,

практически ортогонального разрыву северо-западного простирания, но и в результате блоковых перемещений – расклинивания модельного аналога главного рудовмещающего дизъюнктива (разлом северо-западного простирания) западным и восточным клиновидными блоками (рис. 5, А). В результате добавления в модель центрального разрыва субмеридионального простирания происходит перераспределение напряжений и деформаций (рис. 5, Б). Открытая полость наблюдается в пределах небольшого сегмента разлома северо-западной ориентировки. Ось растяжения сдвигового поля в окрестностях этого сегмента практически перпендикулярна его простиранию. В другой части центрального сегмента, отделенной субмеридиональным разрывом, фикси-

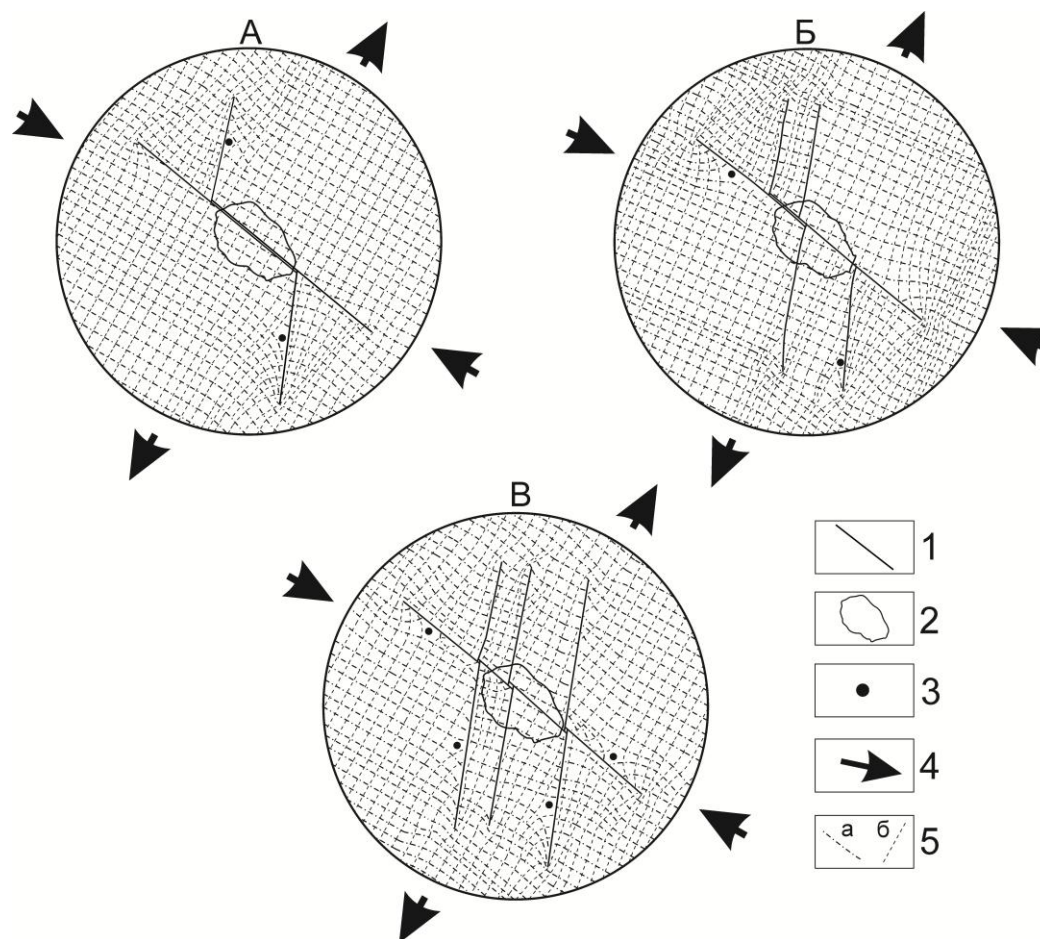


Рис. 5. Траектории главных напряжений в окрестностях разломного узла района трубки «Мир», представленного различным сочетанием разрывов:

1 – разрывы в моделях; 2 – местоположение кимберлитового тела; 3 – изотропные точки; 4 – ориентировка внешних сил; 5 – траектории осей сжатия (а) и растяжения (б); А, Б, В – варианты опытов

руется следующее изменение: небольшой разворот траекторий оси сжатия по направлению против часовой стрелки препятствует образованию открытой полости. При активизации модельных аналогов разрыва северо-западной ориентировки и трех разрывов субмеридионального простирания наблюдается более сложное напряженно-деформированное состояние (см. рис. 5, В). Открытие полостей по типу пулл-апарт структур связано с разломно-блоковой делимостью участка исследования. Эти структуры образуются в узлах пересечения разломов за счет сдвигового перемещения крыльев дизъюнктивов. Следует также отметить, что при различном сочетании разрывов, образующих разломный узел (рис. 5), наиболее благоприятная ориентировка осей напряжений для раскрытия полости рудовмещающего разлома фиксируется в окрестностях его северо-западного сегмента, где в природной обстановке расположено кимберлитовое тело «Спутник».

Заключение. Проведенные эксперименты показали, что раскрытие сегментов северо-западного разлома, вмещающего трубку «Мир», возможно в условиях сдвигового поля напряжений, когда ось сжатия ориентирована в северо-западном или запад-северо-западном направлении (соответственно при северо-восточном или север-северо-восточном простирании оси растяжения). При этом форма и размеры таких сегментов зависят от количества и направлений разрывов, образующих разломный узел. Полученные данные дают основание предполагать, что под воздействием северо-западного сжатия и северо-восточного растяжения происходит активизация, прежде всего, северо-западного нарушения и субмеридиональных дизъюнктивов. При этом первые являются структурами растяжения (раздвигами), а вторые – левосторонними сдвигами. В результате вдоль северо-западного

нарушения наблюдается раскрытие узких протяженных участков, часть из которых представляет собой структуры типа пулл-апарт (см. рис. 3, Б, В, Г и 4, Г). Данные структурные элементы по своему строению и напряженному состоянию благоприятны для внедрения кимберлитового расплава, а их пространственное положение близко к известным участкам проявления первых фаз трубки «Мир».

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проекты №№ 20121.1120002013022 и 20121.2.2120001007001).

Библиографический список

1. Владимиров Б.М., Костровицкий С.И., Соловьева Л.В. и др. Классификация кимберлитов и внутреннее строение кимберлитовых трубок. М.: Наука, 1981. 136 с.
2. Гладков А.С., Борняков С.А., Мананов А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах: методическое пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с.
3. Осокина Д.Н. Пластические и упругие низкомолекулярные оптически активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 196 с.
4. Осокина Д.Н. Моделирование тектонических полей напряжений, обусловленных разрывами и неоднородностями в земной коре // Экспериментальная тектоника (Методы, результаты, перспективы). М.: Наука, 1989. С. 163–197.
5. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: ОАО «Издательство Недра», 1998. 555 с.
6. Черемных А.В. Разломно-блоковая структура и напряженное состояние верхней коры восточного побережья озера Байкал (натурные наблюдения и моделирование) // Физика Земли. 2010. №5. – С. 41–48.

Рецензент доктор геолого-минералогических наук Иркутского государственного технического университета А.П. Кочнев