

Раздел 5.2

Новые методы и способы обработки и интерпретации геолого-геофизических данных

УДК 551.24.03+550.34

РОЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ СТРУКТУРНОГО КОНТРОЛЯ АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ

С.А. Борняков, А.С. Гладков

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Описывается первый опыт использования физического моделирования для расшифровки механизма формирования систем разрывных нарушений в пределах двух кимберлитовых районов. Представлены результаты экспериментов, отражающих динамику развития региональных и локальных структур.

Качество и эффективность алмазопроисковых работ определяются многими факторами, определяющими среди которых, пожалуй, являются концептуальная основа представлений об образовании объекта поиска – кимберлитового тела, и вытекающая из неё методология прогнозных построений. В рамках существующих представлений кимберлитовый расплав, образующийся под литосферой древней платформы, проходит сквозь неё в осадочный чехол и локализуется в нём с проявлением особого динамического эффекта. При этом считается, что подъем кимберлитовой магмы осуществляется по зоне глубинного разлома, а её последующая приповерхностная локализация определяется совокупностью разноранговых разрывных нарушений платформенного чехла. Последние, как структурный фактор контроля пространственного расположения кимберлитовых тел, всегда представляли интерес для геологов. Их тектонофизическое изучение в пределах Якутской алмазонасной провинции до недавнего времени проводилось отдельными геологами-энтузиастами бессистемно и эпизодически, и лишь с 2001 г. оно стало носить коллективный, комплексный и постоянный характер в рамках совместных исследований сотрудников ИЗК СО РАН и ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА».

За прошедшие годы в ходе детальных полевых работ в Далдыно-Алакитском и Мало-Ботубинском кимберлитовых районах собран обширный банк данных по разноранговым разрывным нарушениям, позволяющий проводить структурные построения в последовательности разномасштабных объектов: отдельная трубка – куст трубок – поле – район. Источником первичного структурно-геологического материала являлись естественные и техногенные коренные обнажения.

При локальных полевых исследованиях, проводимых в пределах карьеров кимберлитовых трубок, собирается кондиционный фактический материал. По нему однозначно устанавливаются пространственное положение основных и второстепенных рудоконтролирующих и пострудных зон разрывных нарушений, соответствующие им ориентировки осей напряжений и кинематика движений их крыльев. При интерпретации полученных результатов чаще всего возникают вопросы, связанные с возможным механизмом и временной последовательностью формирования тех или иных структурных парагенезисов.

При региональных площадных исследованиях, ориентированных на выяснение разломно-блоковой структуры осадочного чехла в пределах кимберлитовых полей и районов, точки наблюдений располагаются на местности неравномерно, причиной чему плохая обнаженность в условиях платформы. Интерпретация результатов обработки фактического материала в таких случаях не всегда однозначна, несмотря на то, что проводится в тесной увязке с другими имеющимися геолого-геофизическими материалами.

Отмеченный дефицит той или иной структурной информации на разных масштабных уровнях натуральных исследований может быть отчасти восполнен посредством физического моделирования, некоторые примеры которого представлены в настоящей статье.

Объекты и методика моделирования

Разломная структура осадочного чехла платформы в пределах Далдыно-Алакитского и Мало-Ботубинского кимберлитовых районов представлена главным образом сдвиговыми парагенезисами разрывных нарушений. Их формирование, по представлениям авторов, связано преимущественно с горизонтальными относительными смещениями подстилающих чехол блоков фундамента вдоль зон глубинных разломов. В этой связи объектом моделирования являлся деформационный процесс в модельной системе, ими-

тирующей блоки фундамента с разделяющим их разломом и перекрывающим их чехол. Согласно ранее предложенной классификации, существуют два типа сдвиговых зон, имеющих разную деформационную природу. Первый тип образуется при локализованной деформации среза, второй – при деформации тангенциального сжатия. Формирование областей активного динамического влияния (ОАДВ) этих двух типов сдвиговых зон воспроизводилось нами в моделях [1,2].

Физическое моделирование процессов разломообразования проводилось с соблюдением условий подобия. Горные породы при длительном действии на них нагрузок проявляют упруговязкопластичные свойства, что необходимо учитывать при выборе эквивалентного материала. В качестве модельного материала нами использованы водонасыщенные пласты монтмориллонитовой и бентонитовой глин. Граничные условия экспериментов определялись в соответствии с критерием-комплексом подобия [1–3]:

$$\eta / \rho g L T = \text{const},$$

где η – вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – линейные размеры, м; T – время, с. Данное уравнение позволяет вычислить масштабные коэффициенты для каждого из использованных в нем физических параметров. Так, при моделировании крупномасштабных тектонических процессов, в которые вовлекается вся литосфера, её средним значениям вязкости 10^{20-22} Па·с, плотности $2,7 \cdot 10^4$ н/м³, толщине $(60-100) \cdot 10^4$ м и продолжительности формирования крупных разломов 10–100 млн. лет соответствуют средние значения вязкости 10^{5-7} Па·с, плотности $2,0 \cdot 10^4$ н/м³ и толщины $(6-10) \cdot 10^2$ м модели и продолжительности моделируемого процесса 10–100 мин. Из принятых значений параметров, определяющих подобие процессов в природных и экспериментальных условиях, масштабные коэффициенты вязкости C_η , плотности C_ρ , линейных размеров C_l и времени C_t составляют $\sim 10^{16}$, ~ 1 , $\sim 10^6$, $\sim 10^{11}$ соответственно. При полученных масштабных коэффициентах C_l и C_t 1 мм в модели соответствует 1 км в её природном аналоге, а 1 мин эксперимента эквивалентна 1 млн. лет природного процесса.

При моделировании процессов разломообразования в осадочном чехле, мощность которого в пределах изученных площадей составляет первые километры, принимаются другие масштабные коэффициенты, при которых 1 мм на модели соответствует 100 м в природе ($C_l = 10^5$), а 1 мин опыта 100 тыс. лет ($C_t = 10^{10}$).

Используемое в экспериментах оборудование включает в себя приборы определения вязкости модельного материала и установку «Разлом». Эта установка имеет площадь рабочего стола 1,5 x 1,0 м и позволяет воспроизводить в моделях процессы формирования зон разломов в условиях растяжения, сжатия, среза или их комбинаций при разных скоростных режимах деформирования.

В ходе эксперимента развивающийся в модели процесс формирования зон разломов детально фотографировался цифровым фотоаппаратом через выбранный временной интервал. Полученные фотоматериалы составляли основу для построения необходимых структурных схем, с которых впоследствии снималась качественная и количественная информация с последующей её обработкой и анализом.

Результаты моделирования

Моделирование региональных структур. Как показано в [1, 2] существуют два типа ОАДВ сдвигов, имеющих разную деформационную природу. Оба они воспроизводились в моделях (рис. 1). Первый тип образуется при локализованной деформации среза, второй – при деформации тангенциального сжатия. Структурное выражение сдвиговых зон, формирующихся при сжатии, зависит от исходных геометрических параметров модели. Так, симметричные X-образно пересекающиеся сдвиговые зоны образуются только при определенном их соотношении, а именно когда толщина, длина и ширина модели относятся как 1 : 4 : 2,5. В длинных или наоборот коротких моделях будут реализовываться структурные ситуации, отличные от вышеописанной [2].

Сравнительный анализ внутреннего строения ОАДВ сдвигов разных типов показывает, что оно в обоих случаях представлено двумя системами сколовых разрывных нарушений со схожей кинематикой движений по ним. Однако угловые соотношения между разрывами разных систем и пространственное положение разрывов одноименных систем (простираение, угол падения) по отношению к осевым линиям ОАДВ сдвигов различаются [2].

Моделирование механизма формирования разломной сети Вилуйско-Мархинской зоны. Предложенная на основе полевых исследований модель многоэтапного развития разломной сети Вилуйско-Мархинской зоны была подвергнута экспериментальной проверке. Проведено две серии экспериментов, отличающихся по задачам и технике исполнения. В первой из них при двухактном и разнонаправленном деформировании модели, имитирующей платформенный чехол, выяснялась принципиальная возможность получения в ней систем разрывов по своим основным ориентировкам и кинематическим характеристикам, подобным системам разломов, наблюдаемым в природных условиях. С учетом полученных результатов во второй серии экспериментов воспроизводилась структурная ситуация для Мало-Ботуобинского кимберлитового района, восстанавливаемая по результатам полевых тектонофизических исследований и геофизическим данным [4].

Результаты первой серии экспериментов. Моделировалась ОАДВ сдвига при деформации сжатия. Поскольку возникающие в моделях структурные ситуации содержат в себе элементы случайности, для обеспечения надежности получаемых результатов каждый эксперимент многократно повторялся. Каждый

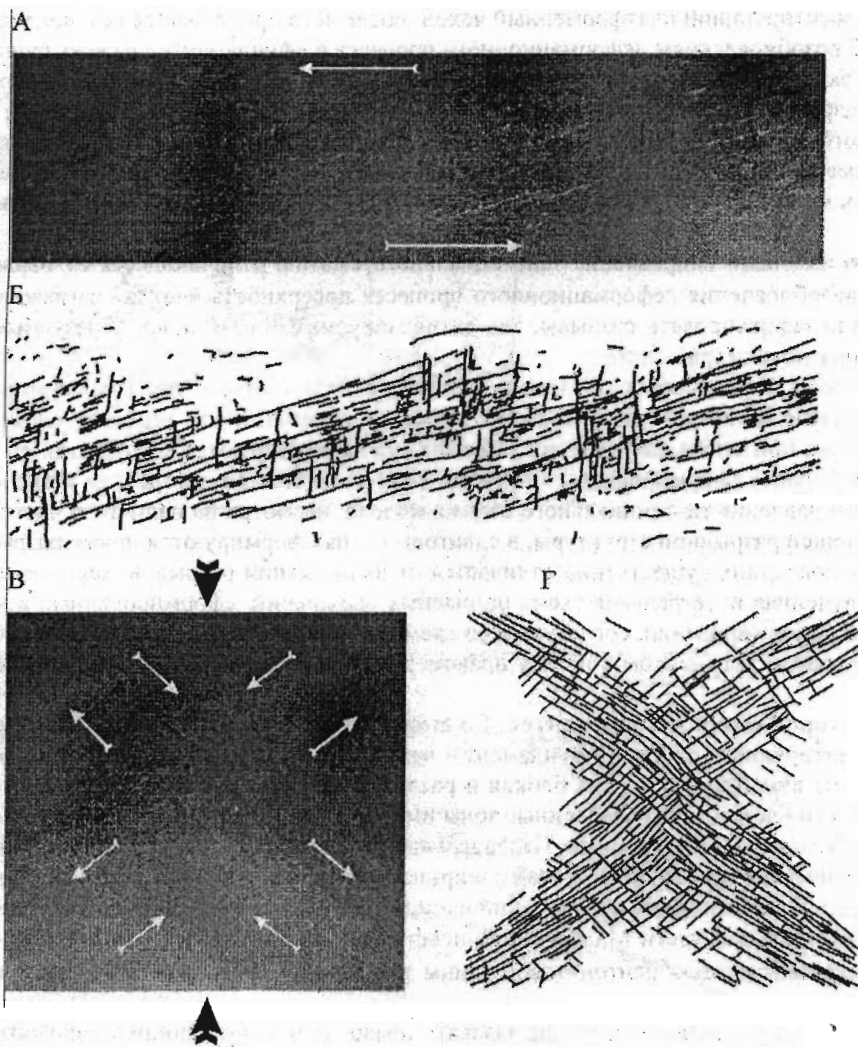


Рис. 1. Два типа сдвиговых зон в упруговязкопластичных моделях и их структурные схемы. Стрелки указывают на направления смещения крыльев сдвиговых зон (белые тонкие стрелки) и действие сжатия (жирные черные стрелки)

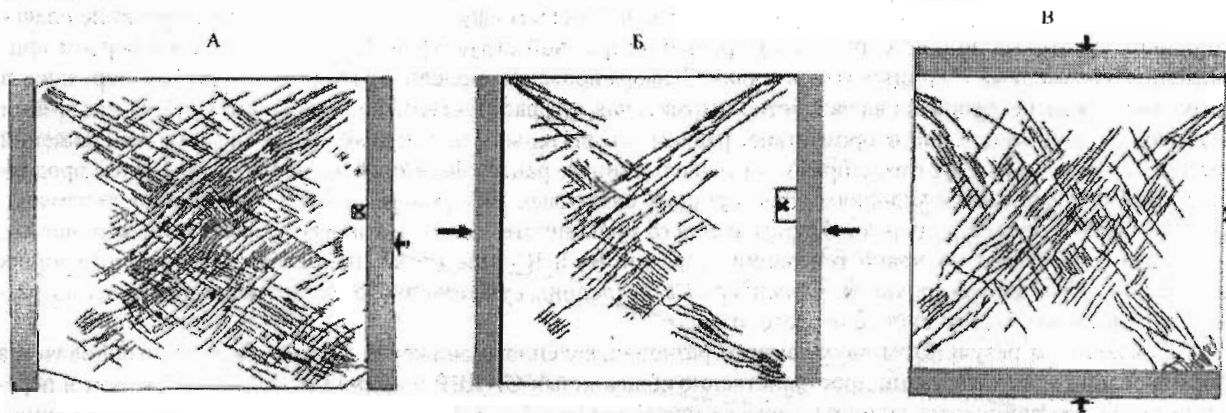


Рис.2. Последовательность структурообразования в модели в первый (А), второй (Б) и третий (В) этапы

эксперимент проводился в три этапа. В первый этап слой, имитирующий фундамент платформы, деформировался до тех пор, пока в нем не сформировались хорошо проработанные сопряженные сдвиговые зоны (рис. 2, А). Как уже отмечалось выше, системы разрывов, участвующие во внутреннем строении зон, развиваются закономерно от многочисленных непротяженных разрывов через избирательное разрастание одних и отмирание других к единому магистральному. Внутреннее строение каждой зоны в первую стадию развития представлено двумя системами опережающих разрывов типа R и R' – сколов [5]. В дальнейшем преимущественное развитие получали только первые из них. При наличии в модели хорошо развитых систем сколовых разрывов эксперимент останавливался. Во второй этап модель усложнялась. На «фундамент» накладыв-

вался второй слой, имитирующий платформенный чехол, после чего продолжался при неизменных условиях деформирования. С возобновлением деформационного процесса в «фундаменте» из всех существовавших на момент остановки эксперимента разрывов активизировались лишь наиболее крупные из них. Большинство же более мелких разрывов утратили активность и далее пассивно существовали в структуре «фундамента», не оказывая никакого влияния на перекрывающий его верхний слой и никак в нем не проявляясь. За счет продолжавшихся смещений по отдельным активным разрывам «фундамента» над ними в «чехле» со временем формировались их ОАДВ в виде редкой сети разрывов (рис. 2, Б) и эксперимент в очередной раз оставался.

В третий этап изменено направление тангенциального сжатия, отличающееся от первоначального на 90° . При этом до возобновления деформационного процесса поверхность «чехла» заглаживалась, что впоследствии позволяло зафиксировать разрывы, как активизируемые, так и вновь образуемые в измененных условиях нагружения модели (рис. 2, В).

Анализ особенностей разрывообразования в «чехле» в рамках третьего этапа эксперимента показал:

- сформированные на втором этапе системы разрывов сдвиговых зон верхнего слоя, имитирующего платформенный чехол, при смене направления действия сил активизируются фрагментарно, меняя при этом знак подвижки. Часть ранее сформированных разрывов (или их сегментов) на третьем этапе не проявляется;

- при смене направления тангенциального сжатия модели, несмотря на наличие и частичную активизацию уже существующей разрывной структуры, в сдвиговых зонах формируются новые разрывы (R и R' сколы). Ориентировка последних существенно отличается от направлений разрывов, характерных для второго этапа. В целом полученная интегральная схема разрывных нарушений, сформированных в модели при разнонаправленном её деформировании, согласуется со схемами, построенными по полевым наблюдениям, что является дополнительным аргументом в пользу правомерности предложенной интерпретации полевых данных [6].

Результаты второй серии экспериментов. Во второй серии экспериментов также использована двухслойная модель, имитирующая систему «фундамент – чехол». «Фундамент» был изначально неоднородным и состоял из системы линейно вытянутых блоков и разделяющих их узких зон. Их вязкость была на 2 порядка меньше вязкости блоков. Эти ослабленные зоны имитировали главные глубинные разломы Вилюйско-Мархинской зоны: Западный, Центральный, Параллельный, Восточный. Их пространственное расположение в модели, морфологические особенности, а также ширина находились в полном соответствии со специально построенной для целей эксперимента структурной схемой, в основу которой была положена сводная карта магнитного поля центральной части Мало-Ботуобинского района масштаба 1: 10 000. Структурированный «фундамент» перекрывался слоем бентонитовой глины толщиной $4 \cdot 10^{-2}$ м, имитирующим осадочный чехол мощностью 2 км.

Экспериментальная установка позволяла задавать право- или левосторонние горизонтальные перемещения всех блоков «фундамента» относительно друг друга с заданными скоростями, соответствующими по условиям подобия природным скоростям в десятки доли миллиметров в год.

Эксперимент проводился в два этапа. На первом из них задавались правосторонние сдвиговые перемещения всей системы блоков, при которых разделяющие их зоны разломов функционировали как правые сдвиги. Смещение их крыльев инициировало в перекрывающем «фундамент» «чехле» формирование правосторонних сдвиговых зон, со сложной внутренней разрывной структурой. Ширина этих зон в первом приближении соизмерима с мощностью «чехла». Деформирование модели продолжалось до тех пор, пока в сдвиговых зонах не сформировалась четко выраженная инфраструктура, представленная двумя системами разрывов R- и R'-типов. На втором этапе, равном по длительности первому, после реверса перемещений системы блоков «фундамента» с право- на левосторонние, ранее сформированные в «чехле» зоны продолжали своё развитие уже в условиях левосторонних сдвиговых деформаций. Смена направления перемещения их крыльев привела к переходу подавляющего большинства ранее активных разрывов в пассивное состояние и формированию новой генерации разрывов R- и R'-типа новых направлений, соответствующих новым условиям деформирования. Ориентировка последних существенно отличается от направлений разрывов, образовавшихся в течение первого этапа.

Совокупным результатом двухэтапного разнонаправленного движения блоков «фундамента» является формирование в «чехле» серии пространственно сближенных ОАДВР шириной от 2,0 до 4,0 см (что в пересчете через коэффициенты подобия соответствует ширине 1,0–2,0 км в природном аналоге), внутреннее строение которых представлено разновременными и разноориентированными структурными парагенезисами разрывов R- и R'-типов (рис. 3).

Полученные экспериментальные результаты имеют удовлетворительную сопоставимость с результатами натурных наблюдений. Показательно в этом плане сравнение роз диаграмм простираций локальных крутопадающих разрывных нарушений на изученной площади и разрывов в модели. Отличия в ориентировках их основных направлений составляют не более 10° .

В целом проведенное моделирование подтверждает предлагаемую геодинамическую модель многоэтапного формирования основных систем разрывных нарушений осадочного чехла в пределах Вилюйско-Мархинской зоны и намеченную полевыми тектонофизическими методами последовательность в смене кинематики движений по ним с право- на левосторонние.

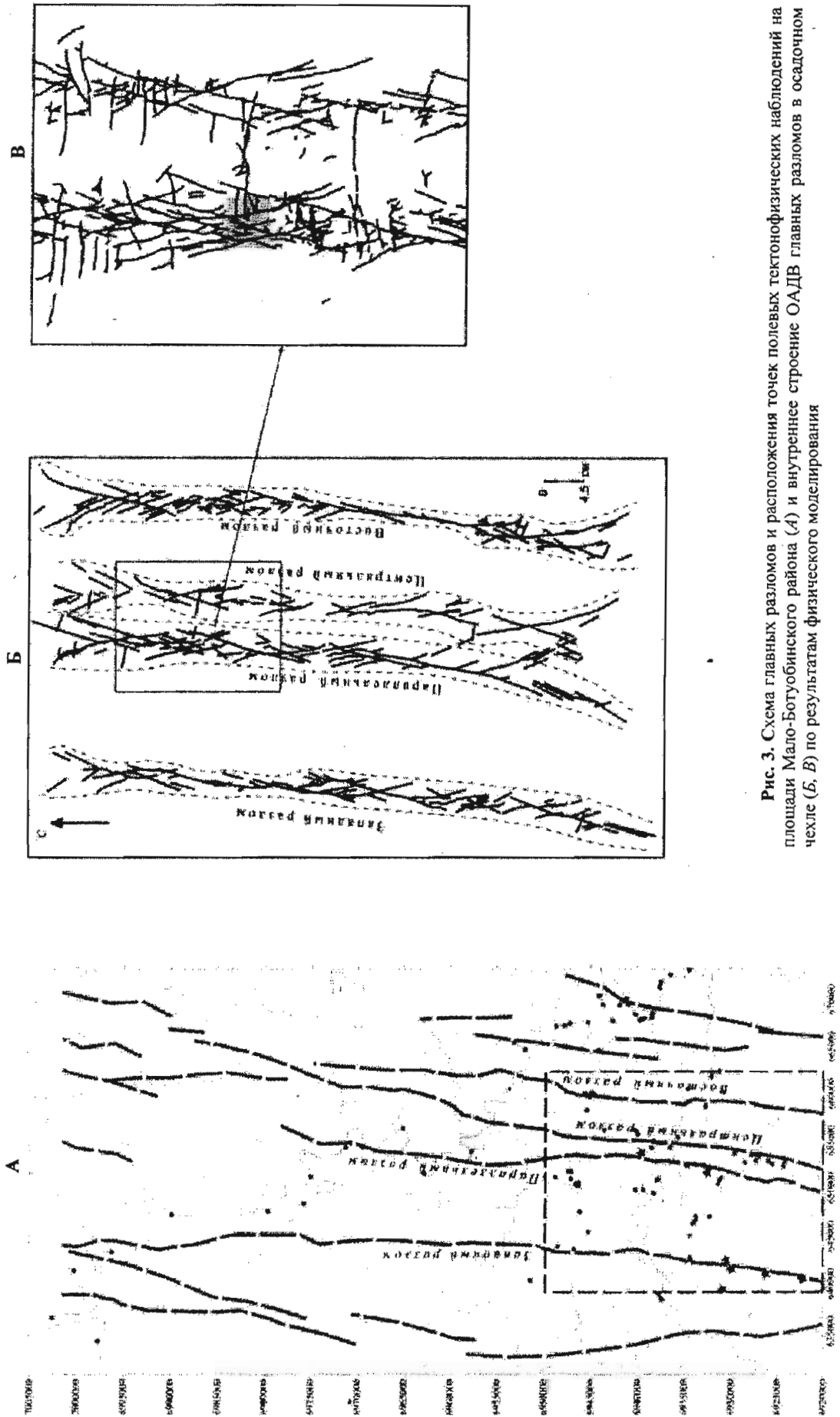


Рис. 3. Схема главных разломов и расположения точек полевых тектонофизических наблюдений на площади Мало-Ботубинского района (А) и внутреннее строение ОАДВ главных разломов в осадочном чехле (Б, В) по результатам физического моделирования

Моделирование локальных рудоконтролирующих структур

По убеждению многих исследователей, благоприятными для локализации кимберлитов на локальном уровне являются присдвиговые пулл-апарт структуры растяжения и разломные узлы. Проиллюстрируем некоторые результаты их моделирования.

Результаты моделирования пулл-апарт структур. При воспроизведении однонаправленного процесса формирования ОАДВ сдвигов (левого или правого) локальные пулл-апарт структуры образуются как правило при значительных величинах амплитуд смещения во вторую и третью стадии развития деформационного процесса, когда плоскости активных разрывов на отдельных участках меняют свое простирание, подвергаясь изгибным деформациям (рис. 4). Это не совсем соответствует платформенной ситуации, где нет высоких скоростей перемещения по разломам и не зафиксированы значительные амплитуды сдвиговых перемещений, и где, как отмечалось выше, процесс разрывообразования редко выходит за рамки первой стадии. Ситуация кардинальным образом меняется при двухактном формировании ОАДВ сдвигов с реверсом направления движений их крыльев. В таких условиях пулл-апарт структур явление достаточно частое уже в рамках первой стадии и их морфологические особенности сопоставимы с морфологией структур, контролирующей алмазоносные кимберлитовые тела. Так, сравнение структурных ситуаций на модели и на участке локализации трубки Юбилейная показывает почти полную их идентичность (рис. 5).

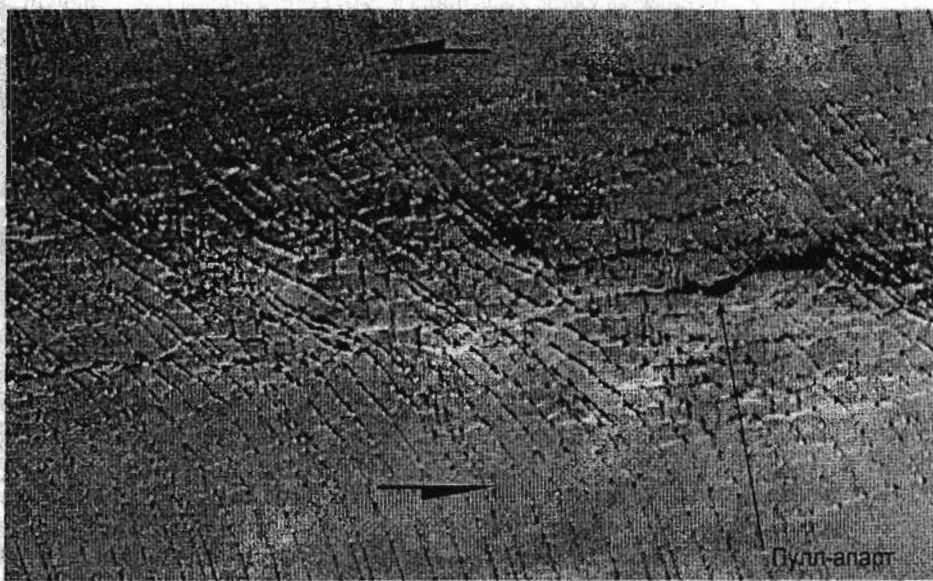


Рис. 4. Пример локальной пулл-апарт структуры в модели во вторую стадию развития ОАДВ левого сдвига

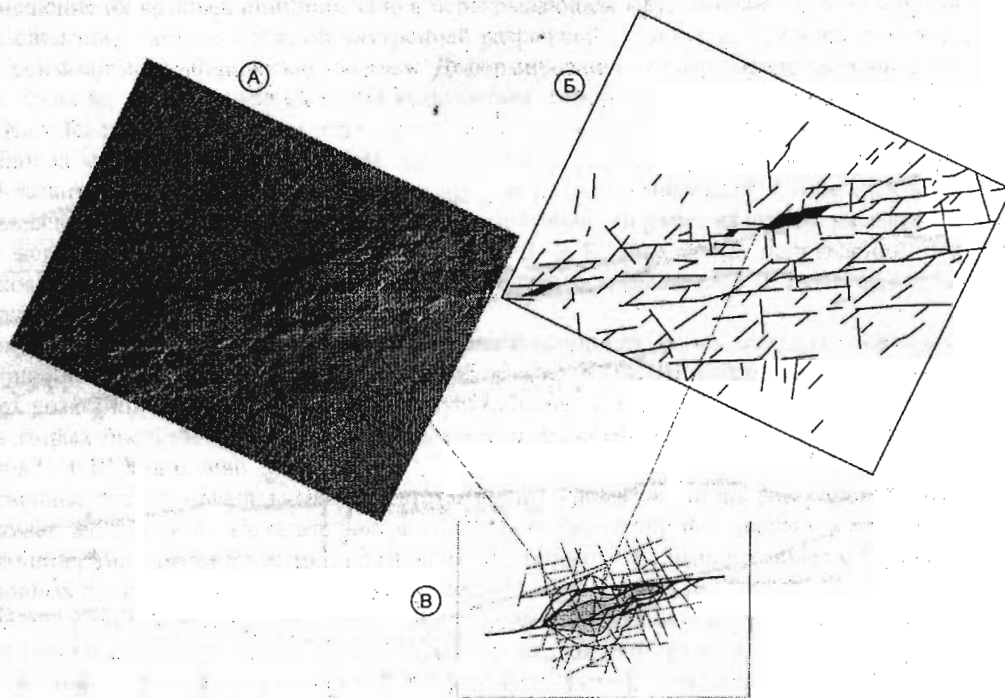


Рис. 5. Пулл-апарт структуры в модели (А, Б) и природе (В) (на примере трубки Юбилейная)

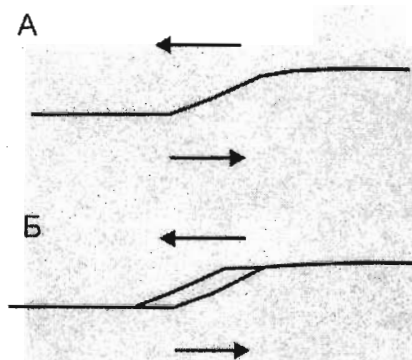


Рис. 6. Морфологическая особенность сместителя разлома фундамента, благоприятная для образования пулл-апарт структуры в перекрывающем его чехле

Более масштабные региональные пулл-апарт структуры реализуются чаще и пространственно связаны с теми участками чехла, в основании которых присутствует разлом фундамента с характерной морфологией сместителя (рис. 6).

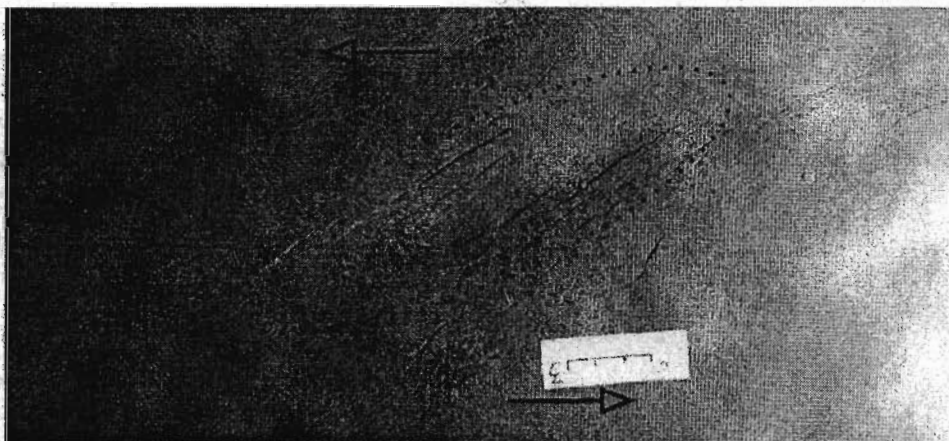
С учетом этих особенностей было проведено моделирование процесса формирования левосторонней пулл-апарт структуры. Были изготовлены специальные штампы, имитирующие необходимый изгиб сместителя. На рис. 7 представлены фрагмент модели (А) и соответствующая ему структурная схема (Б).

Результаты моделирования узлов пересечения разломов. Для моделирования разломных узлов была изготовлена конструкция из четырех штампов, способных одновременно перемещаться относительно друг друга и имитирующие активизацию пересекающихся разломов в фундаменте (рис. 8, А). Как видно из приведенной фотографии модели, деформированной в два этапа с реверсом движений штампов, относительно простые сдвиговые смещения по отдельным протяженным разломам трансформируются в сложную

систему движений в местах их пересечений (рис. 8, Б). Приведенные структурные схемы отражают состояние разрывной сети в модели к концу первого (рис. 8, В) и второго (рис. 8, Г) этапов. Хорошо видно, что в условиях реверсного движения штампов разрывная структура существенно усложняется.

Не останавливаясь на детальном рассмотрении результатов экспериментов, подчеркнем, что в итоге в зонах и узлом сочленении пересекающихся сдвигов формируются два разрывных парагенезиса (R и R' -сколы), соответствующих различной кинематике движения штампов. Два типа участков локального раскрытия, отличающиеся морфологически, могут формироваться в пределах боковых ветвей разломного узла и в его центральной части (рис. 9, 10). Каждому из них можно привести в соответствие конкретные природные аналоги (рис. 9, В; 10, В).

А



Б



Рис. 7. Региональная пулл-апарт структура в модели (оконтурена пунктирной линией) (А) и её структурная схема (Б)

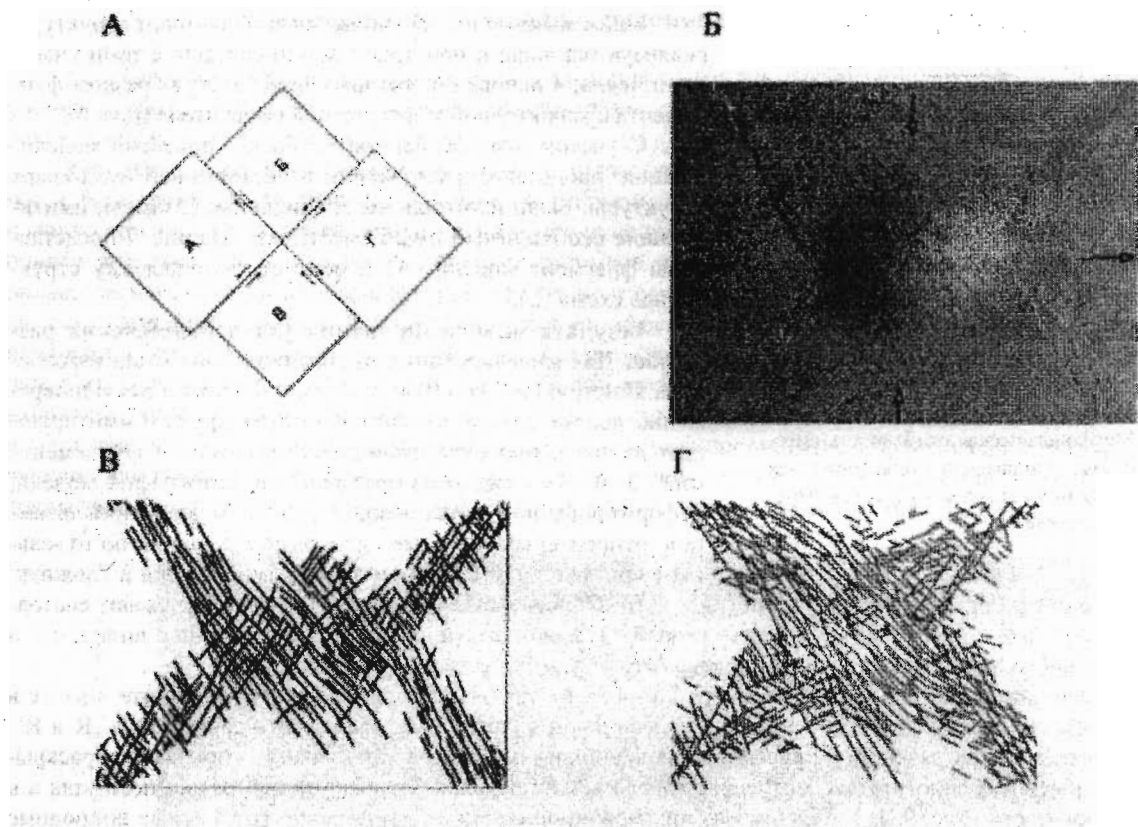


Рис. 8. Системы разрывных нарушений, формирующиеся в «осадочном чехле» при активизации X-образного разломного узла в «фундаменте»

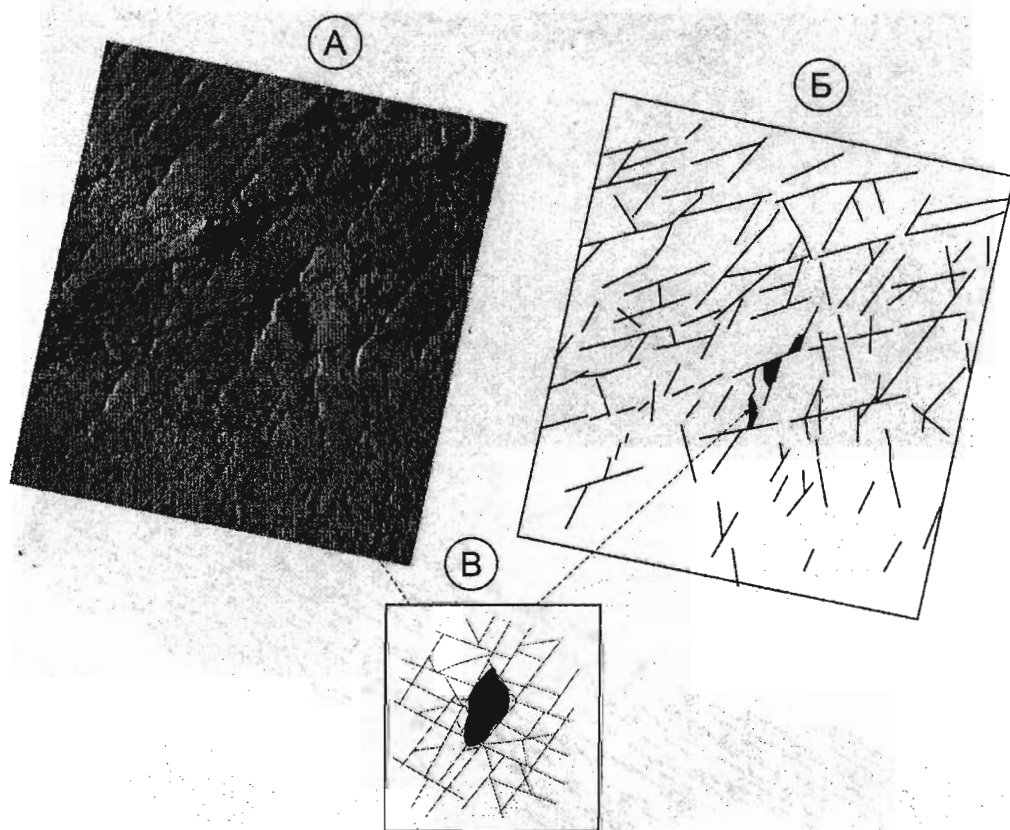


Рис. 9. Локальная структура раскрытия в боковой ветви разломного узла: А – фрагмент боковой ветви разломного узла в модели и Б – его структурная схема; В – разломная сеть участка локализации трубки Нюрбинская

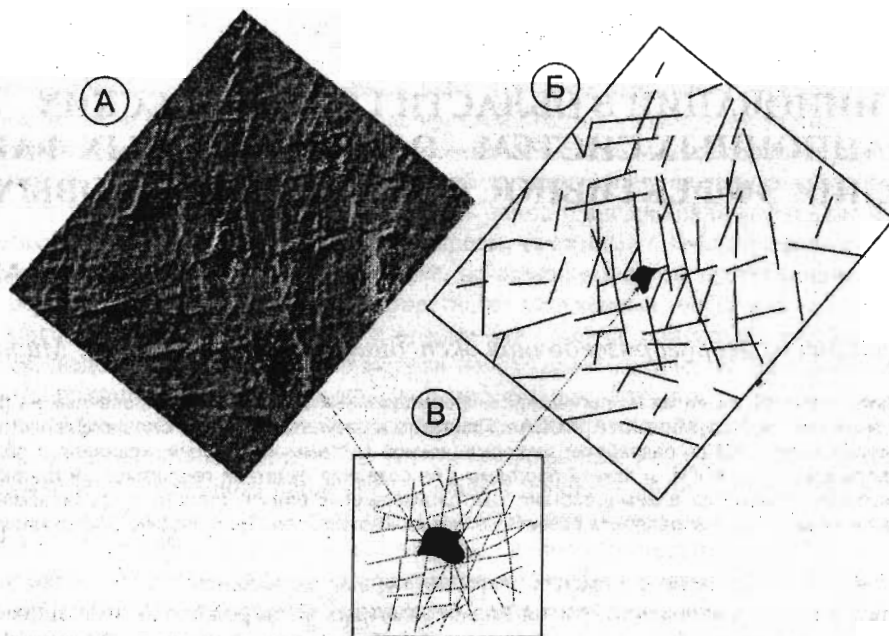


Рис. 10. Локальная структура раскрытия в разломном узле: А – фрагмент разломного узла в модели и Б – его структурная схема; В – разломная сеть участка локализации трубки Комсомольская

Заключение

Приведенные выше результаты физического моделирования демонстрируют первый и весьма непродолжительный опыт его использования при решении отдельных задач в рамках большой и сложной проблемы структурного контроля алмазоносных кимберлитовых тел. Эти результаты, несмотря на их иллюстративный характер, нередко являются весомыми аргументами в выборе варианта интерпретаций геолого-геофизических данных и последующем построении стратегии прогнозно-поисковых работ.

Дальнейшее развитие экспериментальных исследований в приложении к алмазной тематике будет иметь разноплановый характер и включать в себя моделирование как региональных разломных систем на уровне кимберлитовых районов, так и локальных систем разрывных структур, контролирующих отдельные трубки.

Список литературы

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
2. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере: Зоны сдвига. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991. – 261 с.
3. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1983. – 112 с.
4. Гладков А.С., Зинчук Н.Н., Шерман С.И. и др. Тектонофизический подход к анализу разломов Мало-Ботубинского кимберлитового района // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы решения. – Мирный, 2003. – С. 211–248.
5. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2003. – 243 с.
6. Матросов В.А., Борняков С.А., Гладков А.С. Новый подход к оптимизации прогноза при поисках алмазоносных кимберлитов // Докл. РАН. – 2004. – Т. 395, №2. – С. 220–223.