

Оригинальная статья / Original article
УДК: 551.242.5+551.243.6+553.078.2+553.81

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТИ РАЗРЫВОВ НАКЫНСКОГО ПОЛЯ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

© А.В. Черемных¹, А.С. Гладков², А.С. Черемных³

¹⁻³Институт земной коры СО РАН,
Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель статьи – рассмотреть современные представления о разрывной сети Накынского поля и структурном контроле кимберлитовых тел, получить данные о формировании основных разломов поля в результате реверсных перемещений блоков фундамента при активизации северо-восточных глубинных разломов Вилюйско-Мархинской зоны. **Методы.** Для верификации этой гипотезы применено физическое моделирование разрывообразования в чехле платформы над подвижными блоками фундамента. С учетом внутренней структуры Вилюйско-Мархинской разломной зоны модернизированы штампы экспериментальной установки и проведена серия опытов физического моделирования на глинистой пасте. Для выяснения специфики разрывообразования при различных параметрах моделей выполнено 23 эксперимента. Рассмотрено влияние скорости деформирования, толщины модели, направления перемещения штампов экспериментальной установки на специфику разрывообразования. **Результаты.** По результатам экспериментов выдвинуто предположение, что мощность осадочного чехла при формировании разрывов Накынского кимберлитового поля была близка современной, а скорость перемещения блоков по дизъюнктивам Вилюйско-Мархинской зоны – медленной. Установлена вероятная последовательность перемещения блоков фундамента – правосторонний сдвиг на первой стадии и левосторонний – на второй, а также изучены этапы формирования сети разрывов. Показана возможность образования Северного, Ботуобинского, Дьяхтарского и Диагонального разломов в чехле платформы в результате реверсных сдвиговых перемещений блоков фундамента по разломам северо-восточного простирания. **Выводы.** Модельные аналоги перечисленных выше разломов образуются при условии параллельности векторов смещения блоков и простирания Южного разлома. Эксперименты также позволяют предположить, что образование и (или) активизация Средне-Мархинской зоны также могут быть обусловлены перемещением блоков фундамента в пределах Вилюйско-Мархинской разломной зоны.

Ключевые слова: разрывы осадочного чехла, физическое моделирование, Вилюйско-Мархинская разломная зона, структурный контроль, кимберлитовые тела.

Формат цитирования: Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. Экспериментальное исследование формирования сети разрывов Накынского поля Якутской алмазоносной провинции // 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.

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

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

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

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

³Черемных Алексей Сергеевич, инженер лаборатории тектонофизики, e-mail: acherem@crust.irk.ru

Aleksei S. Cheremnykh, Engineer of Tectonophysics Laboratory, e-mail: acherem@crust.irk.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FAULT NETWORK FORMATION IN THE NAKYN FIELD OF THE YAKUTSK DIAMONDIFEROUS PROVINCE

A.V. Cheremnykh, A.S. Gladkov, A.S. Cheremnykh

Institute of the Earth's crust SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation.

ABSTRACT. Purpose. The article deals with the modern ideas about the fault network of the Nakyn field and the structural control of kimberlite bodies. A hypothesis is advanced on the formation of the field main faults as a result of reverse movement of the foundation blocks under northeastern deep faults activation in the Viluy-Markha area. **Methods.** This hypothesis is verified through the analog modeling of faulting in the platform cover above the moving blocks of the foundation. The stamps of an experimental installation have been modernized with the consideration of the internal structure of the Vilyui-Markha fault zone and a series of physical modeling experiments on the clay paste has been carried out. 23 experiments have been performed to identify the faulting specifics at different model parameters. The effect of the deformation rate, model thickness, movement direction of experimental installation stamps on faulting features has been examined. **Results.** Based on the experimental results a hypothesis is advanced stating that the thickness of sedimentary cover under formation of the Nakyn kimberlite field faults was close to the present one and the speed of the block movement along the Viluy-Markha area faults was slow. A probable sequence of basement block movements is determined: it is a right-lateral strike-slip in the first stage and left-lateral strike-slip in the second stage. The formation stages of the fault network are studied as well. The formation possibility of the Severny, Botuoba, Dyakhtarsky and Diagonal faults in the platform cover by reverse strike-slip displacements of the basement blocks along the faults of the northeast strike is shown. **Conclusions.** The model analogues of the faults listed above are formed under the condition of the parallelism of block displacement vectors and the Southern fault strike. The experiments allow to make an assumption that formation and (or) activation of the Mid-Markha area can also be caused by the movement of the foundation blocks within the Viluy-Markha fault zone. *Keywords: sedimentary cover faults, analog modeling, Viluy-Markha fault zone, structural control, kimberlite bodies*

For citation: Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. Experimental investigation of fault network formation in the Nakyn field of the Yakutsk diamondiferous province. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits. 2017. Vol. 40. No. 1. Pp. 66–82. (In Russian).

Введение

Перспективы наращивания минерально-сырьевой базы алмазодобывающего комплекса АК «АЛРОСА» ПАО в пределах Якутской алмазоносной провинции связываются, во-первых, с новыми районами со сложными условиями поисков, где кимберлитовые тела перекрываются более поздними образованиями, во-вторых, с вероятностью обнаружения в известных кимберлитовых полях рудных тел, обладающих неконтрастными индикаторными характеристиками. Здесь эффективность применяемых поисковых технологий сегодня заметно ниже (при резком увеличении затрат на высокоточную геофизику и использовании шлихо-минералогических методов в скважинном варианте).

Одной из причин подобного положения дел является тот факт, что в современных знаниях о коренных месторождениях алмазов Якутской алмазоносной провинции преобладают данные о вещественном строении кимберлитовых тел, их физико-механических свойствах, а также особенностях распределения различных типов руд в их пределах. Они являются основой для большинства существующих поисковых методов, а также для мероприятий по оптимизации технологии добычи и переработки алмазосодержащего сырья. Структурные особенности строения месторождений в силу различных причин изучены гораздо слабее. Между тем отсутствие полноценной структурной составляющей в моделях формирования и строения коренных

месторождений алмазов является фактором, сдерживающим развитие и совершенствование поисковых методов. Прорыв в поисковых технологиях может быть обеспечен за счет привлечения новых знаний о строении коренных месторождений, то есть об их тектонической структуре.

В середине прошлого века один из основоположников учения о структурах рудных полей и месторождений В.М. Крейтер отмечал [1]: «... При изучении деформационных структур эндогенных рудных месторождений исследователь стоит перед необходимостью выяснения двух неразрывно связанных вопросов: 1) происхождение деформационных структур; 2) использование рудоносными растворами этих структур в качестве рудоподводящих, рудораспределяющих и рудовмещающих полостей. Первый вопрос решает структурная геология, второй – обычно поисково-разведочная геология...» При этом он особо подчеркивал, что структурные построения должны не только опираться на методы геолого-исторического анализа, но и использовать методы физического изучения деформаций.

Целью выполненных исследований было изучить специфику разрывообразования в осадочном чехле платформы при активизации Вилуйско-Мархинской разломной зоны на примере Накынского кимберлитового поля. Для этого была проведена серия экспериментов физического моделирования на эквивалентных материалах, учитывающая особенности строения разрывной сети кимберлитового поля.

Разрывная сеть Накынского поля и существующие представления о структурном контроле кимберлитовых тел

Накынское кимберлитовое поле расположено в Средне-Мархинском алмазоносном районе, который находится в зоне сочленения юго-восточного склона

Анабарской антеклизы с северо-западным бортом среднепалеозойской Ыгыттинской впадины и наложенной на нее мезозойской Вилуйской синеклизой. Мощность платформенного чехла изменяется от 900 м на северо-западе района до 5000 м на юго-востоке.

Считается, что поле приурочено к участку пересечения Вилуйско-Мархинской и Средне-Мархинской зон разломов. Первая из них представляет собой зону глубинного разлома протяженностью более 200 км и на данном отрезке имеет северо-восточное простирание при ширине 60 км и более [2, 3]. В строении зоны условно намечены две ветви: с простиранием СВ 30–40° и СВ 50–60°. Первая считается основной, разломы в ее пределах хорошо выражены в геофизических полях и трассируются протяженными дайками долеритов. Вторая ветвь, расположенная под углом к основной, «причленяется» к последней с запада. Отмечено, что разломы второй ветви существенно уступают по протяженности разломам основной и прослеживаются по слабоинтенсивным аномалиям магнитного, а иногда и гравитационного поля. Однако далее к северо-востоку роль разломов этой ветви становится преобладающей [3].

Средне-Мархинская зона расположена практически под прямым углом по отношению к нарушениям Вилуйско-Мархинской зоны. Протяженность ее неясна, а ширина оценивается в 80 км. Зона представлена серией разрывных нарушений в бассейнах р. Накын и Ханья, которые имеют простирание от северо-западного до субмеридионального (СЗ-С 330–0°). Разломы характеризуются сложной морфологией и изменчивостью простирания, часто смещаются нарушениями Вилуйско-Мархинской зоны. Отмечена слабая выраженность их в платформенном чехле, где они фиксируются в магнитном поле прерывистыми, дугообразными, изогнутыми и реже прямоли-

нейными аномалиями, обусловленными дайками среднепалеозойских долеритов [2, 3].

Считается, что разломы северо-восточного направления являются более поздними по времени формирования, чем разломы северо-западного направления. В пользу этого свидетельствуют зафиксированные случаи экранирования и смещения последних, наличие в них при приближении к северо-восточным нарушениям раздувов даек, а также изменение простирания. Тектонические нарушения, образующие рудоносный блок и ограничивающие его, являются разломами второго порядка по отношению к системе глубинного разлома Вилуйско-Мархинской зоны. Внутри рудоносного блока картируются разломы более высоких порядков [2, 3].

Строение Накынского поля определяют разломы различных направлений. Известные месторождения и рудопроявления локализованы в линейном блоке между Бадаранским и Южным разломами (рис. 1). Строение блока осложняют Северный, Дьяхтарский и Ботубинский разломы с простиранием СВ 50–65°. Существует мнение, что данные нарушения являются рудоконтролирующими. В основе этого мнения лежит известный факт о том, что кимберлитовые трубки располагаются либо непосредственно в них, либо поблизости (первые сотни метров). Отмечено также, что Дьяхтарский и Ботубинский разломы слабо выражены в структуре нижнепалеозойских пород.

В свою очередь кимберлитовые тела Накынского поля локализованы в зоне Диагонального разлома, где образуют цепочку из пяти тел, расположенных практически на одной линии. Расстояния между крайними телами не превышают первых десяти километров, а простирание цепочки составляет СВ 25–30°. Ориентировка длинных осей кимберлитовых тел также близка к данному направ-

лению. Диагональный разлом слабо отражается в магнитном поле, поскольку не содержит базитовых даек. Данная структура выделяется и прослеживается методом высокочастотного сейсмического зондирования [4], а также картируется по набору признаков (микробрекчирование, нарушенное залегание пластов, наличие микросбросов, трещин с зеркалами скольжения, минерализованных прожилков, выполненных кальцитом, пиритом, доломитом в керне скважин) [5]. Дислоцированность вмещающих пород устанавливается и непосредственно в околотрубном пространстве в виде флексурных перегибов нижнепалеозойских осадочных отложений, сдвиговых и сбросовых деформаций.

Суммируя обзор представлений о структурном контроле Накынского кимберлитового поля в целом и рудных тел в его пределах элементами разломной тектоники, можно констатировать, что они носят самый общий характер. Известно, что поле приурочено к узлу крупных разломных зон северо-западного и северо-восточного направлений, а рудные тела локализованы в разломе север-северо-восточной ориентировки, который к тому же слабо проявлен в геофизических полях. Нами предпринята попытка воспроизвести сеть разломов Накынского поля при сдвиговых перемещениях блоков фундамента в Вилуйско-Мархинской разломной зоне. Задача воспроизведения узла пересечения северо-восточных разрывов Вилуйско-Мархинской зоны с северо-западными дислокациями Средне-Мархинской зоны не ставилась, так как анализ карты разломов Накынского кимберлитового поля (рис. 2, А), составленной на основе геофизической информации для Вилуйско-Мархинской зоны, позволил выделить три основных направления разломов (северо-западное – 305°, субмеридиональное – 5° и северо-восточное – 45°), угловые соотношения между которыми свидетельствуют о том,

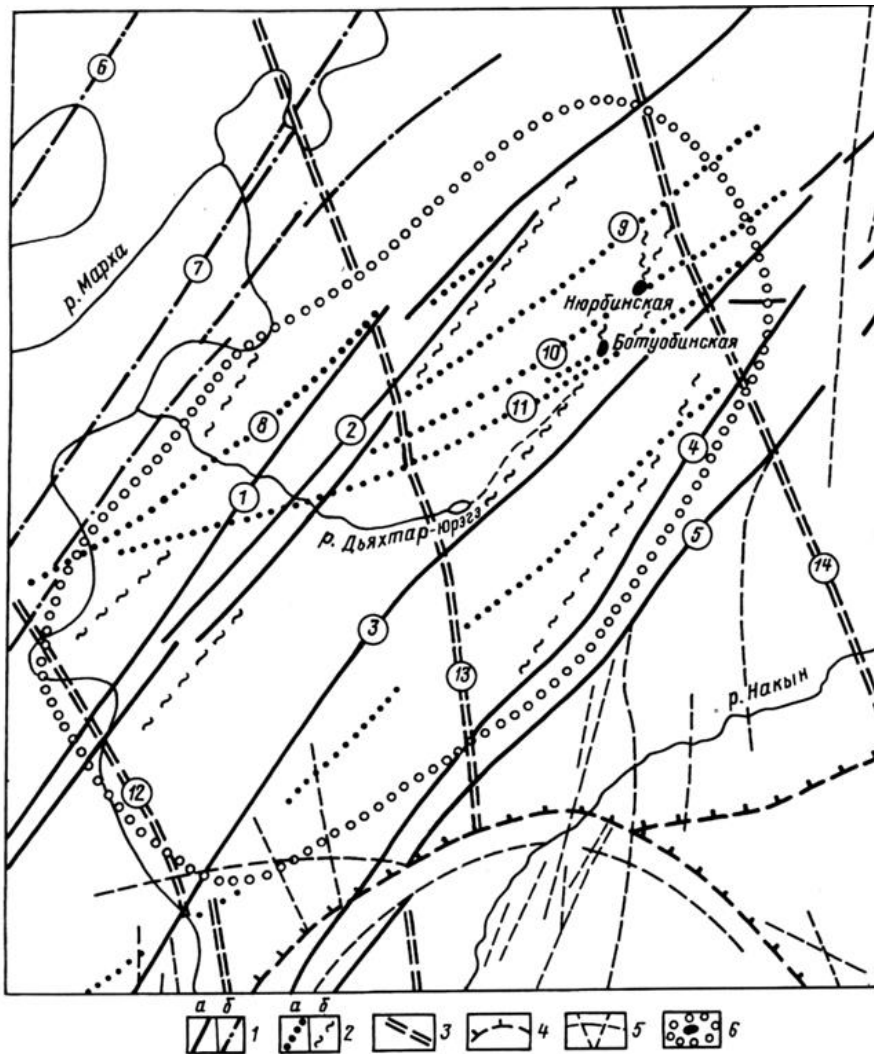


Рис. 1. Структурная схема Накынского кимберлитового поля [2]:

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-Дьяктарский, 9 – Северный, 10 – Ботуобинский, 11 – Дьяктарский), 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-Юрхский, 13 – Киргеляхский, 14 – Узен-Уолбинский); 4 – контуры субгоризонтальных интрузий траппов на разных уровнях в осадочном чехле; 5 – кольцевые и радиальные апофизы траппов; 6 – кимберлитовые трубки и предполагаемый контур поля

Fig. 1. Structural diagram of the Nakyn kimberlite field [2]:

1–2 – faults of the Viluy-Markha tectonic zone of the northeast strike composed by trap dikes: 1 – first order: a – central part of the zone (1 – Liendokitsky, 2 – Badaran, 3 – Southern, 4–5 – Ust-Nakyn-I and -II), b – its lateral branches (6 – Moroidon-Tyung, 7 – Hanninsky); 2 – third order: a – kimberlite controlling (8 – Ust-Dyakhtarsky, 9 – Northern, 10 – Botuobinsky, 11 – Dyakhtarsky), b – presumable ore-bearing, hidden, fragmentarily expressed in geophysical fields; 3 – faults of the Mid-Markha tectonic zone of the north-western strike of the second order determining the linear-block structure of the kimberlite field: (12 – Kurung-Yuryakhsky, 13 – Kirgelyakhsky, 14 – Uein-Uolbinsky); 4 – contours of subhorizontal trap intrusions at different levels in the sedimentary cover; 5 – annular and radial apophyses of traps; 6 – kimberlite pipes and the prospect field contour

что этот дизъюнктив характеризуется сдвиговым кинематическим типом, а его зону составляют разрывы, характерные и для остальной площади. Однако сопоставление выявленных направлений со структурными парагенезисами правостороннего и левостороннего сдвига не позволяет достоверно определить характер перемещения крыльев (рис. 2, Б), в связи с чем была выдвинута гипотеза

о формировании основных разломов Накынского кимберлитового поля в результате реверсных перемещений блоков фундамента при активизации основных северо-восточных глубинных разломов Вилуйско-Мархинской зоны. Для верификации этой гипотезы проведено физическое моделирование разрывообразования в чехле платформы над подвижными блоками фундамента.

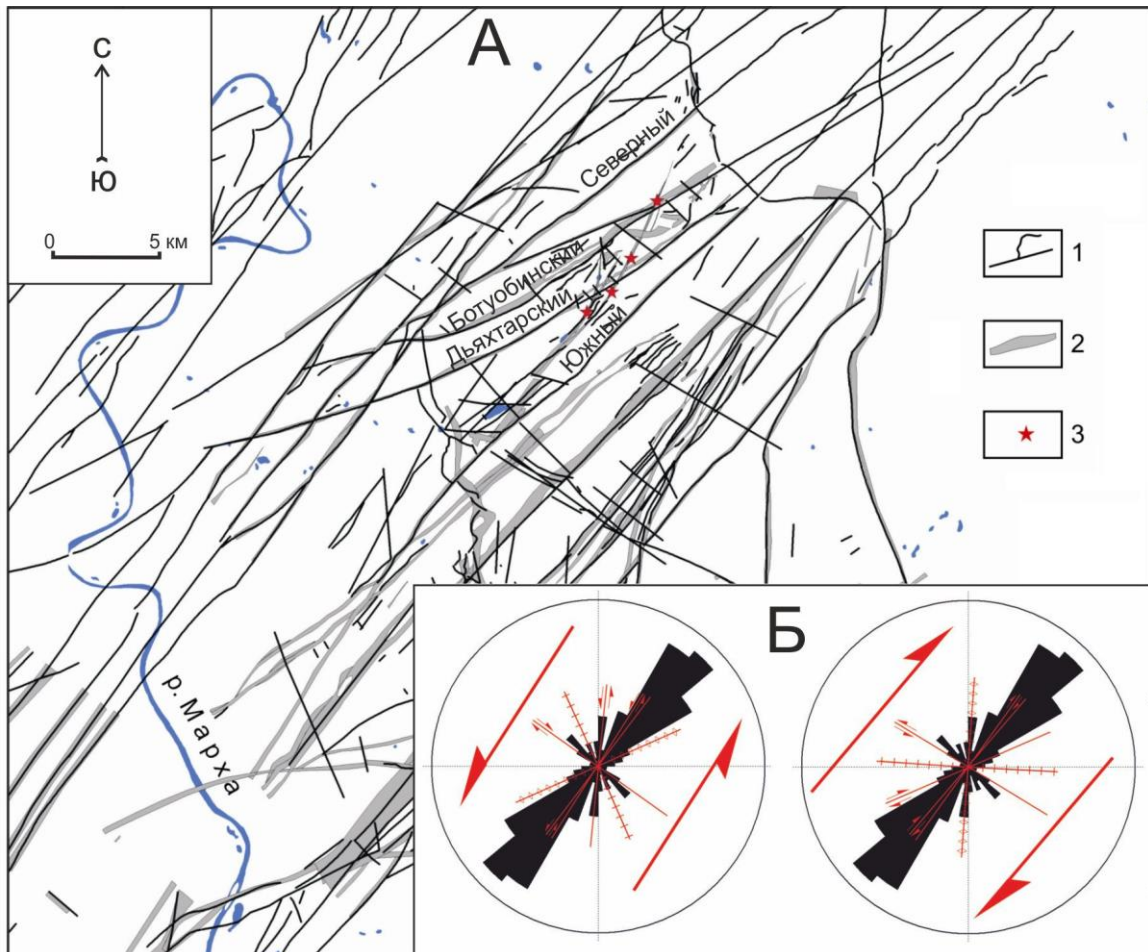


Рис. 2. Разломная тектоника в районе Накынского кимберлитового поля:
А – схема разломов района исследований (по данным геофизической службы БГРЭ):
1 – региональные разломные зоны и их фрагменты, 2 – ширина зон по данным геофизических методов, 3 – кимберлитовые трубки;
Б – сопоставление розы-диаграммы разломов Вилуйско-Мархинской зоны со структурными парагенезисами зон левостороннего и правостороннего сдвига

Fig. 2. Fault tectonics in the Nakyn kimberlite field:
А – scheme of faults in the area under investigation (according to geophysical service of the Botuoba Geological Exploration Expedition (BGEE)):
1 – regional fault zones and their fragments,
2 – zone width according to geophysical data, 3 – kimberlite pipes;
Б – comparison of the rose-diagram of Vilyuy-Markha zone faults with structural parageneses of left-lateral and right-lateral shift zones

Методика моделирования

Специфика формирования разрывов в чехле платформ при активизации блоков фундамента, как правило, изучается с помощью экспериментальных методов [6–10 и др.], которые являются весьма перспективными для решения подобных задач. Особое значение моделирование имеет при изучении истории развития структур рудных полей и месторождений, когда геологической информации недостаточно для выяснения последовательности формирования дислокаций.

Процесс формирования разлома в природных условиях в зависимости от его размеров может длиться от нескольких тысяч до десятков миллионов лет. Эксперимент, проведенный с соблюдением условий подобия, дает возможность проследить динамику изучаемого процесса, выявить общие закономерности его развития с выделением стадий и характерных для них структур, определить влияющие на него факторы и оценить направленность их действия.

Согласно критерию-комплексу подобия [11], необходимо соблюдение следующего условия:

$$C_{\eta} = C_L \cdot C_g \cdot C_p \cdot C_T,$$

где C_{η} – множитель подобия вязкости; C_L – множитель подобия линейных размеров; C_g – множитель подобия силы тяжести; C_p – множитель подобия удельного веса; C_T – множитель подобия времени.

Множитель подобия линейных размеров составляет $1 \cdot 10^5$, т.е. 1 см модели соответствует 1 км в природе. Так как эксперименты проводятся при естественных условиях тяготения Земли, то $C_g = 1$. Средняя плотность пород в пределах Накынского поля⁴ – $2,55 \text{ г/см}^3$, а удельный вес применяемого в экспериментах модельного материала (глинистая паста) –

2 г/см^3 . Таким образом, множитель подобия удельного веса составляет 1,28. Время проведения опытов составляет от десятков минут до 6 ч, что обусловлено различной скоростью деформирования моделей. Продолжительность формирования региональной разломной зоны оценивается нами в сотни тысяч и даже миллионы лет, в связи с чем множитель подобия времени составляет $\approx 10^9$. Согласно расчетам М.В. Гзовского [12], вязкость толщ, сложенных горными породами, подобными толщам осадочного чехла Сибирской платформы в районе исследования, составляет 10^{18} – 10^{20} Па·с.

Проведенные по формуле нахождения C_{η} расчеты показали, что для соблюдения условий подобия моделей природным объектам необходимо применять эквивалентный материал с вязкостью 10^4 – 10^6 Па·с. Нами в качестве модельного материала использовались глинистые пасты соответствующей вязкости, свойства которых детально изучены в работе [13].

Объектами физического моделирования служили особенности строения и эволюции разломных зон Средне-Мархинского алмазоносного района. Серия экспериментов проведена по методике, подобной примененной ранее для Мало-Ботуобинского района [14]. При проведении данного комплекса опытов моделировалось разломообразование в чехле платформы при активизации разломов фундамента. Для этого штампы экспериментальной установки «Разлом» лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН были доработаны следующим образом. «Фундамент» состоял из серии линейно вытянутых блоков, имитирующих разломно-блоковую структуру Вилуйско-Мархинской зоны северо-

⁴Матросов В.А. Особенности тектонического строения Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей по геофизическим данным, дис. ... канд. геолог.-минералог. наук. Иркутск, 2006.

147 с. / Matrosov V.A. Features of the Mirny and Nakyn kimberlite field tectonic structure by geophysical data: Candidate's Dissertation in Geological and Mineralogical sciences. Irkutsk, 2006, 147 p.

восточного простираия. Каждый из блоков был соединен с остальными и перемещался относительно соседних с постоянной скоростью. Экспериментальная установка с модернизированными штампами позволяла воспроизводить в моделях как правосторонние, так и левосторонние сдвиговые смещения блоков. От опыта к опыту изменялись: толщина слоя глинистой пасты, скорость смещения штампов экспериментальной установки, направление подвижки и амплитуда смещения блоков, вязкость модельного материала, ориентировка основных разломов по отношению к внешнему воздействию. Все эксперименты проведены с изменением направления подвижки в ходе опыта: смещение крыльев разрывов первой стадии менялось на противоположное на второй стадии опыта, то есть в ходе опыта изменялось направление подвижки, что позволило изучить разрывы «чехла» как при однонаправленном смещении крыльев разломов «фундамента», так и при реверсных движениях по этим дизъюнктивам.

Полученные результаты и их обсуждение

Для выяснения специфики разрывообразования при различных параметрах модели выполнено 23 эксперимента. Проведенные опыты в первую очередь отличались последовательностью перемещения штампов экспериментальной установки, что повлияло на специфику разрывообразования в моделях. Основные различия заключались в кинематическом типе разрывов на первой и второй стадиях эксперимента. Так, в первом варианте вначале разрывы имели правостороннюю сдвиговую компоненту смещения крыльев, а по достижению определенной амплитуды запускался обратный ход и опыт продолжался при левостороннем смещении блоков относительно друг друга. Второй вариант предусматривал обратную последовательность развития разломных зон.

Общие закономерности разрывообразования. Парагенез зон скалывания состоит из следующих разрывных структур [15]: сколы Риделя R и R' , разрывы растяжения T , сегменты магистрального сместителя L , а также сдвиги P . Наши эксперименты подтвердили вывод о том, что основными структурами, формирующимися на первой стадии в зоне сдвига, являются R - и R' -сколы (рис. 3). При этом R' -сколы лучше проявлены при повышенной скорости перемещения штампов экспериментальной установки, однако, как отмечали многие исследователи, из-за своей ориентировки, субперпендикулярной направлению сдвига основной зоны, они быстро прекращают свое развитие. Первая стадия, как правило, проводилась до образования сколов R -типа протяженностью, в 2–2,5 раза превышающей толщину модели. Это было обусловлено тем, что при формировании на первой стадии магистральных сместителей разломов деформации на второй стадии эксперимента сосредоточены также в пределах сформировавшихся швов. Если на первой стадии разрывообразование развивается только до образования широкой зоны развития разрывов второго порядка, то и на второй стадии новообразованные разрывы наблюдаются не только вблизи магистрального сместителя, но и в пределах широкой зоны влияния дизъюнктива.

На второй стадии в зависимости от скорости деформирования модели вначале формируются либо разрывы растяжения T (см. рис. 3, B), либо R -сколы соответствующего направления (см. рис. 3, Γ). Иногда «зародившиеся» R -сколы в процессе дальнейшей деформации перерождаются в структуры растяжения. Такая особенность, как и возникновение на второй стадии структур растяжения ранее сколов R , характерна для экспериментов с медленной скоростью перемещения штампов экспериментальной установки.

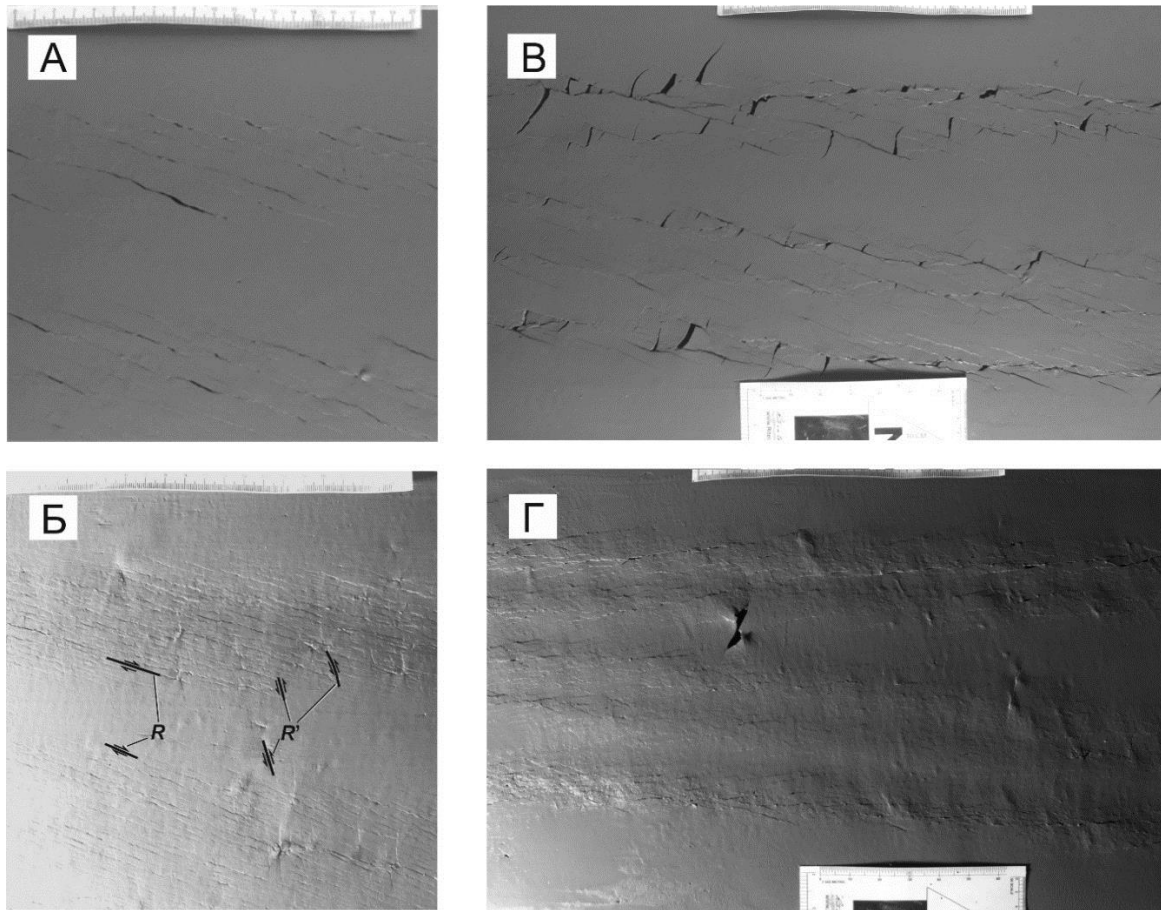


Рис. 3. Разрывная структура в моделях (фото экспериментов):

A, B – первая стадия эксперимента (правосторонние сдвиговые перемещения блоков фундамента): A – разрывы в модели, деформированной со скоростью 0,5 мм/мин, B – сколы типов R и R' в модели, деформированной со скоростью 5 мм/мин; B, Г – вторая стадия эксперимента (левосторонние сдвиговые перемещения блоков фундамента): B – отрывы, формирующиеся при скорости 0,5 мм/мин, Г – разрывы в модели, деформированной со скоростью 5 мм/мин

Fig. 3. Fault structure in models (images of experiments):

A, B – first stage of the experiment (right-lateral strike-slip movements of basement blocks): A – faults in the model deformed at a speed of 0,5 mm/min, B – fractures of R and R' type in the model deformed at a speed of 5 mm/min; B, Г – second stage of the experiment (left-lateral strike-slip movements of basement blocks): B – breakages formed at a speed of 0,5 mm/min, Г – faults in the model deformed at a speed of 5 mm/min

Изложенная выше качественная картина формирования разрывов в моделях практически не зависит от последовательности перемещения штампов экспериментальной установки. Однако из-за расположения разрывов, имитирующих фундамент платформы, под углами друг к другу в моделях образуются разрывы, ориентировка которых отличается на несколько градусов.

Влияние скорости перемещения штампов экспериментальной уста-

новки. Специфика разрывообразования сильно зависит от скорости деформирования модели. Опыты были проведены при двух отличающихся на порядок скоростях перемещения штампов экспериментальной установки, что позволило выявить основные отличия в структурообразовании (см. рис. 3).

Так, уже на первой стадии наблюдаются отличия внутренней структуры формирующихся разломных зон при разных скоростях деформирования. При

скорости смещения штампов 1 мм/мин шаг между образующимися разрывами и ширина формирующихся зон меньше ($\approx 2-5$ мм), а при скорости, равной 0,1 мм/мин, – значительно больше (10–17 мм). Другое существенное отличие структурообразования при различных скоростях наблюдается на второй стадии экспериментов и заключается в отсутствии структур растяжения при относительно быстрой скорости перемещения штампов экспериментальной установки. Сравнение полученных результатов с натурными наблюдениями, которое возможно с применением теории подобия, показывает, что образования разломов в чехле Накынского поля, вероятно, происходило при скорости, сопоставимой с медленным перемещением штампов экспериментальной установки.

Влияние мощности деформируемого слоя. Существенное влияние на специфику формирования структуры оказывает толщина модельного аналога чехла платформы. Из работы по изучению областей динамического влияния разломов, проведенной на основе моделирования с использованием эквивалентных материалов [6], известно, что ширина разломных зон наиболее тесно связана с толщиной деформированного слоя. При увеличении толщины модели ширина формирующейся зоны также становится больше.

Нами проведены эксперименты с различной мощностью моделей – от 26 до 90 мм. На рис. 4 видны отличия внутренней структуры разломных зон фундамента в экспериментах с разной мощностью «чехла». При небольшой толщине модели как в рамках первой, так и в пределах второй стадии опыта формируются не взаимодействующие между собой зоны. Обособленные зоны, как правило, имеют ширину, сопоставимую с толщиной слоя глинистой пасты. При значительной толщине модели ширина образующихся разломных зон увеличивается и,

когда расстояние между зонами меньше или равно мощности модельного материала, происходит взаимодействие разломных зон. Причем если разломы «фундамента» параллельны, то и разрывы чехла параллельны друг другу. А при наличии угла между простиранием дизъюнктивов «фундамента» и в «чехле» в пределах единой зоны иногда наблюдаются разрывы двух весьма близких, но не совсем параллельных направлений. Иногда в «чехле» образуется единая (на ранней дизъюнктивной стадии развития разлома) зона над двумя сближенными разломами «фундамента». Наиболее отчетливо эта особенность проявилась при максимальной толщине модели (см. рис. 4), когда в модельном материале, практически по всей ширине, наблюдается развитие единой зоны. Внутреннюю структуру этой зоны на первом этапе образуют R- и R'-сколы, а на втором добавляются подобные разрывы, но с противоположным перемещением крыльев.

Прораствание разломных зон фундамента в те части модели, которые имитируют чехол платформы с взаимодействием дизъюнктивов в пределах блоков, имеет важное практическое значение. Проведенные опыты показали возможность формирования достаточно крупных разрывов в чехле платформы, не совпадающих с простиранием разломов фундамента. Таким образом, эксперименты указывают на возможность формирования разрывов с ориентировкой Ботуобинского и Дьяхтарского дизъюнктивов, простирание которых на $13-20^\circ$ больше, чем у основных (например, Южный) разломов Вилуйско-Мархинской зоны.

Итогом вариации толщины слоя эквивалентного материала стало изготовление штампов экспериментальной установки, наиболее приближенных по геометрии к современной форме рельефа фундамента платформы, характерной для района исследования. Так в окрестностях Накынского кимберлитового поля

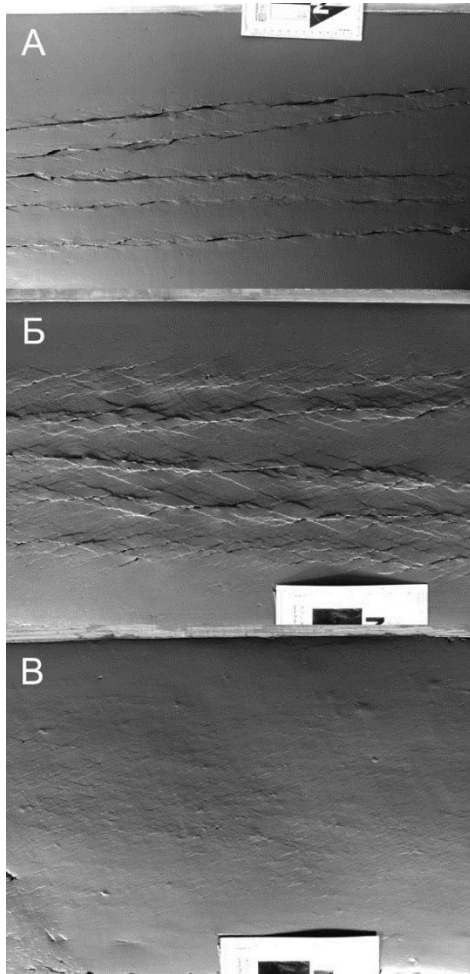


Рис. 4. Разрывная структура в моделях с различной толщиной слоя глинистой пасты (фото экспериментов):

А – сеть разрывов на заключительной стадии эксперимента при толщине модели 26 мм; Б – то же при 40 мм; В – то же при 90 мм. Остальные параметры моделей совпадают

Fig. 4. Fault structure in the models with different thickness of a clay paste layer (images of experiments):

A – network of faults at the final stage of the experiment when the model thickness is 26 mm; Б – the same at the thickness of 40 mm; В – the same at the thickness of 90 mm. The other parameters of the models coincide

наблюдается изменение мощности осадочного чехла с 3,5 км на северо-западе

до 4,5 км на юго-востоке⁵, в связи с чем толщина штампов была последовательно от юго-восточного блока к северо-западному блоку суммарно увеличена на 10 мм (каждый последующий блок был толще на 2 мм). Кроме того, несколько опытов были проведены с незначительно (на 5 мм) увеличенной толщиной. Дополнительная мощность отождествлялась с верхней частью разреза, которая подверглась денудации. Именно на этой модели были исследованы этапы формирования разрывной структуры Накынского кимберлитового поля.

Этапы формирования разрывов изучались на модели, максимально приближенной к природной обстановке. Так, толщина модели от блока к блоку увеличивалась от 40 до 50 мм, суммарная скорость перемещения штампов соответствовала 0,5 мм/мин. Каждый штамп относительно соседнего перемещался со скоростью 0,1 мм/мин. На первой стадии штампы перемещались по типу правостороннего сдвига, а на второй – по типу левостороннего.

Разрывная структура моделируемого района формируется в три основных этапа (рис. 5). На первом этапе образуется внутренняя структура зоны правого сдвига, практически полностью состоящая из *R*-сколов, так как *R'*-сколы встречаются крайне редко.

Следует отметить, что формирующиеся разрывы перекрывают значительную часть поверхности модели. Так, в юго-западной части моделируемой площади разрывная структура на этом этапе выражена единой зоной, хотя и с непостоянным расстоянием между отдельными разрывами (см. рис. 5-1). В северо-восточной части площади эта зона разделяется слабонарушенным блоком, что

⁵Матросов В.А. Особенности тектонического строения Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей по геофизическим данным, дис. ... канд. геолог.-минералог. наук. Иркутск, 2006.

147 с. / Matrosov V.A. Features of the Mirny and Nakyn kimberlite field tectonic structure by geophysical data: Candidate's Dissertation in Geological and Mineralogical sciences. Irkutsk, 2006, 147 p.

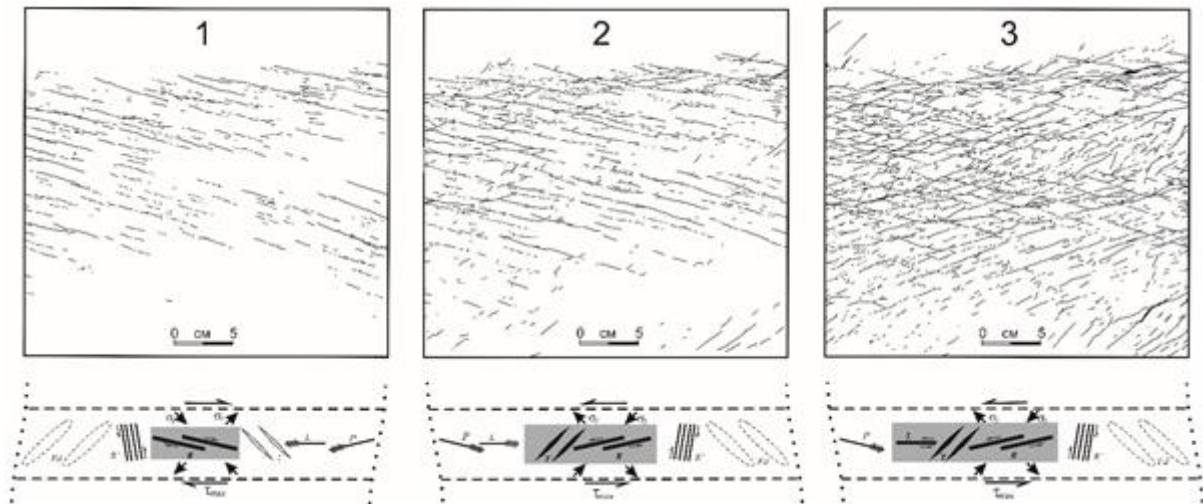


Рис. 5. Схемы разрывов в модели Накынского поля по данным эксперимента с толщиной модели, изменяющейся поперек Вилуйско-Мархинской разломной зоны:
1–3 – этапы формирования разрывов. Ниже приведены схемы напряжений и структур в зонах скалывания [15], где цветом выделены разрывы, формирующиеся на каждом из этапов
Fig. 5. Schemes of faults in the Nakyn field model according to the experimental data with the model thickness changing across the Viluy-Markha fault zone:
1–3 – stages of fault formation. Below there are the schemes of stresses and structures in the fracturing zones [15] where the color indicates the faults formed at each stage

связано с увеличением ширины блока фундамента, ограниченного Бадаранским и Южным разломами. Кроме того, на этом же рисунке отмечается слабая выраженность разломных зон на участке увеличенной толщины модели.

На втором этапе при левосдвиговом смещении крыльев разломов на поверхности модели образуются два типа разрывов: раздвиги и левосторонние сдвиги. Сдвиги на данном этапе наблюдаются только над разломными зонами северо-западной части площади. Структуры растяжения распространены по всей площади, особенно в юго-восточной части и в пределах блока на северо-востоке моделируемого района (см. рис. 5-2). Как показывают опыты, именно трещины отрыва предшествуют развивающимся на третьей стадии сколам, являясь их сегментами. Это явление рассмотрено ранее в работе [16], где изначальное образование трещин отрыва связывается с эффектом дилатансии (увеличения объема) деформируемого тела, реализуемым вначале путем увеличения

размера тела вдоль оси максимального растяжения при сохранении первоначального размера вдоль оси сжатия. Деформацию при этом можно считать квазиоднородной, так как непротяженные трещины отрыва, как правило, наблюдаются по всей поверхности модельного материала.

Третий этап заключается в выстраивании кулисообразно расположенных структур растяжения в линейные области с последующим их перерождением в зоны скалывания (см. рис. 5-3). Кроме того, на последнем этапе формируются протяженные зоны дробления, соответствующие магистральным швам в чехле над разломами фундамента, в пределах которых сосредотачивается основная деформация. Наступление каждого последующего этапа происходит последовательно от области модели с минимальной толщиной к области с максимальной толщиной.

Влияние вектора перемещения крыльев Вилуй-Мархинской разломной зоны на специфику разрывообразования

в чехле платформы. Небольшие отклонения отмечаются в моделях при изменении простирания штампов экспериментальной установки по отношению к вектору их перемещения. В моделях было воспроизведено три варианта ориентировки основных разломов по отношению к вектору основного перемещения по модельному аналогу Вилъюско-Мархинской разломной зоны. В первом варианте век-

тору перемещения штампа был параллелен Южный дизъюнктив, во втором – Бадаранский, а в третьем варианте вектор смещения штампов соответствовал биссектрисе угла, образованного простиранием этих разломов (рис. 6).

Исследования показали, что образующиеся при разных вариантах разрывы отличаются по ориентировке на 15–20°. Это связано с непараллельностью

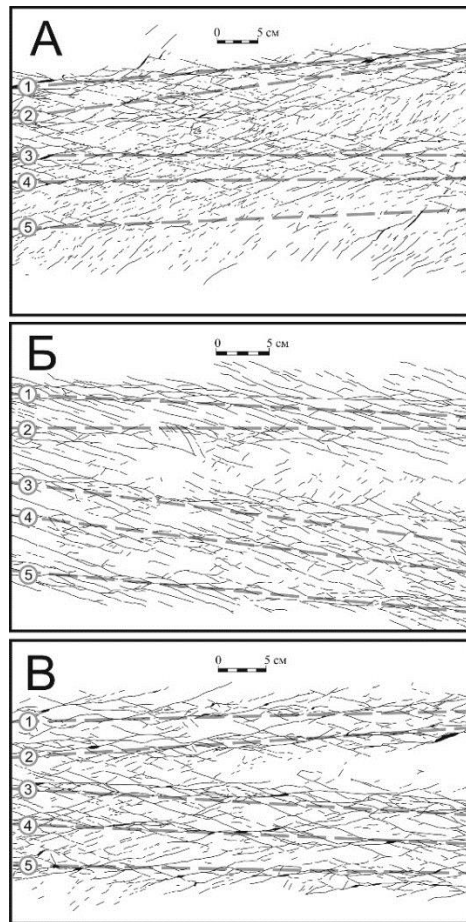


Рис. 6. Сеть разрывов на заключительных этапах экспериментов с различной ориентировкой вектора смещения разломов фундамента:

А – вектор основного смещения параллелен простиранию Южного разлома; Б – вектор смещения параллелен простиранию Бадаранского разлома; В – вектор смещения соответствует биссектрисе угла между простираниями Южного и Бадаранского разломов.

1–5 – модельные аналоги разломов фундамента: 1 – Лиендокитского, 2 – Бадаранского, 3 – Южного, 4 – Дьюостахского, 5 – Усть-Накынского

Fig. 6. Network of faults at the final stages of the experiments with the different orientation of the foundation faults displacement vector:

А – vector of the primary displacement is parallel to the Southern fault strike; Б – displacement vector is parallel to the Badaran fault strike; В – displacement vector corresponds to the bisector of the angle between the Southern and Badaran faults strikes.

1–5 – model analogs of the foundation faults: 1 – Liendokitsky, 2 – Badaran, 3 – Southern, 4 – Djuostakhsy, 5 – Ust-Nakyn

большинства «разломов фундамента» вектору перемещения подвижного штампа экспериментальной установки, из-за чего «разрывы чехла» формируются в условиях транспрессии или трансенсии. Наиболее близкие простираения модельных аналогов Ботуобинского, Дьяхтарского и Диагонального разломов формируются при первом варианте ориентировки штампов (см. рис. 6, А). Однако для более точного определения вероятного вектора смещения по разломам Вилуйско-Мархинской зоны необходима дополнительная серия экспериментов.

Заключение

Проведенное моделирование позволило изучить специфику формирования разрывов в чехле платформы при разнонаправленных сдвиговых перемещениях блоков фундамента. Разрывообразование в чехле Сибирской платформы в районе Накынского поля, по-видимому, происходило при низких скоростях смещения блоков фундамента, так как в подобных условиях расстояние между разрывами в моделях, согласно теории подобия, сопоставимо с природной обстановкой. Образующиеся в чехле разломные зоны имеют ширину, близкую к мощности осадочного чехла. В связи с этим мы приходим к заключению, что мощность осадочного чехла при формировании разрывов Накынского кимберлитового поля была близка к современной.

Применительно к структуре Накынского поля эксперименты показали возможность формирования Северного, Ботуобинского, Дьяхтарского и Диагонального разломов в чехле платформы при перемещении блоков фундамента по разломам северо-восточного простираения. Вероятная последовательность перемещения блоков по плоскостям разломов фундамента – правосторонний сдвиг на первой стадии и левосторонний – на второй. Кроме того, важное значение имеет ориентировка штампов экспериментальной установки, имитирующих

разломно-блоковую структуру фундамента, по отношению к внешнему воздействию. Так, модельные аналоги перечисленных выше разломов образуются при условии параллельности векторов смещения блоков простираению Южного разлома.

В экспериментах мы рассмотрели только разрывообразование в модельном аналоге чехла платформы при разнонаправленных сдвиговых перемещениях жестких блоков фундамента, имитирующих Вилуйско-Мархинскую разломную зону. Дополнительной доработки штампов экспериментальной установки для воспроизведения взаимодействия Вилуйско-Мархинской зоны со Средне-Мархинской зоной поперечных разрывов не производилось. Однако выше отмечалось, что на первой стадии всех наших опытов формируются ортогональные направлению смещения штампов сдвиги R' . В дальнейшем их активность резко снижается, и они смещаются R -сколами. Подобная картина характерна и для Накынского кимберлитового поля, где разрывы северо-западного простираения слабо выражены, часто имеют извилистую форму и смещаются разломами северо-восточного простираения. Таким образом, проведенные нами эксперименты позволяют предположить, что образование и (или) активизация Средне-Мархинской зоны тоже могут быть обусловлены перемещением блоков фундамента в пределах Вилуйско-Мархинской разломной зоны.

По результатам моделирования можно сделать следующие прогнозы. Вероятность обнаружения алмазоносных трубок к юго-востоку от известных месторождений Накынского поля мала, так как в этой части площади из-за увеличенной мощности осадочного чехла разломная сеть у поверхности находится на ранней стадии формирования и, следовательно, менее проницаема, чем в центральной и северо-западной части района исследо-

вания. Кимберлитовые трубки здесь либо отсутствуют, либо залегают на некоторой – возможно, значительной – глубине. Перспективным является сегмент Вилюйско-Мархинской разломной зоны, расположенный между Бадаранским и Южным разломами. Так как модельные аналоги Лиендокитского и Бадаранского разломов на поздних этапах предположительно развиваются в условиях тран-

стенсии, то и к северо-западу от Бадаранского разлома имеется вероятность обнаружения алмазоносных трубок, однако из-за относительно небольшой толщины осадочного чехла они могут быть денудированы. Наиболее перспективной, по нашему мнению, является область к западу от кимберлитовых тел Нюрбинское, Ботуобинское, Мархинское и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке АК «АЛРОСА» (ПАО).

Библиографический список

1. Крейтер В.М. Структуры рудных полей и месторождений. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 272 с.
2. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.
3. Кондратьев А.А., Горев Н.И. Тектоническое строение и история развития Средне-Мархинского алмазоносного района Западной Якутии // Геология алмаза – настоящее и будущее (геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России). Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2005. С. 95–104.
4. Сараев А.К., Пертель М.И., Никифоров А.Б., Гарат М.Н., Манakov А.В., Жандалинов В.М., Поспеева Е.В. Особенности проявления кимберлитовмещающего разлома в Накынском поле по данным АМТЗ // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Изд-во Воронежского

References

1. Kreiter V.M. *Struktury rudnykh polei i mestorozhdenii* [Structure of ore fields and deposits]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1956, 272 p.
2. Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N., Kriuchkov A.I. *Korennye mestorozhdeniia almazov mira* [Primary diamonds deposits in the world]. Moscow, Nedra Publ., 1998, 555 p.
3. Kondrat'ev A.A., Gorev N.I. *Tektonicheskoe stroenie i istoriia razvitiia Sredne-Markhinskogo amazonosnogo raiona Zapadnoi Iakutii* [Tectonic structure and development history the Mid-Markha diamondiferous region of Western Yakutia]. *Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta "Geologiya almaza – nastoiashchee i budushchee (geologi k 50-letnemu iubilieu g. Mirnyi ialmazodobyvaiushchei promyshlennosti Rossii)"* [Proceedings of the Voronezh State University "Diamond geology– the present and the future (geologists for the 50th anniversary of the Mirny town and Russian diamond industry)"], 2005, pp. 95–104. (In Russian).
4. Saraev A.K., Pertel' M.I., Nikiforov A.B. Garat M.N., Manakov A.V., Zhandalinov V.M., Pospееva E.V. *Osobennosti proiavleniia kimberlitovmeshchaiushchego razloma v Nakynskom pole po dannym AMTZ* [Manifestation features of kimberlite hosting fault in the Nakyn field according to the AMT sounding data] *Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*

государственного университета, 2003. С. 539–543.

5. Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Толстов А.В., Яныгин Ю.Т. Картирование скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур в Накынском поле // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: материалы конф., посвящ.й 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. С. 325–332.

6. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.

7. Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation // *Geology*. 1994. Vol. 22. P. 567–570.

8. Шерман С.И., Черемных А.В. Оценка движений блоков фундамента платформ по амплитудам надвиговых перемещений осадочных толщ (новые результаты экспериментальных исследований) // Доклады Академии наук. 1998. Т. 358. № 3. С. 381–383.

9. McClay K., Bonora M. Analog models of restraining stepovers in strike-slip

“Problemy prognozirovaniia, poiskov i izucheniia mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh na poroge XXI veka” [Proceedings of the Voronezh State University “Problems of forecasting, prospecting and study of mineral deposits on the threshold of the XXI century], 2003, pp. 539–543. (In Russian).

5. Ignatov P.A., Bushkov K.lu., Tolstov A.V., lanygin lu.T. *Kartirovanie skrytykh sdvigovykh kimberlitokontroli-ruiushchikh struktur v Nakynskom pole* [Mapping of hidden shear kimberlite controlling structures in the Nakyn field]. *Materialy konferentsii, posviashchennoi 40-letiiu laNIGP TsNIGRI AK “ALROSA”*. “*Problemy prognozirovaniia i poiskov mestorozhdenii almazov na zakrytykh territoriiakh*” [Proceedings of the conference devoted to the 40th anniversary of Yakutsk Research geological exploration enterprise ALROSA JSC “Problems of diamond deposits forecasting and prospecting in closed areas”]. Irkutsk, Yakutskii nauchnyi tsentr Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi Akademii Nauk Publ., 2008, pp. 325–332. (In Russian).

6. Sherman S.I., Borniakov S.A., Buddo V.lu. *Oblasti dinamicheskogo vliianiia razlomov* [Areas of fault dynamic influence]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 112 p.

7. Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation. *Geology*, 1994, vol. 22, pp. 567–570.

8. Sherman S.I., Cheremnykh A.V. *Otsenka dvizhenii blokov fundamenta platform po amplitudam nadvigovykh peremeshchenii osadochnykh tolshch (novye rezul'taty eksperimental'nykh issledovani)* [Assessment of platform basement block movements along the sedimentary sequence thrust amplitudes (new results of experimental researches)]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 1998, vol. 358, no. 3, pp. 381–383. (In Russian).

9. McClay K., Bonora M. Analog models of restraining step-overs in strike-slip

fault systems // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 2001. Vol. 85. № 2. P. 233–260.

10. Короновский Н. В., Гогоненков Г. Н., Гончаров М. А., Тимурзиев А.И., Фролова Н.С. Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур пропеллерного типа // Геотектоника. 2009. № 5. С. 50–64.

11. Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 8–18.

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

13. Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск, Изд-во ВИНИТИ, 1986. 131 с.

14. Гладков А.С., Борняков С.А., Мананов А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроизводных работах. М.: Научный мир, 2008. 175 с.

15. Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. М., Недра, 1977, 144 с.

16. Гончаров М.А., Талицкий В.Г. Зарождаются ли «трещины скальвания» путем скальвания? // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 1998. № 3. С. 18–22.

fault systems // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 2001, vol. 85, no. 2, pp. 233–260.

10. Koronovskii N. V., Gogonenkov G. N., Goncharov M. A., Timurziev A.I., Frolova N.S. *Rol' sdviga vdol' gorizonta'lnoi ploskosti pri formirovanii struktur propeller'nogo tipa* [The role of shear along the horizontal plane in propeller-type structure formation]. *Geotektonika* [Geotectonics], 2009, no 5, pp. 50–64. (In Russian).

11. Sherman S.I. *Fizicheskii eksperiment v tektonike i teoriiia podobiia* [Physical experiment in tectonics and the similarity theory]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1984, no. 3, pp. 8–18. (In Russian).

12. Gzovskii M.V. *Osnovy tektonofiziki* [Basics of tectonophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 536 p.

13. Seminskii K.Zh. *Strukturno-mekhanicheskie svoistva glinistykh past kak model'nogo materiala v tektonicheskikh eksperimentakh* [Structural and mechanical properties of clay pastes as a modeling material in tectonic experiments]. Irkutsk, Vserossiiskii institut nauchnoi i tekhnicheskoi informatsii Publ., 1986. 131 p.

14. Gladkov A.S., Borniakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. *Tektonofizicheskie issledovaniia pri almazoposkovykh rabotakh. Metodicheskoe posobie* [Tectonophysical studies at diamond exploration. A learning aids]. Moscow, Nauchnyi mir Publ, 2008. 175 p.

15. Stoianov S.S. *Mekhanizm formirovaniia razryvnykh zon* [The mechanism of fault zone formation]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 144 p.

16. Goncharov M.A., Talitskii V.G. *Zarozhdaiutsia li "treshchiny skalyvaniia" putem skalyvaniia?* [Are shear cracks originated from shear or not?]. *Vestnik Moskovskogo universiteta* [Bulletin of Moscow University], 1998, no. 3, pp. 18–22. (In Russian).

Статья поступила 18.11.2016 г.
The article was received 18.11.2016.