Оригинальная статья / Original article

УДК 551.24

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-9-21>

СТРУКТУРООБРАЗУЮЩАЯ РОЛЬ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ ПРИ СДВИГЕ, ТРАНСПРЕССИИ И ТРАНСТЕНСИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ЛОКАЛИЗАЦИИ АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ (РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

© А.В. Черемных^а

^аИнститут земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель. Изучить динамику разрывообразования и типы дизъюнктивных структурных ловушек для рудных растворов при знакопеременных движениях в разломных зонах при сдвиге, транспрессии и транстенсии. **Методы.** Моделирование выполнено в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН. Эксперименты проведены на установке «Разлом», которая позволила задавать не только направление, но и скорость перемещения штампов, на двух скоростях: 10^{-4} и 10^{-5} м/с. Исследования выполнены на базе экспериментов физического моделирования с использованием эквивалентного материала – водной суспензии монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с. Каждый опыт проводился в два этапа. На первом этапе эксперимента воспроизводились обстановки, соответствующие сдвигу, сдвигу с растяжением (транстенсия) или сдвигу со сжатием (транспрессия). На втором этапе опыта моделировалось структурообразование при противоположном перемещении штампов экспериментальной установки, то есть при сдвиге с обратным знаком, транспрессии или транстенсии. **Результаты.** В серии из 8 опытов изучены парагенезы разрывов с акцентом на структуры растяжения, которые могут быть благоприятными для локализации кимберлитовых тел. Закономерности формирования дизъюнктивов рассмотрены с позиции образования в моделях известных разрывов парагенеза сдвиговой зоны. Структуры растяжения, благоприятные для рудоотложения, более характерны для опытов, проведенных на медленной скорости. Другим фактором, влияющим на формирование внутренней структуры разломных зон, является вектор относительного перемещения штампов, от которого зависят динамические обстановки первого и второго этапов. Рассмотрены комбинации обстановок правого и левого сдвигов, транстенсии – транспрессии, и транспрессии – транстенсии. **Выводы.** Установлено, что скорость деформирования существенно влияет на специфику структурообразования. При знакопеременных движениях в зонах разломов от нее зависят не только ширина зоны и расстояние между системами разрывов, но и специфика набора элементов структурного парагенеза. Наиболее амплитудные структуры растяжения разных типов формируются вблизи основных швов дизъюнктивов, для области которых характерна наибольшая величина дилатансии. Особенно отчетливо дилатансия проявлена в разломных зонах, которые на первом этапе формируются в обстановке транспрессии, а на втором – транстенсии. В таких зонах наблюдается наибольшие размеры дизъюнктивных структурных ловушек, связанных с разрывами разных типов – ϵ , R и Y .

Ключевые слова: моделирование, эквивалентный материал, разломообразование, знакопеременные движения, транспрессия, транстенсия, зоны сдвига.

Информация о статье. Дата поступления 7 июня 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Черемных А.В. Структурообразующая роль знакопеременных движений в разломных зонах при сдвиге, транспрессии и транстенсии применительно к условиям локализации алмазонасных кимберлитов (результаты физического моделирования) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 9–21. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-9-21

^аЧеремных Александр Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики, e-mail: cherem@crust.irk.ru
Alexander V. Cheremnykh, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Tectonophysics Laboratory, e-mail: cherem@crust.irk.ru

STRUCTURE-FORMING ROLE OF ALTERNATING MOVEMENTS IN THE ZONES OF SHEAR, TRANSPRESSION AND TRANSTENSION AS APPLIED TO LOCALIZATION CONDITIONS OF DIAMONDFEROUS KIMBERLITES (PHYSICAL MODELING RESULTS)

© A.V. Cheremnykh^a

^aInstitute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The work is aimed at studying the faulting dynamics and the types of disjunctive structural traps for ore solutions under alternating movements in the zones of shear, transpression and transtension. **Methods.** Physical modeling was performed in the Laboratory of Tectonophysics, Institute of the Earth's Crust SB RAS on the Fault Installation, which allowed to set up both the direction and two speeds of stamp (plate) movement (10^{-4} and 10^{-5} m/s). The studies were carried out on the basis of the experiments of physical modeling with the use of an equivalent material in the form of an aqueous suspension of montmorillonite clay (viscosity of 10^6 – 10^7 PA·s). Each experiment included two stages. Stage I reproduced the conditions that correspond to shear, shear with tension (transtension) or shear with compression (transpression). Stage II included the simulation of structure forming under reverse movement of experimental installation stamps, i.e. under alternating shear of transtension or transpression. **Results.** The parageneses of fractures with the emphasis on extensional structures that can be favorable for kimberlite body location have been studied in the series of 8 experiments. The formation patterns of disjunctives are examined in terms of shear zone paragenesis formation in the models of known discontinuities. The extensional structures favorable for ore deposition are more characteristic of the experiments performed at slow speed. Another factor affecting the formation of the internal structure of fault zones is the vector of relative movement of stamps (plates), on which the dynamic conditions of the first and second stages depend. Consideration is also given to the combinations of right- and left-lateral shearing, transtension-transpression, and transpression-transtension. **Conclusion.** The physical modeling experiments have shown that the deformation rate has a significant influence on structure formation. In case of alternating movements in fault zones the deformation rate is the factor that affects the width of the fault zone and the distance between the fault systems as well as the specific set of elements in structural paragenesis. Extensional structure of the different types characterized by the highest tension amplitudes occur near the major joints of disjunction, where the dilatancy is the highest. The dilatancy is manifested most clearly in the fault zones which are formed in transpression conditions at the stage I and under transtension conditions at the stage II. The largest disjunctive structural traps associated with e-, R- and Y-fractures are observed in such fault zones.

Keywords: modeling, equivalent material, faulting, alternating movements, transpression, transtension, shear zones

Article info. Received 7 June 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Cheremnykh A.V. Structure-forming role of alternating movements in the zones of shear, transpression and transtension as applied to localization conditions of diamondiferous kimberlites (physical modeling results). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = 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, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 9–21. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-9-21 (In Russian).

Введение

Условия формирования дизъюнктивных нарушений определяют особенности их внутренней разрывной структуры – структурные парагенезы разломных зон, с которыми часто связаны рудные поля и месторождения [1–3 и др.]. Последние локализуются в пределах разнообразных структурных элементов зон,

а сами разломные зоны находятся на разных стадиях развития [3]. Особый интерес представляет специфика формирования разломных зон в чехле Сибирской платформы в результате знакопеременных горизонтальных смещений блоков фундамента. Весьма вероятно, что именно в результате таких движений сформировались разломы Вилуйско-

Мархинского дизъюнктивной зоны, контролирующие пространственное распространение алмазонасных кимберлитов [4–6].

Цель работы – на основе физического моделирования изучить динамику структурообразования в зонах разломов, формирующихся при знакопеременных движениях в условиях сдвига, транспрессии и транстенсии с акцентом на разрывные парагенезы, потенциально благоприятные для локализации кимберлитовых тел.

Методика проведения экспериментов и модельный материал

Формирование разрывов в чехле платформ при смещении блоков фундамента часто изучается с помощью экспериментов на эквивалентных материалах [4–13 и др.]. Моделирование проведено в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН на установке «Разлом», позволяющей изменять

направление и скорость перемещения штампов. Дополнительно было изготовлено приспособление «Фундамент» в виде двух штампов, закрепляющихся на основной установке «Разлом». Имитирующие блоки фундамента штампы представляли собой две рифленые пластины, которые могли перемещаться по типу как сдвига, так и сдвига со сжатием – транспрессии, а также сдвига с растяжением – транстенсии (рис. 1). В процессе моделирования производилась смена направления перемещения штампов на противоположное – изменение знака движения. Подобные эксперименты со знакопеременными смещениями штампов экспериментальной установки при формировании сдвиговых зон ранее уже проводились в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН [4–6, 11]. Выполненные нами эксперименты были дополнены условиями транспрессии и транстенсии на разных этапах эволюции разломных зон.

Рис. 1. Схемы перемещения штампов экспериментальной установки:

a – правый сдвиг (первый этап) – левый сдвиг (второй этап); b – транстенсия (первый этап) – транспрессия (второй этап); c – транспрессия (первый этап) – транстенсия (второй этап)
1 – неподвижная пластина; 2 – подвижная пластина; 3 – вектор перемещения штампа (пластины)

Fig. 1. Diagrams of stamp displacement in the experimental installation:

a – right-lateral shear (stage I) – left-lateral shear (stage II); b – transtension (stage I) – transpression (stage II); c – transpression (stage I) – transtension (stage II)
1 – fixed stamp (plate); 2 – movable stamp (plate); 3 – vector of stamp (plate) displacement

В качестве эквивалентного материала использовались водные суспензии монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с, удовлетворяющие теории подобия. Каждый эксперимент выполнялся согласно приведенной ниже последовательности операций. Модельный материал тщательно перемешивался и после контроля вязкости равномерным слоем размещался на пластинах приспособления «Фундамент». Поверхность модели выравнивалась, после чего производилось перемещение одного из штампов экспериментальной установки с одной из двух скоростей: 10^{-4} или 10^{-5} м/с. На первом этапе штамп смещался на 35–85 мм. На втором этапе направление перемещения штампа менялось на противоположное и эксперимент про-

должался до формирования магистрального шва. В ходе эксперимента модель фотографировалась через определенные промежутки времени, что позволило изучить основные особенности динамики разрывообразования в зоне формирующегося разлома.

Результаты моделирования

Закономерности формирования внутренней структуры разломных зон рассмотрим с позиции образования известных разрывов структурного парагенеза зоны простого сдвига, который состоит из следующих основных элементов [12, 14–16 и др.]: разрывы (сколы) Риделя R и R' , разрывы растяжения e , сегменты магистрального сместителя Y , а также сдвиги P (рис. 2).

Рис. 2. Структурный парагенез разрывов и складок в зоне левого сдвига [14]:

- 1 – сдвиг (Y) магистрального сместителя; 2 – сопряженные (R , R') и одиночные (P) системы сдвигов;
3 – сопряженные системы сбросов (n , n'); 4 – сопряженные системы взбросов или надвигов (t , t');
5 – разрывы растяжения (e); 6 – складки (f); 7 – эллипс, в который преобразуется окружность в ходе деформации; 8 – направление перемещения субстрата на периферии зоны сдвига

Fig. 2. Structural paragenesis of fractures and folds in the left-lateral shear zone [14]:

- 1 – shear (Y) of the main fault plane; 2 – conjugated (R , R') and single (P) systems of strike-slip faults;
3 – conjugated systems of normal faults (n , n'); 4 – conjugated systems of reverse or thrust faults (t , t');
5 – tension discontinuities (e); 6 – folds (f); 7 – ellipse resulting from circle transformation under deformation; 8 – direction of material movement at the shear zone periphery

Общие закономерности разрывообразования в моделях в зависимости от скорости деформирования. Наши эксперименты подтвердили вывод о том, что основными структурами, формирующимися на первом этапе в зоне сдвига, являются R - и R' -сколы. При этом R -сколы лучше проявлены при повышенной скорости перемещения штампов экспериментальной установки, однако, как отмечали многие исследователи, из-за ориентировки, субперпендикулярной направлению сдвига основной зоны, они быстро прекращают свое развитие. Первый этап, как правило, проводился до образования сколов R -типа протяженностью, в 2–2,5 раза превышающей толщину модели. Главное ограничительное условие для этого этапа – отсутствие в формирующейся зоне разлома магистрального шва, так как в случае его образования деформации второго этапа эксперимента локализуются только в его пределах. При отсутствии магистрального шва на втором этапе новообразование разрывов происходит в пределах всей ширины зоны влияния дизъюнктива.

На втором этапе в зависимости от скорости деформирования модели вначале формируются либо разрывы растяжения e -типа, либо R -сколы соответствующего направления. Возникновение на втором этапе структур растяжения ранее сколов R характерно для экспериментов с медленной скоростью перемещения штампов экспериментальной установки.

В целом скорость деформирования модели оказывает существенное влияние на специфику разрывообразования. Так, уже на первом этапе наблюдаются отличия внутренней структуры формирующихся разломных зон при разных скоростях деформирования моделей. При скорости смещения штампов 10^{-4} м/с шаг между образующимися разрывами в пределах моделируемого разло-

ма меньше (рис. 3), а при скорости 10^{-5} м/с – больше (рис. 4). Другое существенное отличие структурообразования при различных скоростях наблюдается на втором этапе опытов и заключается в отсутствии структур растяжения e -типа при относительно быстрой (10^{-4} м/с) скорости перемещения штампов экспериментальной установки.

Структуры, благоприятные для локализации кимберлитовых тел. Выше отмечено, что цель исследования заключалась в изучении динамики структурообразования в зонах разломов, формирующихся в условиях сдвига, транспрессии и транстенсии с акцентом на разрывные парагенезисы, потенциально благоприятные для локализации кимберлитовых тел. Далее рассмотрим использованные при моделировании три варианта комбинации динамических обстановок разрывообразования.

Первый вариант – комбинация простых сдвигов: правостороннего на первом этапе и левостороннего на втором (рис. 1, а). При медленной скорости смещения штампов экспериментальной установки структуры растяжения, наиболее благоприятные для локализации магматических пород, образуются в отдельных участках сдвиговой зоны. Чаще всего они приурочены к изгибам сколов второго этапа R_2 , сегментам магистрального шва Y (см. рис. 4, а), реже связаны с отрывами e -типа, сколами R'_2 , узлами сочленения R_2 и R'_2 и в последнем случае слабо выражены, то есть имеют минимальное раскрытие. При скорости 10^{-4} м/с структуры растяжения модельного материала формируются только в сегментах сколов R_2 и на отдельных участках магистрального сместителя (см. рис. 3, а).

Второй вариант формирования структуры разломной зоны связан с действием транстенсии на первом этапе и транспрессии на втором (рис. 1, б). В ходе эволюции разрывообразования

Рис. 3. Итоговая сеть разрывов в моделях разломных зон с различными последовательными комбинациями динамических обстановок разломообразования при знакопеременных перемещениях блоков «Фундамента» на скорости 10^{-4} м/с:

a, b, c соответствуют схемам на рис. 1

На розах-диаграммах максимумы соответствуют R_2 -сколам парагенеза сдвиговой зоны
Fig. 3. Resulting network of fractures in the models of fault zones featuring different successive combinations of faulting dynamic conditions under alternating displacements of the "Foundation" blocks at a speed of 10^{-4} m/s:

a, b, c – correspond to the diagrams in Fig. 1

The rose diagrams show the maximums corresponding to R_2 fractures in the shear zone of paragenesis

в зоне разлома наблюдаются следующие варианты формирования структур растяжения. При медленной скорости правостороннего смещения штампа (10^{-5} м/с) на первом этапе местами наблюдаются некоторое раскрытие разрывов R_1 . Однако из-за незначительной величины деформации этого этапа благоприятных для внедрения магм структур в приповерхностной части чехла не наблюдается. В рамках второго этапа в условиях транспрессии берега сколов R_1 смыкаются, а структуры локального растяжения формируются вблизи магистрального шва и у некоторых изгибов поверхностей сколов R_2 . Отличительной особенностью этого варианта смены динамиче-

ских обстановок является отсутствие других структур растяжения (см. рис. 4, b). При скорости 10^{-4} м/с структуры растяжения весьма редкие и приурочены к центральной части разломной зоны (см. рис. 3, b). На розах-диаграммах, построенных как для итоговой сети разрывов в моделях, деформированных на скорости 10^{-4} м/с, так и для сети дизъюнктивных дислокаций, сформировавшихся в моделях, подвижный штамп которых перемещался со скоростью 10^{-5} м/с, выделяется единственный максимум, образованный сколами R_2 - и Y-типов (см. рис. 3, b; 4, b).

Третий вариант – транспрессия на первом этапе и транстенсия на втором –

Рис. 4. Итоговая сеть разрывов в моделях разломных зон с различными последовательными комбинациями динамических обстановок разломообразования при знакопеременных перемещениях блоков «Фундамента» на скорости 10^{-5} м/с:

a, b, c соответствуют схемам на рис. 1

На розах-диаграммах обозначены максимумы, соответствующие разрывам парагенеза сдвиговой зоны – e, R и Y

Fig. 4. Resulting network of fractures in the models of fault zones featuring different successive combinations of faulting dynamic conditions under alternating displacements of the "Foundation" blocks at a speed of 10^{-5} m/s:

a, b, c correspond to the diagrams in Fig. 1

The rose diagrams show the maximums corresponding to e, R and Y fractures in the shear zone of paragenesis

отличается широким развитием структур растяжения e-типа при реверсном смещении штампа и медленной скорости деформирования (см. рис. 4, c). Эти структуры широко развиты на периферии разломной зоны, за пределами области формирования сколов. Иногда разрывы e-типа образуются на достаточном удалении от зоны, в глубине слабонарушенных блоков. Однако далее по ходу второго этапа деформация сосредотачивается в более узкой области, в результате чего наибольшее раскрытие фиксируется у отрывов, примыкающих к зоне развития сколовых дислокаций (см. рис. 4, c). В дальнейшем формируются ловушки, связанные со сколь-

жением по магистральному шву. При относительно быстром перемещении штампов установки в моделях наблюдается «перерождение» в структуры растяжения некоторых сколов R_2 , особенно в центральной части разломной зоны (см. рис. 3, c).

Обсуждение

полученных результатов

Эксперименты показали, что потенциально благоприятные структуры для локализации кимберлитовых тел формируются главным образом в пределах определенных разрывных парагенезов разломных зон. Исключение составляют разрывы e-типа, образующиеся на втором этапе развития зон в усло-

виях знакопеременных смещений блоков фундамента, когда динамическая обстановка транспрессии меняется на транстензию. При этом структуры растяжения образуются на периферии зоны сформировавшихся ранее сколов, а иногда даже на значительном удалении от нее в сторону слабонарушенных блоков. Однако в ходе дальнейшей эволюции дизъюнктива основные деформации локализуются во все более узкой зоне. В результате наибольшее раскрытие разрывов е-типа фиксируется вблизи зоны формирования сколов и внутри последней. Кроме того, структуры растяжения в зонах наблюдаются вблизи магистральных сместителей Y и разрывов R_2 .

Важным результатом исследования, по нашему мнению, является образование структур растяжения е-типа на втором левосдвиговом этапе формирования разрывной структуры в чехле платформы над активными разломами ее фундамента. Эта особенность, установленная ранее при моделировании разрывов Накынского кимберлитового поля [6], вероятно, обусловлена протеканием деформации второго этапа экспериментов в структурированной среде, нарушенной разрывами первого этапа [11]. Ранее зарождение трещин отрыва с последующим их объединением в сколы рассмотрено в экспериментальной работе [17]. Образование трещин отрыва, предшествующее сколам, авторы связывают с дилатансией деформируемого слоя за счет сверхвысокого флюидного давления. Последняя реализуется в виде увеличения размера тела вдоль оси максимального растяжения при сохранении его первоначального размера вдоль оси сжатия [17].

Непременным фактором образования структур е-типа на втором этапе моделирования является медленная скорость деформирования модельного материала. Кроме того, в наших экспериментах образование отрывов часто

наблюдалось за пределами разломных зон, в блоках, однако в тех их частях, которые непосредственно примыкали к разломным зонам. Нами предлагается следующее объяснение этого явления.

Известно, что формирование зоны сдвига начинается с зарождения широкой области распространения R - и R' -сколов. Наибольшая ширина зоны проходит по дистальным окончаниям R' -сколов, ориентировка которых близка к ортогональной по отношению к простиранию самой сдвиговой зоны. Выше отмечено, что из-за ортогональности этих разрывов дальнейшие деформации сосредоточены в более узкой полосе развития R -сколов. Таким образом, на первом этапе эксперимента формируется зона с наиболее раздробленной центральной частью, а на периферии наблюдаются все менее отчетливые остаточные деформации модельного материала и постепенный переход к недеформированным блокам.

На втором этапе, после изменения направления смещения штампов на противоположное, перемещения крыльев сдвиговой зоны вначале реализуются за счет подвижек по существующим разрывам, главным образом по R -сколам наиболее раздробленной части зоны. С некоторого момента времени берега этих сколов в результате ориентировки последних оказываются сомкнутыми и трение на плоскостях разрывов препятствует дальнейшему перемещению. В активизацию вовлекаются R' -сколы на периферии сдвиговой зоны, а так как они субперпендикулярны направлению смещения крыльев, то и смещения по ним минимальные. Однако общее перемещение крыльев сдвиговой зоны создает напряжения на границах последней. В результате краевая часть блоков испытывает дилатансию, а концентраторами растягивающих напряжений являются дистальные окончания R' -сколов первого этапа. В процессе дальнейшего разви-

тия разломной зоны деформация сосредотачивается во все более узкой полосе ближе к магистральному сместителю. Соответственно, и более амплитудные структуры растяжения разных типов формируются вблизи основных швов дизъюнктивов, для которых характерна наибольшая величина дилатансии. Последняя весьма характерна для зон, ко-

торые на первом этапе формируются в обстановке транспрессии, а на втором – транстенсии.

Примером одной из рассмотренных динамических обстановок является Мирнинское кимберлитовое поле, где к субмеридиональным глубинным разломам тяготеют известные алмазоносные трубки (рис. 5). При этом кимберлитовые

Рис. 5. Структура Мирнинского кимберлитового поля [18]:

1 – контур геофизической аномалии центрального типа; 2 – граница Амакинского купольного поднятия; 3 – контуры куполов второго порядка; 4 – кимберлитовые трубки; 5 – часть структуры поля, перекрытая мезозойскими отложениями Ангара-Вилуйского прогиба; 6 – кальдеры проседания кимберлитового вулканизма; 7 – кальдеры базальтового вулканизма; 8 – глубинные разломы, контролирующие: а – кимберлитовый и базальтовый магматизм (1-1 – Кюэляхский, 2-2 – Западный, 3-3 – Параллельный, 4-4 – Центральный), б – только базальтовый магматизм (5-5 – Восточный, 6-6 – Аппаинский); 9 – кимберлитовмещающие разломы; 10 – Ангара-Вилуйский разлом (7-7), ограничивающий мезозойский прогиб

Fig. 5. Structure of the Mirny kimberlite field [18]:

1 – contour of the geophysical anomaly of the central type; 2 – boundary of the Amakin dome uplift; 3 – contours of the second-order domes; 4 – kimberlite pipes; 5 – part of the field structure overlapped by Mesozoic sediments of the Angara-Vilui depression; 6 – calderas of kimberlite volcanism; 7 – calderas of basaltic volcanism; 8 – deep faults that control: (a) - kimberlite and basaltic magmatism (1-1 – Kuelyakh, 2-2 – Western, 3-3 Parallel, 4-4 – Central), (b) – only basaltic magmatism (5-5 – Eastern, 6-6 – Appain); 9 – kimberlite-bearing faults; 10 – Angara-Vilui fault (7-7) that borders the Mesozoic depression

вмещающие разрывы имеют северо-западное простирание, подобное простиранию разрывов растяжения (е-тип), полученному в экспериментах при знакопеременных медленных смещениях крыльев сдвиговых зон (см. рис. 4, а).

Заключение

Установлено, что скорость деформирования существенно влияет на специфику структурообразования. При знакопеременных движениях в зонах разломов от нее зависят не только ширина зоны и расстояние между системами разрывов, но и специфика набора элементов структурного парагенеза. Так, структуры растяжения е-типа образуются только при медленной скорости перемещения штампов экспериментальной установки. Они формируются в разломных зонах при знакопеременных смещениях крыльев только на втором этапе деформирования моделей (после смены направления перемещения крыльев) в обстановках сдвига или транстенсии. В обстановке транспрессии второго этапа раздвиги этого типа не наблюдаются, а

при транстенсии растяжение осуществляется не только у раздвигов е-типа, но и у плоскостей разрывов R_2 .

Кроме того, наиболее амплитудные структуры растяжения разных типов формируются вблизи основных швов дизъюнктивов, для области которых установлена наибольшая величина дилатансии. Дилатансия, как правило, характерна для разломных зон, которые на первом этапе развиваются в обстановке транспрессии, а на втором – транстенсии. В таких зонах наблюдаются наибольшие размеры дизъюнктивных структурных ловушек, связанных с разрывами разных типов – е, R и Y.

Автор благодарен сотрудникам лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН А.С. Черемных и И.К. Декаброву за помощь при проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ПАО АК «АЛРОСА» и РФФИ (проект 16-05-00154).

Библиографический список

1. Крейтер В.М. Структуры рудных полей и месторождений. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 272 с.
2. Яковлев Г.Ф. Геологические структуры рудных полей и месторождений. М.: Изд-во МГУ, 1982. 270 с.
3. Семинский Ж.В., Семинский К.Ж. Тектонофизический анализ обстановок локализации рудных полей и месторождений в разломных зонах земной коры // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 4. С. 292–304.
4. Гладков А.С., Зинчук Н.Н., Борняков С.А., Шерман С.И., Манаков А.В., Матросов В.А., Гарат М.Н., Дзюба И.А. Новые данные о внутреннем строении и механизме образования зон кимберлитовмещающих разломов Мало-Ботуобинского района (Якутская алма-

зоносная провинция) // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 3. С. 366–369.

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

6. Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. Экспериментальное исследование формирования сети разрывов Накынского поля Якутской алмазодносной 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.

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 step overs in strike-slip fault systems // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 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. Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алаakit-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.

12. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tec-

tonics: A review and new experimental results // *Tectonophysics*. 2012. Vol. 574–575. P. 1–71.

13. Schellart W.P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments // *Journal of Geodynamics*. 2016. Vol. 100. P. 7–32.

14. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // *Journal of Structural Geology*. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.

15. Sylvester A.G. Strike-slip faults // *Geological Society of America Bulletin*. 1988. Vol. 100. P. 1666–1703.

16. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон: прикладной аспект. Новосибирск: Гео, 2005. 293 с.

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

18. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). М.: Геоинформмарк, 2000. 371 с.

References

1. Kreiter V.M. *Struktury rudnykh polei i mestorozhdenii* [Structure of ore fields and deposits]. Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ., 1956, 272 p. (In Russian).

2. Yakovlev G.F. *Geologicheskie struktury rudnykh polei i mestorozhdenii* [Geological structures of ore fields and deposits]. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publ., 1982, 270 p. (In Russian).

3. Seminskii Zh.V., Seminskii K.Zh. Tectonophysical analysis of environments for localization of ore fields and deposits in

fault zones of the earth's crust. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2004, vol. 46, no. 4, pp. 292–304. (In Russian).

4. Gladkov A.S., Zinchuk N.N., Bornyakov S.A., Sherman S.I., Manakov A.V., Matrosov V.A., Garat M.N., Dzyuba I.A. New Data on the Internal Structure and the Mechanism of Formation of Kimberlite-Bearing Fault Zones in the Malo-Botuobinskii Region (the Yakut Diamond-Bearing Province). *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 2005, vol. 402, no. 3, pp. 366–369. (In Russian).

5. Gladkov A.S., Borniakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. *Tektonofizicheskie issledovaniia pri almazoposkovykh rabotakh* [Tectonophysical studies at diamond exploration]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2008, 175 p. (In Russian).

6. Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. Experimental investigation of fault network formation in the Nakyn field of the Yakutsk diamondiferous province. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [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).

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. [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]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth 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. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2001, vol. 85, no. 2, pp. 233–260.

10. Koronovskii N.V., Gogonenkov G.N., Goncharov M.A., Timurziev A.I., Frolova N.S. Role of shear along the horizontal plane in helicoidal structure formation. *Geotektonika* [Geotectonics], 2009, no. 5, pp. 50–64. (In Russian).

11. Seminskii K.Zh., Seminskii Zh.V. *Spetskartirovanie razlomnykh zon zemnoi kory i ego vozmozhnosti v issledovanii*

strukturnogo kontrolya kimberlitov v Alakit-Markhinskom pole Yakutskoi almazonosnoi provintsii [Specialized mapping of crustal fault zones and its potential in studying kimberlite structural control in the Alakit-Markha field of the Yakut diamond province]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2016, 204 p. (In Russian).

12. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 2012, vol. 574–575, pp. 1–71.

13. Schellart W.P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*, 2016, no. 100, pp. 7–32.

14. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 1985, vol. 7, no. 3/4, pp. 437–457.

15. Sylvester A.G. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, vol. 100, pp. 1666–1703.

16. Seminskii K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon: prikladnoi aspekt* [Internal structure of continental fault zones: Applied aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2005, 293 p. (In Russian).

17. Goncharov M.A., Talitskii V.G. Are shear cracks originated from shear or not? *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya* [Moscow University Geology Bulletin], 1998, no. 3, pp. 18–22. (In Russian).

18. Vaganov V.I. *Almaznye mestorozhdeniya Rossii i mira (osnovy prognozirovaniya)* [Diamond deposits in Russia and abroad (Fundamentals of forecasting)]. Moscow: Geoinformmark Publ., 2000, 371 p. (In Russian).

Критерии авторства

Черемных А.В. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Cheremnykh A.V. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.