

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.24

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-129-143>

О формировании разломов Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции (результаты физического моделирования)

© А.В. Черемных, А.С. Гладков, А.С. Черемных

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данного исследования является уточнение специфики формирования кимберлитоконтролирующих разломов Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции на основе экспериментов физического моделирования разрывообразования в чехле платформ при знакопеременных движениях блоков фундамента. Физическое моделирование на эквивалентных материалах проведено в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН. Модельный материал – водная суспензия монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с. Для проведения опытов изготовлено дополнительное приспособление «Фундамент 3», состоящее из серии линейно вытянутых блоков, имитирующих разломно-блоковую структуру Вилюйско-Мархинской разломной зоны Сибирской платформы в пределах района исследования. В серии из 12 опытов рассмотрено влияние скорости и вектора перемещения штампов экспериментальной установки на специфику структурного парагенеза вторичных разрывов, формирующихся в модельном аналоге чехла платформы. Сопоставление итоговых сетей разрывов в экспериментах, отличающихся граничными условиями, со схемой разломно-блокового строения Мирнинского кимберлитового поля и планами кимберлитовых тел позволило уточнить специфику формирования кимберлитоконтролирующих разломов района исследований. Сеть разрывов в пределах областей динамического влияния разломов Вилюйско-Мархинской зоны сформировалась при относительно невысокой скорости смещения блоков фундамента платформы, так как именно при медленной скорости смещения штампов экспериментальной установки наблюдалась сеть разрывов, параметры которой сопоставимы с природным аналогом. Структуры растяжения, наиболее благоприятные для рудоотложения, наблюдались в моделях с медленной скоростью перемещения штампов экспериментальной установки. Кроме того, они формировались в разломных зонах при знакопеременных смещениях крыльев только на втором этапе деформирования моделей (после смены направления перемещения блоков фундамента) в обстановках сдвига или трансформации. В обстановке трансформации второго этапа раздвиги этого типа не наблюдаются, а при трансформации растяжение осуществляется не только у раздвигов е-типа, но и у плоскостей сколов второго этапа деформирования моделей. Наиболее амплитудные структуры растяжения всех типов тяготеют к центральным частям моделируемых разломных зон.

Ключевые слова: физическое моделирование, разломообразование, знакопеременные движения, Якутская алмазоносная провинция, сдвиги, фундамент, Сибирская платформа

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

Информация о статье: Дата поступления 30 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 3 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. О формировании разломов Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции (результаты физического моделирования). *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 129–143. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-129-143.

On the formation of Malo-Botyobinsky region faults, Yakutian diamond-bearing province (physical modeling results)

© Aleksandr V. Cheremnykh, Andrei S. Gladkov, Aleksei S. Cheremnykh

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of study is to clarify the specifics of the formation of kimberlite-controlling faults in Malo-Botuobinsky region, Yakutian diamond-bearing province, using physical modeling of rupture genesis for the sedimentary cover with alternating movements of the foundation blocks. Physical modeling for equivalent materials has been carried out at the Tectonic Physics Laboratory of the Earth's Crust Institute. As the model material, an aqueous suspension of montmorillonite clay with viscosity of 10^6 – 10^7 Pa·s has been used. For the purpose of the experiment, a special setup "Basement 3" has been made. The setup consists of a series of linearly elongated blocks imitating the fault-block structure of the Vilyui-Markhinsk fault zone of the Siberian platform within the study area. In the series of 12 experiments, the effect of the experimental setup dies' velocity and displacement vector on the specific structural paragenesis of the secondary faults formed in the model platform cover has been studied. The comparison of the fault networks obtained in experiments with different boundary conditions, and the fault-block structure scheme of the Mirny kimberlite field and the kimberlitic bodies plans has clarified the specifics of the kimberlitic-controlling faults formation in the study area. The conclusion is that the fault network within the area of dynamic influence of the Vilyui-Markha faults has been formed at a relatively low rate of the platform basement blocks displacement. This is confirmed by the fact that the fault network with the parameters comparable with the natural model is observed at a low speed of the experimental setup dies displacement. The extension structures that are most favorable for ore deposition are observed in the models with a slow rate of the experimental setup dies displacement. Besides, they are formed in the fault zones with alternating block displacements only at the second stage of model deformation (after changing the direction of the basement blocks movement) in strike-slip or transtension conditions. In the second-stage transtension conditions, openings of this type are not observed; and under transpression, the tension is observed not only for the e-type openings, but also for the cleavage planes of the second stage model deformation. The highest amplitude tension structures of all types tend to belong to the central parts of the model fault zones.

Keywords: physical modeling, fault formation, alternating basement movements, Yakutian diamond-bearing province, strike-slip faults, basement, Siberian platform

Acknowledgements: The work has been performed with a financial support of PJSC "ALROSA".

Information about the article: Received April 30, 2019; accepted for publication June 3, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. On the formation of Malo-Botuobinskoye region faults, Yakutian diamond-bearing province (physical modeling results). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii 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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 129–143. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-129-143.

Введение

Мало-Ботуобинский район Якутской алмазонасной провинции известен кимберлитовыми трубками с высоким содержанием алмазов – трубки Мир и Интернациональная. Эти и другие месторождения района пространственно приурочены к Вилуйско-Мархинской

зоне глубинных разломов. Основные разломы зоны и специфика их формирования детально охарактеризованы (в том числе в ходе экспериментов) в работах¹ [1].

Так, наиболее крупные дизъюнктивы Вилуйско-Мархинской разломной

¹ Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисковых работах: метод. пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с. / Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. Tectonic-physical studies in diamond exploration: learning manual. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2008. 175 p.

зоны – Буордахский, Западный, Параллельный, Центральный и Восточный – имеют север-северо-восточное простирание (рис. 1). Они проявлены в фанерозойском чехле Сибирской платформы в виде линейных зон шириной до 2,5–3 км, внутренняя структура которых представлена серией субвертикальных разрывов запад-северо-западного, северо-западного, север-северо-восточного простираний. Известные кимберлитовые тела района исследований расположены в узлах пересечения север-северо-восточного и запад-северо-западного разрывов [2–4 и др.].

Кроме того, выявлена последовательность изменения напряженно-деформированного состояния Мало-Ботуобинского района²: 1) северо-восточное сжатие – северо-западное растяжение; 2) северо-западное сжатие – северо-восточное растяжение; 3) субмеридиональное сжатие – субширотное растяжение. В связи со сменой простирания осей главных нормальных напряжений по основным разломам Вилюйско-Мархинской зоны происходили вначале правосторонние сдвиговые смещения, затем – левосторонние перемещения блоков, а позднее – раздвиговые деформации. Внедрение кимберлитов связывается с образованием структур присдвигового растяжения на втором (левосдвиговом) этапе формирования разломно-блоковой структуры района.

Цель наших исследований – уточнить условия формирования кимберлитоконтролирующих разломов (направление приложения внешнего воздействия и скорость деформирования) на основе экспериментов физического моделирования разрывообразования в чехле платформ при знакопеременных движениях блоков фундамента.

Методика проведения экспериментов

Моделирование с применением эквивалентных материалов на протяжении многих лет широко используется для установления специфики разломообразования при различных граничных условиях [5–10 и др.]. Наши эксперименты выполнены на установке «Разлом» в лаборатории тектофизики Института земной коры СО РАН. Опыты проведены с соблюдением условий подобия и размерностей [11, 12]. В качестве модельного материала применялись водные суспензии монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с. Вязкость модельного материала определялась в зависимости от влажности глинистой пасты по методике, изложенной в работе [13].

Для моделирования разрывообразования в чехле Сибирской платформы при знакопеременных смещениях блоков фундамента Мало-Ботуобинского района потребовалось изготовление дополнительного приспособления «Фундамент 3», которое состоит из серии линейно вытянутых блоков, имитирующих разломно-блоковую структуру субмеридиональной на данной площади Вилюйско-Мархинской разломной зоны фундамента Сибирской платформы (рис. 2). Блоки соединены между собой и перемещаются относительно друг друга с постоянной скоростью. Экспериментальная установка с модернизированными штампами «Фундамента 3» позволяла воспроизводить в моделях как правосторонние, так и левосторонние сдвиговые смещения блоков. Кроме того, для каждого модельного аналога разлома была заложена возможность реализации условий транспрессии (сдвиг с дополнительным сжатием) и транстенсии (сдвиг с

²Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисловых работах: метод. пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с. / Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. Tectonic-physical studies in diamond exploration: learning manual. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2008. 175 p.

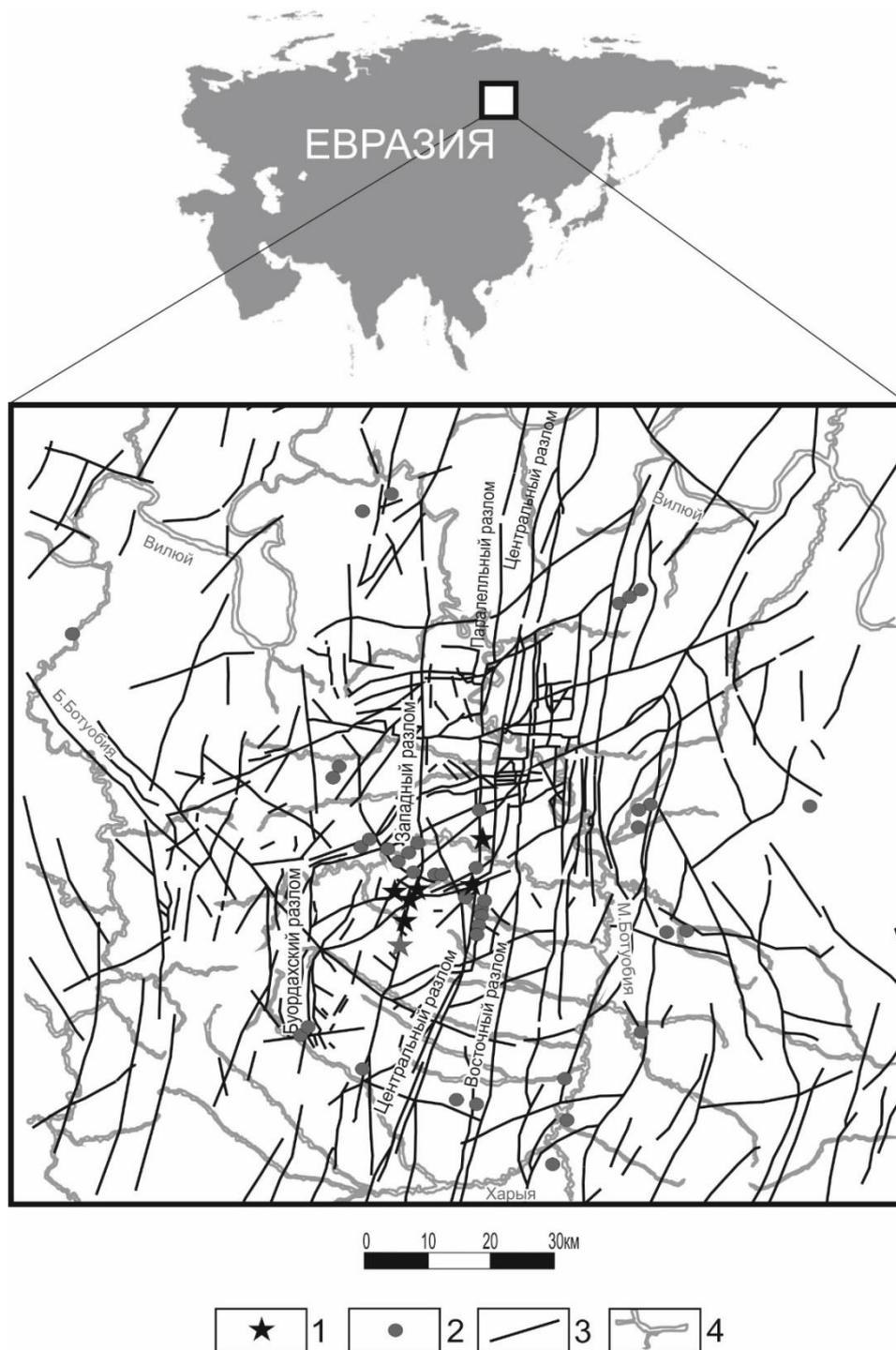


Рис. 1. Карта разломов фундамента Мало-Ботуобинского района с разрывными нарушениями по данным сейсморазведки:

1 – кимберлитовые тела Мирнинского поля; 2 – туфовые трубы;
 3 – разрывные нарушения фундамента по данным интерпретации
 методом общей глубинной точки; 4 – речная сеть

Fig. 1. Fault map of the Malo-Botuobinsky region basement compiled by seismic data:

1 – kimberlite bodies of the Mirninsky field; 2 – tuff pipes;
 3 – basement faults according to the interpretation
 of the common point depth method data; 4 – river network

растяжением). Последние достигались за счет конфигурации штампов, верхняя часть которых представляла собой пластины, перекрывающие друг друга, а нижняя – жесткие блоки, расстояние между которыми было от 5 до 30 мм (см. рис. 2, А, В).

Проведена серия из 12 экспериментов, и рассмотрена специфика разрывообразования в чехле платформы на моделях, имитирующих разломно-блоковую структуру фундамента района исследований. От опыта к опыту изменялись: 1) величина смещения штампов экспериментальной установки; 2) скорость перемещения штампов; 3) угол между направлением перемещения штампов и модельными аналогами магистральных сместителей основных разломов Вилуйско-Мархинской разломной зоны (были заданы граничные условия моделей с простираем вектора перемещения штампов – 1° , 6° и 10°).

Каждый эксперимент проводился согласно приведенной ниже последовательности операций. Модельный материал тщательно перемешивался. Затем, после взятия пробы для определения вязкости, он размещался равномерным слоем на дополнительном приспособлении «Фундамент 3». Толщина слоя, согласно теории подобия, соответствовала мощности осадочного чехла в пределах района исследований с необходимым увеличением, учитывающим денудацию. Поверхность модели выравнивалась, после чего производилось перемещение штампов экспериментальной установки с одной из скоростей: 10^{-4} или 10^{-5} м/с. На первом этапе штампы «Фундамента 3» смещались на суммарную величину от 80 до 170 мм от исходного положения. Затем направление перемещения штампов изменялось на противоположное. На втором этапе опыт продолжался до двукратного суммарного смещения

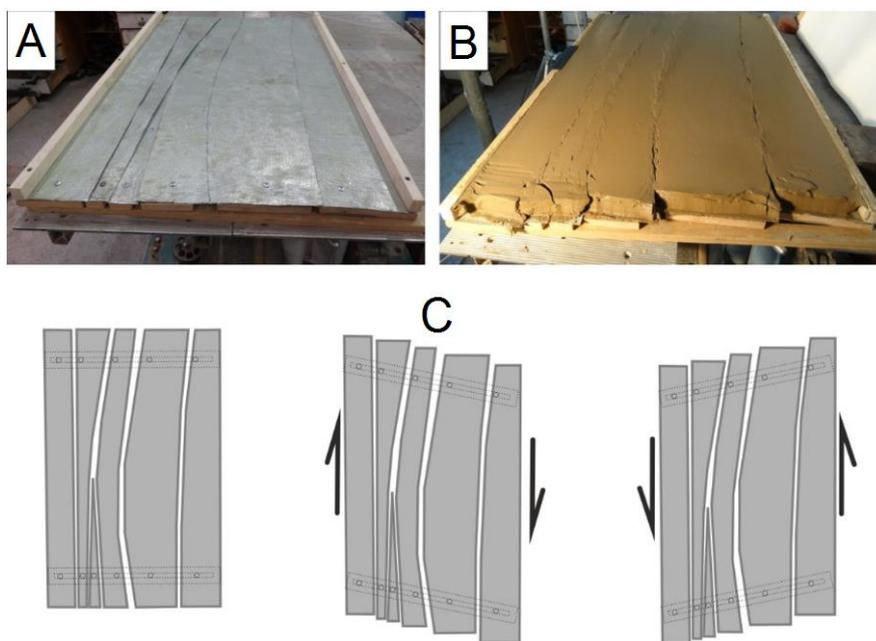


Рис. 2. Дополнительное приспособление «Фундамент 3», имитирующее разломно-блоковую структуру Вилуйско-Мархинской разломной зоны:

А – общий вид без модельного материала; В – модель на втором этапе эксперимента;

С – схемы, показывающие механизм и этапы смещения блоков «Фундамента 3»

Fig. 2. Auxiliary setup "Basement 3"

imitating the fault-block structure of the Vilyui-Markha fault zone:

A – general view without model material; B – model at the second stage of the experiment;

C – diagrams showing the mechanism and displacement stages of "Basement 3" blocks

штампов по сравнению с первым этапом. Для подавляющего большинства экспериментов на первом этапе воспроизводились условия правостороннего сдвига, а на втором – сдвига с левосторонним смещением крыльев (см. рис. 2, С). Все изменения на поверхности моделей фиксировались фотосъемкой через определенные промежутки времени, что позволило проследить динамику разрывообразования и установить особенности формирующихся разрывных дислокаций.

Результаты

Проведенное исследование подтвердило закономерности разрывообразования в сдвиговых зонах с наложенными разнонаправленными деформациями, выявленные ранее [1, 14–16], и позволило уточнить условия формирования кимберлитовмещающих разрывов в чехле Сибирской платформы, в Мало-Ботуобинском районе Якутской алмазодобывающей провинции, при знакопеременных смещениях блоков фундамента. Рассмотрим специфику структурообразования в моделях на примере разрывных дислокаций известного парагенеза зон скалывания [17, 18 и др.], который состоит из таких элементов, как: сдвиги Риделя [5] – R и R' , разрывы растяжения – e , взбросы и надвиги – t , сегменты магистрального сдвигового сместителя – Y , а также сдвиги – P . В процессе разрывообразования не всегда формируются все элементы структурного парагенеза зоны скалывания. Специфика образования и дальнейшего развития элементов данного структурного парагенеза зависит от граничных условий проведения экспериментов. В нашем исследовании оценено влияние скорости перемещения штампов экспериментальной установки и их ориентировки по отношению к внешнему воздействию на особенности разрывообразования в осадочном чехле платформы при знакопеременном смещении блоков фундамента.

Влияние величины смещения штампов экспериментальной установки на специфику образования разрывов. Влияние величины смещения штампов установки «Разлом» на особенности образования разрывов в подобных моделях обсуждалось ранее в статьях [15, 16]. Основная особенность заключается в том, чтобы первый этап каждого эксперимента прекратить до образования магистрального разрыва. Иначе на втором этапе эксперимента все деформации сосредотачиваются в окрестностях последнего, из-за чего формируются только элементы парагенеза зоны скалывания, генетически связанные со скольжением берегов магистрального шва. При отсутствии магистрального сместителя в начале второго этапа эксперимента образование разрывов начинается в широкой зоне и даже за пределами разломной зоны, сформировавшейся на первом этапе, что будет изложено ниже.

Выше отмечено, что в наших экспериментах штампы «Фундамента 3» на первом этапе смещались на суммарную величину от 80 до 170 мм, которая зависела от скорости их перемещения. В результате в формирующихся разломных зонах наблюдаются парагенезы разрывов, характерных для ранней и поздней дизъюнктивных стадий разломообразования [14]. Сеть разрывов, подобная природной, наблюдалась в моделях, характеризующихся минимальными смещениями штампов установки и медленной скоростью деформирования модельного материала. Однако скорость перемещения штампов экспериментальной установки и, соответственно, деформирования модельного материала оказывает существенное влияние на специфику разрывообразования.

Влияние скорости перемещения штампов экспериментальной установки на специфику разрывообразования. Опыты были проведены при двух отличающихся на порядок скоростях пере-

мещения штампов экспериментальной установки, что позволило выявить основные особенности структурообразования в зависимости от скорости деформирования (рис. 3). 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 одного и того же сегмента моделируемого разлома меньше ($\sim 3-9$ мм), а при скорости, равной 10^{-5} м/с, он значительно больше (7–22 мм). На втором этапе в зависимости от скорости деформирования на поверхности модели вначале

появляются либо разрывы растяжения е-типа (см. рис. 3, А II), либо R-сколы соответствующего направления (см. рис. 3, В II). Это важное отличие структурообразования при различных скоростях перемещения штампов экспериментальной установки, от которого зависят типы структур, благоприятных для локализации кимберлитовых тел.

Кроме того, на некоторые особенности разрывообразования скорость перемещения штампов экспериментальной установки оказывает меньшее влияние. Так, при использованных нами скоростях деформирования и сопоставимой с мощностью осадочного чехла платформы толщиной модели над

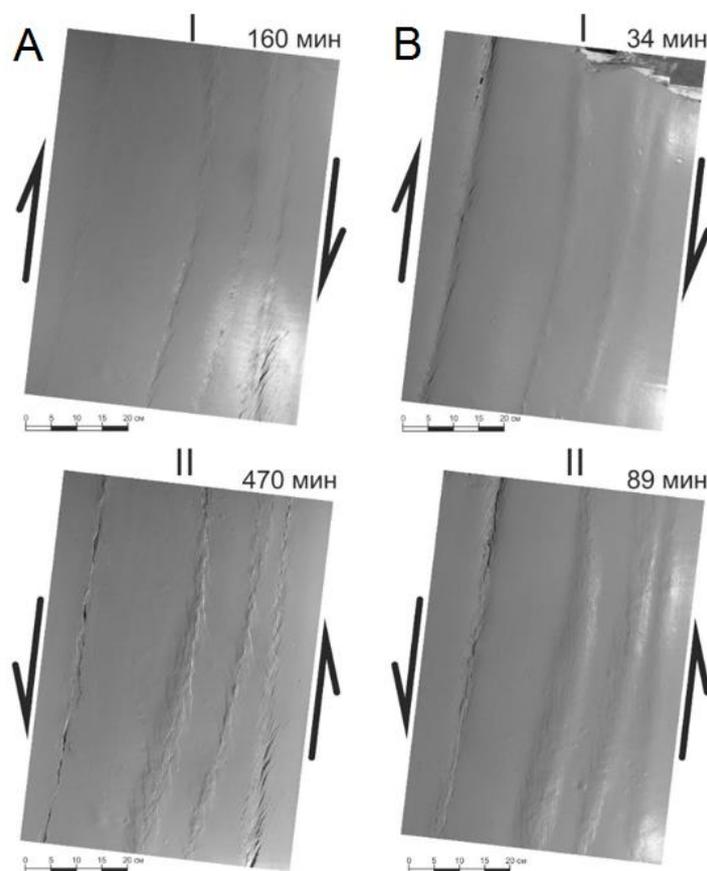


Рис. 3. Разрывная структура в моделях, деформирующихся при различных скоростях (фото экспериментов):

А – скорость 10^{-5} м/с; В – скорость 10^{-4} м/с

Римскими цифрами обозначены этапы эксперимента

Fig. 3. Faults structure in the models deformed at different speed values (photos of the experiments):

A – speed, 10^{-5} m/s; B – speed, 10^{-4} m/s

Roman figures indicate the experiment stages

Параллельным и Центральным разломами образуется единая зона. Далее при описании результатов моделирования мы будем обозначать этот разлом как Параллельный-Центральный, подчеркивая данную специфику разломообразования района исследований.

Однако не только скорость деформирования модельного материала оказывает влияние на особенности структурообразования в разломных зонах. Так как разрывы фундамента платформы расположены под углами друг к другу, то и разрывы чехла формируются не только в условиях простого сдвига, но и в обстановках сдвига с дополнительным сжатием (транспрессия) или сдвига с растяжением (транстенсия), что отражается на специфике образования и относительных размерах элементов структурного парагенеза.

Влияние угла между направлением перемещения штампов и модельными аналогами разломов на формирование структурных ловушек. Ранее экспериментально воспроизведены обстановки в зоне единичного прямолинейного разлома фундамента, которые позволили изучить структурообразующую роль знакопеременных движений в разломных зонах при сдвиге, транспрессии и транстенсии [16]. Исследование показало, что наиболее благоприятные структуры для локализации рудовмещающих тел формируются на втором этапе экспериментов и приурочены к разломным зонам. Исключение составляют разрывы е-типа, которые наблюдаются за пределами зон скалывания и образуются на втором этапе развития зон в условиях знакопеременных смещений блоков фундамента, при смене динамической обстановки транспрессии первого этапа на транстенсию второго этапа. При дальнейшей деформации эти разрывы, зарождающиеся на периферии разломных зон, постепенно прорастают к центральным частям зон, где в итоге

наблюдаются максимальные амплитуды раздвигов е-типа.

В данном исследовании рассмотрим области формирования различных структурных обстановок и, соответственно, разных типов структур растяжения при активизации разломно-блоковой структуры в пределах субмеридиональной Вилюско-Мархинской зоны. Необходимость этих экспериментов связана со спецификой деструктивного процесса в разломно-блоковой среде, когда особенности взаимодействия дизъюнктивов, обусловленные расположением их относительно друг друга и геометрическими параметрами, вызывают формирование разрывных дислокаций, нетипичных для обособленных разломных зон, изученных ранее [14, 16]. Нами воспроизведены три генеральных простирания линии смещения блоков «Фундамента 3»: 1°, 6° и 10°, каждое из которых соответствовало двум направлениям векторов движения блоков (рис. 4, В–D).

При субмеридиональном генеральном смещении штампов экспериментальной установки за счет различия простирания разломов фундамента и ориентировки вектора перемещения блоков наблюдается следующая специфика структурообразования (см. рис. 4, В). На первом этапе над каждым разломом фундамента формируется зона транстенсии. При этом существенная раздвиговая составляющая наблюдается в зоне Буордахского разлома и в южных частях Западного, Параллельного-Центрального и Восточного разломов. В северных частях этих разломных зон на первом этапе наблюдаются условия сдвига. На втором этапе парагенезы разрывов в зонах Буордахского разлома и южных сегментов других разломов формируются в условиях транспрессии. В северных частях разломов наблюдаются условия типичного сдвига по модели Риделя [5].

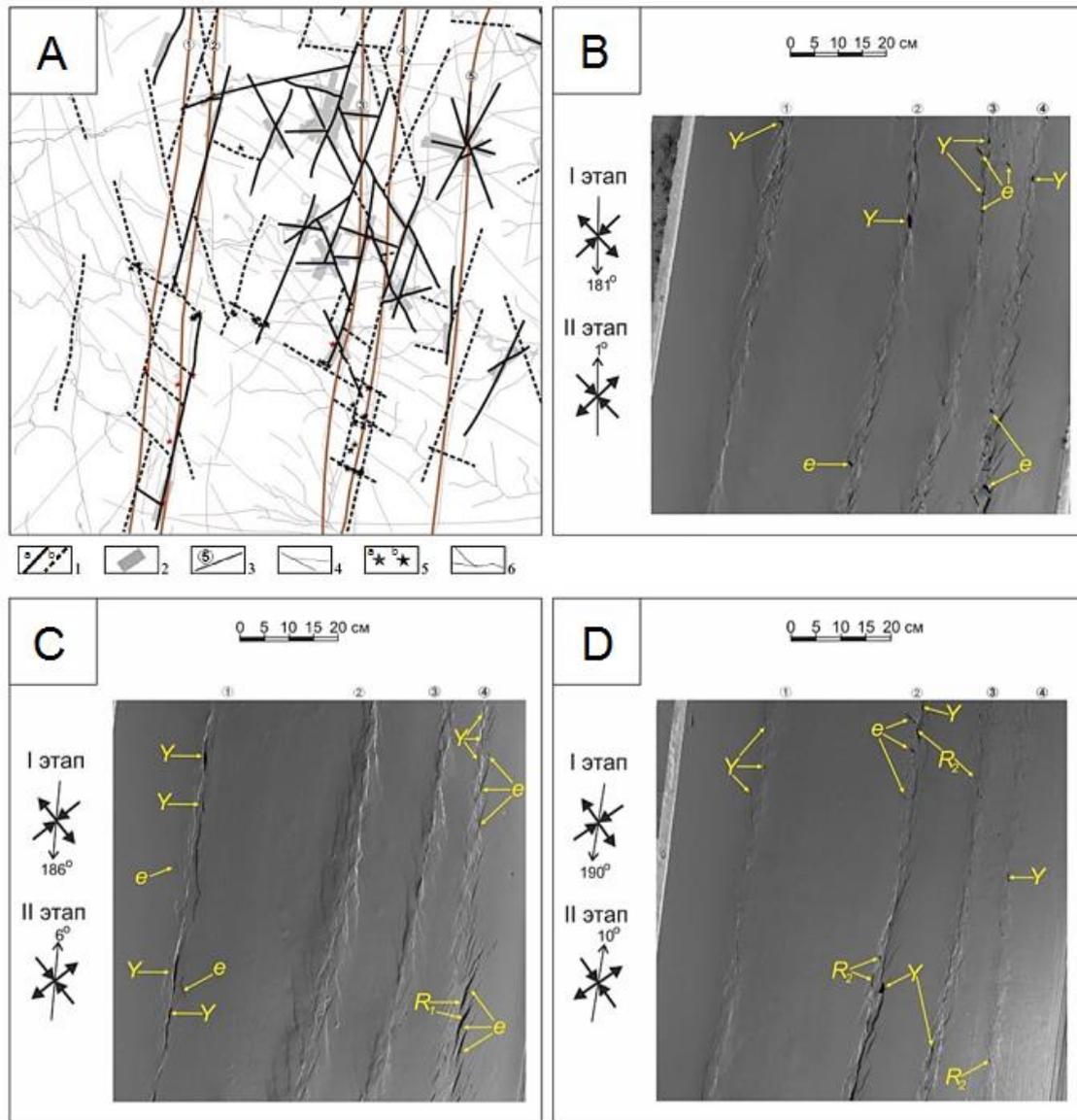


Рис. 4. Разломно-блоковая структура Мало-Ботубинского района и результаты моделирования разрывообразования в чехле платформы над разломами фундамента:
A – схема разломно-блокового строения Мирнинского кимберлитового поля³: 1 – разломы в верхних слоях платформенного чехла: а – установленные, б – предполагаемые; 2 – участки прямых наблюдений зон разрывных нарушений; 3 – разломы фундамента, выделенные по геофизическим данным: 1 – Кюеляхский, 2 – Западный, 3 – Параллельный, 4 – Центральный, 5 – Восточный; 4 – разломы чехла, выделенные по геофизическим данным; 5 – трубки: а – кимберлитов, б – туфов; 6 – речная сеть
B, C, D – разрывная сеть на завершающем этапе экспериментов в моделях с различным генеральным простиранием вектора смещения штампов экспериментальной установки при медленной скорости
 Цифры в кружках – модельные аналоги разломов фундамента:
 1 – Буордахский, 2 – Западный, 3 – Параллельный и Центральный, 4 – Восточный
 Y, e, R₁ и R₂ – элементы структурного парагенеза сдвиговой зоны (пояснения в тексте)

³Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах: метод. пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с. / Gladkov A.S., Bornyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. Tectonic-physical studies in diamond exploration: learning manual. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2008. 175 p.

Fig. 4. Fault-block structure of the Malo-Botuobinsky region and faulting modeling results for the platform cover above the basement faults:

A – fault-block structure of the Mirny kimberlitic field³: 1 – faults in the upper layers of the platform cover: a – established, b – assumed; 2 – areas of the fault zones direct observation; 3 – basement faults obtained by geophysical data: 1 – Kyuyelyakhskiy, 2 – Western, 3 – Parallel, 4 – Central, 5 – Eastern; 4 – cover faults by geophysical data; 5 – pipes: a – kimberlites, b – tuffs; 6 – river network
B, C, D – fault network at the final stage of experiments in models with different general strike of the experimental setup parts displacement vector at a slow speed
The figures in circles denote model's analogues of the basement faults:
1 – Buordakhsky, 2 – Western, 3 – Parallel and Central, 4 – East
Y, e, R₁ и R₂ – elements of structural paragenesis of the slide zone (see explanations in the text)

Благоприятные для внедрения кимберлитов структуры при данных граничных условиях формируются в пределах разломных зон. Это дислокации, образование которых связано с извилистостью магистрального сместителя разлома – Y . Кроме того, в зоне Восточного разлома и в северной части объединенной зоны Параллельного и Центрального дизъюнктивов наблюдаются структуры растяжения e -типа (см. рис. 4, *B*).

При генеральном смещении штампов экспериментальной установки, равном 6° , зафиксированы следующие особенности структурообразования. На первом этапе практически все зоны развиваются в условиях правостороннего сдвига. Исключение составляют южные части разломных зон, в пределах которых наблюдается транстенсия. На втором этапе в зонах также преобладают сдвиговые перемещения, к которым в результате изменения направления движения штампов (левый сдвиг) в южных частях разломов добавляется транспрессия. Наиболее близкую ориентировку к направлению скольжения имеет Восточный разлом, поэтому его зона испытывает сдвиговые деформации, типичные для модели Риделя. С этой особенностью, вероятно, связано формирование структур растяжения именно в зоне Восточного дизъюнктива, а также в центральной части Буордахского разлома (см. рис. 4, *C*).

Отличительной особенностью разрывообразования при данных граничных условиях является практически

полное сосредоточение благоприятных для рудоотложения структур в пределах Буордахской и Восточной разломных зон и отсутствие таковых в зонах влияния других дизъюнктивов. При этом в зоне Буордахского разлома структуры растяжения связаны с формированием магистрального шва или представляют собой единичные раздвиги e -типа. А в зоне Восточного дизъюнктива наиболее крупные структуры растяжения наблюдаются в южных частях зоны. Их пространственная ориентировка соответствует простиранию сколов первого этапа – R_1 . Кроме того, в пределах зоны этого дизъюнктива зафиксированы отрывы e -типа и структуры растяжения у изгибов магистрального шва – Y .

При направлении смещения штампов экспериментальной установки, равном 10° , у различных дизъюнктивов наблюдается отличающаяся картина структурообразования в пределах зон. Так, для зоны Буордахского разлома на первом этапе экспериментов характерна обстановка транспрессии. В модельных аналогах северных сегментов зон Западного, Параллельного и Центрального разломов на первом этапе опытов также наблюдается транспрессия, а для их южных сегментов характерны условия транстенсии. Центральные же сегменты моделируемых разломных зон развиваются в обстановке сдвига с правосторонним перемещением крыльев. Несколько отличаются условия формирования зоны Восточного разлома, для которого характерны обстановки транс-

прессии в северном сегменте и сдвига в южном. При смене направления смещения штампов на противоположное соответственно изменяется положение областей трансенсии и транспрессии. В результате на втором этапе экспериментов северные сегменты всех разломов развиваются в обстановке трансенсии, что способствует образованию структур растяжения. Наиболее «зрелые» структуры растяжения е-типа наблюдаются в зоне модельного аналога Западного дизъюнктива (см. рис. 4, D). Кроме того, в зонах разломов формируются структуры растяжения в окрестностях магистрального шва – У и разрывы сдвиго-раздвигового характера – R₂. Таким образом, при данных граничных условиях формируется три типа структур, благоприятных для рудоотложения – е, У и R₂.

Обсуждение полученных результатов

Проведенное исследование позволило уточнить условия формирования разрывов чехла Сибирской платформы в пределах Мало-Ботуобинского района Якутской алмазонасной провинции. Во введении отмечено, что известные алмазонасные трубки тяготеют к узлам сочленения разломов фундамента Вилюйско-Мархинской зоны, имеющих север-северо-восточное простирание, и значительно менее протяженных разрывов запад-северо-западной ориентировки. Последние являются разломами чехла платформы и по своей ориентировке, составляющей 295–325° (рис. 5), соответствуют структурам растяжения е-типа известного парагенеза зоны скалывания, которые образуются на втором этапе проведенных нами экспериментов (см. рис. 4).

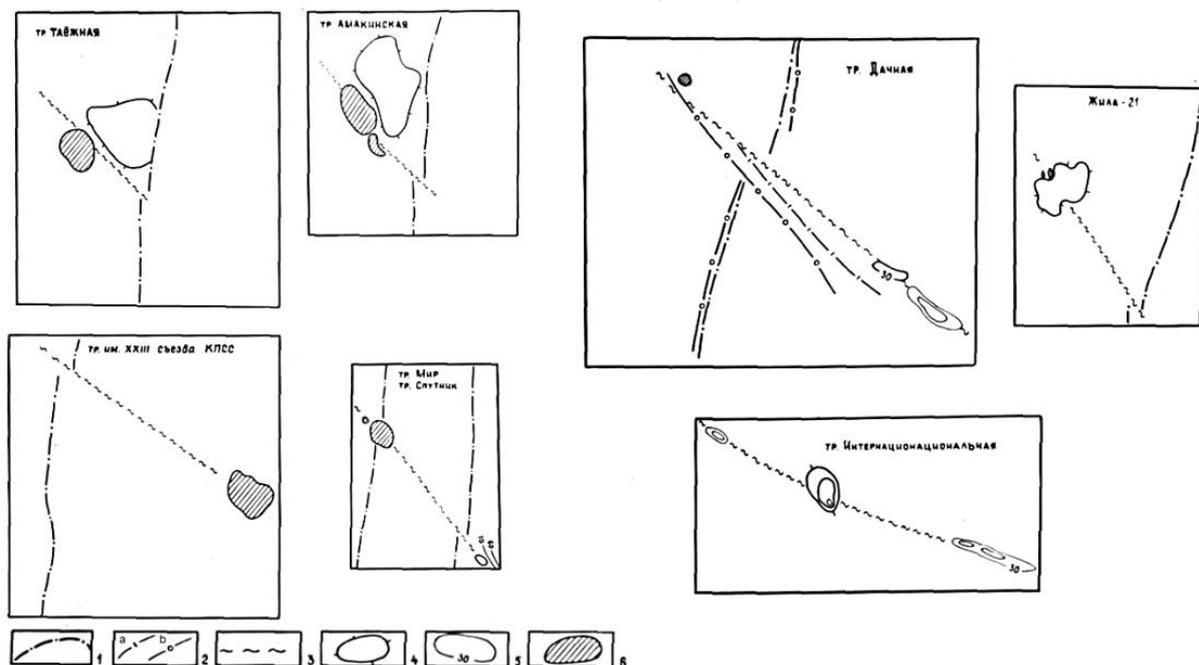


Рис. 5. Элементы гравимагнитных полей на участках внедрения кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района [4]:

- 1 – оси положительных аномалий магнитного поля; 2 – оси отрицательных (а) и положительных (b) аномалий поля силы тяжести; 3 – рудовмещающие трещины по данным магниторазведки; 4 – гравитационные максимумы; 5 – изолинии магнитного поля, нТл; 6 – кимберлитовые тела

Fig. 5. Elements of gravimagnetic fields in the kimberlite bodies intrusion zone, Malo-Botuobinsky region [4]:

- 1 – axes of positive magnetic field anomalies; 2 – axes of negative (a) and positive (b) gravity field anomalies; 3 – ore-bearing cracks by magnetic survey data; 4 – gravitational maximums; 5 – magnetic field isolines, nT; 6 – kimberlite bodies

Эксперименты подтвердили эволюцию регионального напряженно-деформированного состояния района исследования, при которой по субмеридиональным разломам фундамента платформы реализовались сначала правосторонние, а затем левосторонние сдвиговые перемещения блоков. В результате в модельном аналоге чехла платформы сформировались широкие полосы разрывов различной ориентировки и морфолого-кинематического типа – сколов и отрывов, отражающие области динамического влияния разломов [7]. Эти области имеют строение, характерное для зон крупных разломов земной коры с дискретными деструктивными полями и сегментами магистрального шва [19]. Внутренняя структура изученных в моделях разломных зон состоит из элементов наложенных парагенезов разрывов зон правостороннего и левостороннего сдвигов, специфика образования и развития которых зависит от скорости деформирования и вектора движения блоков фундамента.

Сравнение природной сети разломов и разрывов на поверхностях моделей, деформированных при различных граничных условиях, которое возможно благодаря теории подобия, позволило установить, что разрывы в чехле Сибирской платформы в пределах района исследования сформировались в результате медленного перемещения блоков фундамента. Этот вывод весьма важен, так как именно медленная скорость деформирования модельного материала является необходимым условием образования структур растяжения е-типа, которые являются разрывами осадочного чехла, весьма благоприятными для локализации кимберлитовых тел.

Кроме того, моделирование показало, что количество структур растяжения и их типовое разнообразие в разломных зонах преобладает при ориентировке вектора смещения блоков фунда-

мента, равной 10° . В моделях с такими граничными условиями структуры растяжения е-типа широко распространены в пределах деструктивных полей экспериментальных аналогов Западного и Параллельного-Центрального разломов. Также в пределах модельных аналогов зон динамического влияния разломов наблюдаются структуры растяжения, генетически связанные с сегментами магистрального сместителя (У) или сдвигами (R_2). Последние, как правило, наблюдаются на участках зон, формирующихся в условиях трансенсии. Вероятно, что именно такие граничные условия существовали на момент формирования алмазоносных кимберлитовых тел.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При толщине модели, аналогичной мощности чехла Сибирской платформы в пределах района исследований, сближенные в пространстве моделируемые Параллельный и Центральный разломы формируют единую разломную зону.

2. Структуры растяжения е-типа образуются только при медленной скорости перемещения штампов экспериментальной установки. Кроме того, они формируются в разломных зонах при знакопеременных смещениях крыльев лишь на втором этапе деформирования моделей (после смены направления перемещения крыльев) в обстановках сдвига или трансенсии. В обстановке трансенсии второго этапа раздвижки этого типа не наблюдаются, а при трансенсии растяжение осуществляется не только у раздвигов е-типа, но и у плоскостей разрывов R_2 .

3. Наиболее амплитудные структуры растяжения описанных выше типов тяготеют к центральным частям разломных зон.

В целом проведенное моделирование подтвердило предложенную геодинамическую модель многоэтапного формирования основных систем разрывных нарушений осадочного чехла в пределах Вилюйско-Мархинской зоны разломов фундамента, а также намеченную ранее последовательность в смене кинематики сдвиговых движений по ним с право- на левосторонние [1]. Были уточнены условия формирования разломов района исследования и изуче-

ны разрывы, перспективные для локализации кимберлитовых тел. Согласно полученным результатам, наиболее благоприятными элементами разрывной сети для формирования структур локального растяжения и внедрения кимберлитовых тел являются нарушения запад-северо-западной и северо-западной ориентировок и особенно участки их примыкания к зонам Буордахского и Западного разломов.

Библиографический список

1. 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 алмазоносная провинция) // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 3. С. 366–369.
2. Харьков А.Д., Борис Е.И., Иванов И.Н., Щукин В.Н. К характеристике трубок взрыва Мало-Ботуобинского района // Советская геология. 1972. № 8. С. 51–65.
3. Борис Е.И., Францессон Е.В. О закономерностях размещения кимберлитовых тел в Мало-Ботуобинском районе (Западная Якутия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1992. № 5. С. 68–75.
4. Ваганов В.И., Варламов В.А., Фельдман А.А., Голубев Ю.К., Прусакова Н.А., Олофинский Л.Н., Бойко А.Н. Прогнозно-поисковые системы для месторождений алмазов // Отечественная геология. 1995. № 3. С. 42–53.
5. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Abt. B: Geologie und Paläontologie. Stuttgart: Schweizerbart, 1929. P. 354–368.
6. Гзовский М.В. Моделирование тектонических полей напряжений и разрывов // Известия Академии наук СССР. Серия геофизическая. 1954. № 6. С. 527–545.
7. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
8. Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation // Geology. 1994. Vol. 22. P. 567–570.
9. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results // Tectonophysics. 2012. Vol. 574-575. P. 1–71.
10. 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.
11. Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. Т. 24. № 10. С. 10–19.
12. Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теории подобия // Геология и геофизика. 1984. Т. 25. № 3. С. 8–18.
13. Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск: Изд-во ВИНТИ РАН, 1986. 131 с.
14. 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. Иркутск: Изд-во ИРНИИТУ, 2016. 204 с.
15. Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. Экспериментальное исследование разрывообразования в чехле платформы при активизации разломов фундамента (Накынское кимберлитовое поле Якутской алмазоносной провинции) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф. Т. 2. М., 2016. С. 188–195.
16. Черемных А.В. Структурообразующая роль знакопеременных движений в зонах сдвига // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2018: актуальные проблемы изучения недр». Вып. 18. Иркутск, 2018. С. 242–249.

17. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // *Journal of Structural Geology*. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.
18. Sylvester A.G. Strike-slip faults // *Geological Society of America Bulletin*. 1988. Vol. 100. P. 1666–1703.

19. Лобацкая Р.М. Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.

References

1. 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 Russ.).

2. Khar'kiv A.D., Boris E.I., Ivanov I.N., Shchukin V.N. On the character of Malo-Botuobinsky pipes. *Sovetskaya geologiya*, 1972, no. 8, pp. 51–65. (In Russ.).

3. Boris E.I., Frantsesson E.V. On distribution of kimberlite bodies in Malo-Botuobinsky region, Western Yakutia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Schools. Geology and Exploration], 1992, no. 5, pp. 68–75. (In Russ.).

4. Vaganov V.I., Varlamov V.A., Fel'dman A.A., Golubev Yu.K., Prusakova N.A., Olofinskii L.N., Boiko A.N. Prospecting systems for diamond fields. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 3, pp. 42–53. (In Russ.).

5. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Centralblatt fur Mineralogie, Geologie und Palaontologie. Abt. B: Geologie und Palaontologie*. Stuttgart: Schweizerbart, 1929, pp. 354–368.

6. Gzovskii M.V. Modeling of tectonic stress-and-fault fields. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geofizicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geophysics Series], 1954, no. 6, pp. 527–545. (In Russ.).

7. Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu. *Oblasti dinamicheskogo vliyaniya razlomov* [Areas of fault dynamic influence]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983, 112 p. (In Russ.).

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

9. 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.

10. 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, pp. 7–32.

11. Shemenda A.I. Similarity criteria in mechanical modeling of tectonic processes. *Geologiya i*

geofizika [Russian Geology and Geophysics], 1983, vol. 24, no. 10, pp. 10–19. (In Russ.).

12. Sherman S.I. Physical experiment in tectonics and similarity theory. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1984, vol. 25, no. 3, pp. 8–18. (In Russ.).

13. Seminskii K.Zh. *Strukturno-mekhanicheskie svoystva glinistykh past kak model'nogo materiala v tektonicheskikh eksperimentakh* [Structural and mechanical properties of clayey pastes as model material in tectonic experiments]. Irkutsk: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences Publ., 1986, 131 p. (In Russ.).

14. 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* [Special mapping of fault zones of the Earth's crust and its potential for the study of kimberlite structure control in the Alakit-Markha field, Yakutian diamond-bearing province]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2016, 204 p. (In Russ.).

15. Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. *Ekspperimental'noe issledovanie razryvoobrazovaniya v chekhle platformy pri aktivizatsii razlomov fundamenta (Nakynskoe kimberlitovoe pole Yakutskoi almazonosnoi provintsii)* [Experimental study of the platform cover faulting in the conditions of active basement fault formation (Nakynsky kimberlite field, Yakutian diamond province)]. *Materialy dokl. Vseros. konf. s mezhdunar. uch. "Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle"* [Proceedings of the All-Russian conference "Tectonophysics and topical issues of Earth Sciences"]. Vol. 2. Moscow, 2016, pp. 188–195. (In Russ.).

16. Cheremnykh A.V. *Strukturoobrazuyushchaya rol' znakoperemennykh dvizhenii v zonakh sdviga* [Structure-forming role of alternating movements in the shear zones]. *Materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch. "Geonauki-2018: aktual'nye problemy izucheniya nedr"* "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy" [Proceedings of the All-Russian Research-and-technical Conference with Int. participation "Geosciences-2018: topical issues of subsoil study" "Geology, survey and exploration of mineral resources and methods of geological research"]. Ed. 18. Irkutsk, 2018, pp. 242–249. (In Russ.).

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

18. Sylvester A.G. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, vol. 100,

pp. 1666–1703.

19. Lobatskaya R.M. *Strukturnaya zonal'nost' razlomov* [Structural zonality of faults]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 128 p. (In Russ).

Критерии авторства / Authorship criteria

Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Aleksandr V. Cheremnykh, Andrei S. Gladkov, Aleksei S. Cheremnykh are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

Сведения об авторах / Information about the authors



Черемных Александр Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: cherem@crust.irk.ru

Aleksandr V. Cheremnykh,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Senior Researcher, Tectonic Physics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: cherem@crust.irk.ru



Гладков Андрей Станиславович,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: gladkov@crust.irk.ru

Andrei S. Gladkov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Tectonic Physics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: gladkov@crust.irk.ru



Черемных Алексей Сергеевич,

ведущий инженер лаборатории тектонофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: acherem@crust.irk.ru

Aleksei S. Cheremnykh,

Leading Engineer, Tectonic Physics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: acherem@crust.irk.ru