



## THREE-DIMENSIONAL STRUCTURAL-MATERIAL MODELS OF THE FORMATION OF THE NYURBINSKAYA AND BOTUOBINSKAYA KIMBERLITE PIPES (YAKUTIAN DIAMONDIFEROUS PROVINCE, RUSSIA)

E. V. Serebryakov<sup>1</sup>, A. S. Gladkov<sup>1</sup>, D. A. Koshkarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup> *Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA», Mirny, Russia*

**Abstract:** The Nyurbinskaya and Botuobinskaya kimberlitic pipes were in the focus of a comprehensive study aimed to investigate their structural and material positions as the main deposits in the Nakyn field (Yakutian Diamondiferous Province, Russia). This paper presents the study results and 3D structural-material models showing the formation of these deposits. In application to geological studies, the 3D modeling technologies allow taking into account the anisotropy of material complexes comprising kimberlite pipes, as well as inconsistencies in the structural and morphological properties of ore-bearing structures. In order to discover the structural positions and features of the fault-block structures of the deposits, tectonophysical methods were used in combination with tacheometric surveys. Based on this more comprehensive and integrated approach, the existing fault patterns were clarified in detail; elements of the internal fault structure were mapped; fault azimuths and dip angles were estimated; and thickness values were obtained. Computer processed data were used to construct 3D models showing the fault-block structures of the Nyurbinskaya and Botuobinskaya pipes. The mineralogical, petrographic and diamond-bearing features of various kimberlite generations comprising these pipes were investigated in order to reconstruct the morphology and spatial positions of each of the selected complexes in the current cross-section and in accordance with intrusion phases. The 3D frame models of geological bodies were constructed for all the magmatic phases, including porphyry kimberlite and eruptive and autolithic kimberlite breccia. The structural-material models for the Nyurbinskaya and Botuobinskaya pipes were based on a synthesis of their material and structural features discovered in the previous stages of the study. The models presented in this paper are used to discuss temporal relationships between faults in the kimberlitic structure and material complexes comprising the pipes. The models show that the pipes occurred in the near-surface structures of shear tension, which developed in the areas where the NNE-striking fault was conjugated with the ENE- and NE-striking faults in the fault zone resulting from several stages of the tectono-magmatic activity. In this case, the kimberlite melt material was transported in discrete portions from the source through deep-seated faults, and the faults acted as channels characterized by an increased permeability. Disjunctive elements identified in this study facilitated magma movements and localization of kimberlite bodies.

**Key words:** kimberlite pipe; fault-block structure; structural-material model

### RESEARCH ARTICLE

**Received:** January 29, 2019

**Revised:** July 11, 2019

**Accepted:** August 22, 2019

**For citation:** Serebryakov E.V., Gladkov A.S., Koshkarev D.A., 2019. Three-dimensional structural-material models of the formation of the Nyurbinskaya and Botuobinskaya kimberlite pipes (Yakutian Diamondiferous Province, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (4), 899–920. doi:10.5800/GT-2019-10-4-0448.

**Funding:** This study was carried out as part of the basic research project “Structural-Material Evolution of the Lithosphere of the Siberian Craton, Magmatism and Ore Genesis” with a partial financial support provided by AK ALROSA (PJSC).

# ТРЕХМЕРНЫЕ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК НЮРБИНСКОЙ И БОТУОБИНСКОЙ (ЯКУТСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

Е. В. Серебряков<sup>1</sup>, А. С. Гладков<sup>1</sup>, Д. А. Кошкарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

**Аннотация:** В работе представлены результаты комплексного подхода к изучению структурной и вещественной позиции коренных месторождений Накынского поля – кимберлитовых трубок Нюрбинской и Ботубинской, что нашло отражение в трехмерных структурно-вещественных моделях их формирования. Использование объемного моделирования как одного из наиболее прогрессивных методов геологического познания позволило учесть высокую степень изменчивости (анизотропии) вещественных комплексов, слагающих кимберлитовые трубки, а также невыдержанность структурно-морфологических свойств рудовмещающей структуры. Решение задач, связанных с определением структурной позиции и особенностей разломно-блокового строения рассматриваемых месторождений, осуществлялось путем применения тектонофизических методов в сочетании с методами тахеометрической съемки. С их помощью значительно детализированы существующие схемы разломного строения участков, откартированы элементы внутренней структуры разломов, определены азимуты и углы падения нарушений, установлена их мощность. По результатам компьютерной обработки материалов построены трехмерные модели разломно-блокового строения участков локализации трубок Нюрбинской и Ботубинской. Исследования минералого-петрографических особенностей и специфики алмазности различных генераций кимберлита, слагающих трубки Нюрбинскую и Ботубинскую, позволили восстановить морфологию и пространственное положение каждого из выделенных комплексов как в современном срезе, так и на этапе внедрения. Для всех магматических фаз (порфировый кимберлит, эруптивная кимберлитовая брекчия и автолитовая кимберлитовая брекчия) созданы объемные каркасные модели их геологических тел. Разработка структурно-вещественных моделей для трубок Нюрбинской и Ботубинской осуществлялась путем синтеза данных о вещественных и структурных особенностях месторождений, полученных в ходе предыдущих этапов исследования. В рамках представляемых моделей во временной последовательности рассмотрены процессы взаимодействия разрывных нарушений, формирующих кимберлитовмещающую структуру, и вещественных комплексов, слагающих трубки. Согласно полученным моделям, формирование трубок происходило в приповерхностных структурах придвигового растяжения, образованных на участках сопряжения разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного и северо-западного направления в результате нескольких этапов тектономагматической активизации. При этом доставка дискретных порций кимберлитового расплава от источника происходила по глубинным разломам, выступающим в качестве каналов повышенной проницаемости. В совокупности выделенные дизъюнктивные элементы представляют собой структуры, благоприятные для перемещения магмы и локализации кимберлитовых тел.

**Ключевые слова:** кимберлитовая трубка; разломно-блоковое строение; структурно-вещественная модель

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеется большое количество работ, характеризующих модельные представления о строении и формировании кимберлитовых трубок для разных регионов мира [Nowicki et al., 2004; Field et al., 2008; Pervov et al., 2011; и др.]. Также разработан ряд обобщающих моделей для кимберлитовых трубок [Hawthorne, 1975; Kharkiv et al., 1998]. При этом в подавляющем большинстве из них детально рассмотрены вопросы, касающиеся минералогии, петрографии кимберлитов, распределения различных фаз внедрения, изучения глубинных ксенолитов, и в

целом они посвящены проблемам вещественного строения трубок. Структурной составляющей, в силу различных причин, уделяется гораздо меньше внимания. Между тем изучение структурных особенностей не менее важно, поскольку именно тектонические нарушения формируют в литосфере первичные каналы проницаемости, которые при наличии благоприятной магматической обстановки обеспечивают возможность внедрения кимберлитовых тел. Отсутствие структурных данных в моделях формирования кимберлитов снижает научную и практическую значимость подобных построений. В своих исследованиях мы попытались восполнить

этот пробел, используя интегрированный подход к анализу вещественных и структурных элементов строения коренных месторождений алмаза – трубок Нюрбинской и Ботуобинской, ставших объектами исследования в представляемой работе. В настоящий момент они вовлечены в промышленную разработку, что создает уникальные условия для их всестороннего изучения. Статья включает результаты диссертационного исследования Е.В. Серебрякова [Serebryakov, 2018].

## 2. ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кимберлитовые трубки Нюрбинская и Ботуобинская являются одними из шести открытых на данный момент проявлений кимберлитового магматизма в пределах Накынского поля Якутской алмазоносной провинции (рис. 1). Территориально поле располагается на участке сочленения трех крупных структур Сибирской платформы, характеризующихся широким распространением терригенно-карбонатных отложений палеозой-мезозойского возраста, – Анабарской антеклизы, Сюдджерской седловины и Вилюйской синеклизы и пространственно приурочено к северо-западному борту Палеовилюйского авлакогена.

Общая тектоническая структура рассматриваемой площади представляет собой результат взаимодействия двух крупных разломных зон: Вилюйско-Мархинской и Среднемархинской [Kondratiev, Gorev, 2005]. В узле их пересечения выделяется тектонический блок, к которому приурочено Накынное кимберлитовое поле. В его пределах наиболее широким распространением пользуются дизъюнктивы северо-восточной и северо-западной ориентировки, входящие, соответственно, в Вилюйско-Мархинскую и Среднемархинскую зоны разломов фундамента.

Подчиненным значением пользуются дизъюнктивы север-северо-восточной и восток-северо-восточной ориентировки. Именно с ними, а точнее с одним нарушением – Диагональным разломом – связаны все кимберлитовые тела региона, что позволяет отнести Накынное поле к типу субпараллельных, формирование которых происходит «...в особых геоструктурных условиях» [Milashev, 1985]. Из-за своей слабой проявленности в геофизических полях Диагональный разлом относят к так называемым «скрытым разломам». Его пространственное положение было установлено преимущественно по косвенным признакам (наличие минерализованных трещин, зеркал скольжения, микросбросов в керне поисковых скважин [Ignatov et al., 2008], линейная ориентировка длинных осей кимберлитовых тел), а также по результатам высокочастотно-

го сейсмического зондирования и детальной магнитометрии.

Вещественные комплексы, развитые в пределах участка локализации трубки Нюрбинской, представлены осадочными (вмещающие и перекрывающие) и магматическими образованиями. Вмещают трубку терригенно-карбонатные отложения мархинской и олдондинской свит позднего кембрия – раннего ордовика. С поверхности трубка перекрыта слабощементированными терригенными образованиями мезокайнозойского возраста (J<sub>1-2</sub>–Q<sub>4</sub>), мощностью 56–71 м [Kharkiv et al., 1998]. Граница между вмещающими и перекрывающими комплексами выражена слоем дезинтегрированной коры выветривания среднего – позднего триаса.

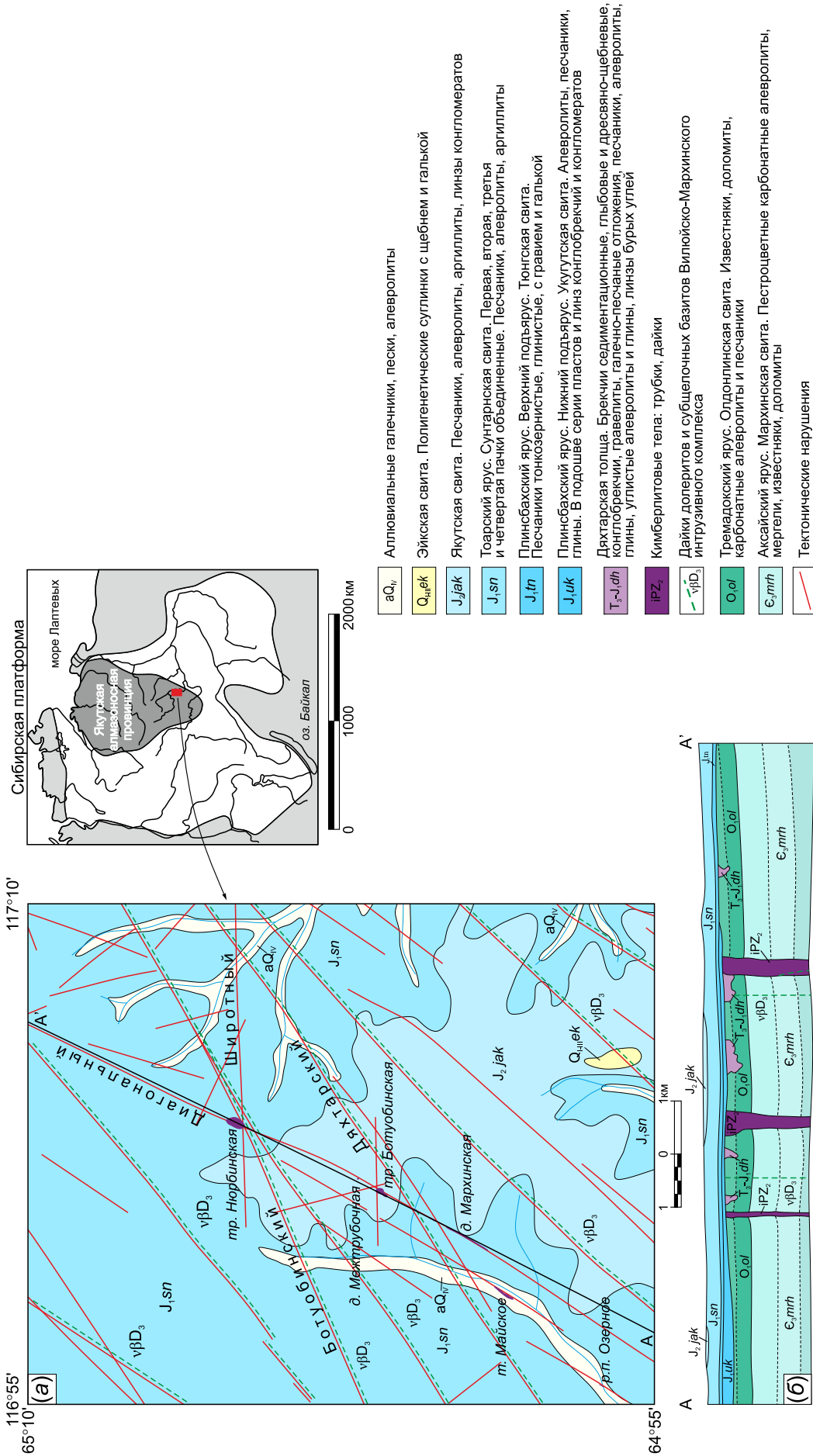
Магматические образования представлены собственно кимберлитовым телом трубки, а также парой сближенных даек щелочных базальтоидов Вилюйско-Мархинского интрузивного комплекса, одна из которых (дайка по Ботуобинскому разлому) пространственно сопряжена с телом трубки, а вторая (дайка по Широтному разлому) находится в 235 метрах на юго-восток от первой.

Геологическая ситуация на участке локализации трубки Ботуобинской аналогична таковой для трубки Нюрбинской. Отличительной особенностью является увеличенная до 80 м мощность перекрывающих отложений, а также представленность магматических образований только щелочно-ультраосновной формацией, выраженной собственно кимберлитами трубки. По морфологическим особенностям трубка Ботуобинская представляет собой сложное сдвоенное тело, переходное от дайки к типичной трубке. Его юго-западная часть выражена дайкообразным интрузивом, совмещенным с наклонной диатремой, а северо-восточная имеет форму типичной трубки, которая сформирована краевой постройкой.

Возраст формирования рассматриваемых трубок, определенный многочисленными радиологическими исследованиями, изменяется в широких пределах – от 332 до 449 млн лет, но по преобладающим датировкам может быть оценен в 360–370 млн лет [Agashev et al., 2001].

## 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Базовым понятием структурно-вещественного моделирования является структурно-вещественный комплекс (СВК). Под СВК понимается «...совокупность сложенных определенными видами осадочных и вулканогенных формаций, возникших в пределах какой-либо территории на одном и том же этапе ее развития и в сходной тектонической обстановке, связанных между собой единством структур-



**Рис. 1.** (a) – фрагмент геологической карты Накынского кимберлитового поля (по рабочим материалам Ботубобинской геологоразведочной экспедиции АК «АЛРОСА» (ПАО)); (б) – геологический разрез по линии А-А'. На врезке – местоположение района исследований. Возраст даек Вилюйско-Мархинского интрузивного комплекса 340–376 млн лет [Polyansky et al., 2017].

**Fig. 1.** (a) – fragment of the geological map of the Nakyn kimberlite field (based on the data of the Botubobinskaya Geological Exploration Expedition of AK ALROSA (PJSC). (b) – geological cross-section along the A-A' line. Inset – location of the study area. The age of dikes in the Vilyui-Markha intrusive complex is 340–376 Ma [Polyansky et al., 2017].

ного плана и условий формирования» [Petrov, 2012]. Применительно к месторождениям алмазов в СВК системно входят: осадочные толщи, вмещающие и перекрывающие кимберлитовые тела; разрывные нарушения, отвечающие за структурный контроль магматизма, морфологию рудных тел, а также распределение различных фаз кимберлита в их пределах; магматические комплексы, представленные собственно кимберлитовыми телами и в некоторых случаях пространственно сопряженными с ними интрузивами, чаще базальтового состава.

Создание структурно-вещественной модели кимберлитового месторождения подразумевает под собой выявление особенностей каждого из представленных элементов СВК и рассмотрение их как производных единой системы. При этом данная модель должна быть визуализирована в трехмерной среде, поскольку именно объемное представление позволяет учитывать максимальное количество специфических черт и характеристик каждого из входящих в нее элементов. В связи с этим для решения поставленных целевых задач нами использовалось каркасное моделирование, реализованное в программе AutoCad.

Выявление особенностей вещественного строения трубок Нюрбинской и Ботуобинской осуществлялось с использованием результатов изучения минералого-петрографических свойств трубки Нюрбинской Д.А. Кошкаревым с коллегами, отраженных в работе [Gladkov et al., 2016], а также посредством анализа известных данных об особенностях геологического строения месторождений [Tomshin et al., 1998; Bolanov, Safyannikov, 2000; Kolganov et al., 2013; Kostrovitsky et al., 2015; Koshkarev et al., 2015; Kilizhekov, 2017]. В исследованиях цитируемых авторов распределение различных магматических фаз кимберлитов в объеме трубки устанавливалось методом прямого минералого-петрографического картирования и на основе изучения кернового материала разведочных скважин. По результатам исследований на погоризонтных планах выделены границы распространения генераций кимберлита, слагающих изучаемые трубки. Эти данные стали фактологической основой для разработки объемных моделей вещественных комплексов изучаемых месторождений.

Решение задач, связанных с определением структурной позиции и особенностей разломно-блокового строения рассматриваемых объектов, осуществлялось посредством применения тектонофизических методов. Реализация этих методов заключалась в создании на участке исследования равномерной сети точек, в каждой из которых выполнялся единообразный комплекс структурно-геологических наблюдений, направленный на сбор информации об основных параметрах тектонической трещи-

новатости, ее количественных характеристиках, локальных разрывных нарушениях, пликтивных дислокациях и др. При этом точки наблюдения должны быть приблизительно равномерно удалены друг от друга не только по латерали, но и по вертикали, что позволяет получать структурную информацию о некотором объеме изучаемого массива, которая в дальнейшем может быть обработана с использованием возможностей трехмерного моделирования. Схема производства наблюдений подробно изложена в работах [Seminsky, 1994; Gladkov et al., 2008]. Здесь лишь укажем, что для целей объемного моделирования привязка локальных разрывных нарушений производилась с помощью электронного тахеометра Leica TS 02 plus, что позволило учитывать вариации пространственно-морфологических характеристик разломов при построении объемных моделей разломно-блокового строения.

Определение кинематики перемещения по разрывам осуществлялось путем восстановления полей напряжения с применением известных методических приемов [Gzovsky, 1975; Nikolayev, 1992]. Для их реализации в пределах карьера Нюрбинского была создана сеть точек наблюдения, в которых выполнен массовый замер трещин. Точки располагались в области развития перекрывающих и вмещающих отложений, а также в дайках базальтоидов.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 4.1. РАЗРАБОТКА ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЕЩЕСТВЕННОГО СТРОЕНИЯ ТРУБОК

Представления о вещественном составе трубок Нюрбинской и Ботуобинской основываются на эксплутационных и тематических исследованиях, проводимых на месторождениях с начальных этапов их промышленной отработки. За этот период предложен ряд моделей строения трубок, в которых выделяется от двух до пяти генераций кимберлита в трубке Нюрбинской [Tomshin et al., 1998; Bogatkov et al., 2004; Sablukov et al., 2010] и до трех генераций в трубке Ботуобинской [Bolanov, Safyannikov, 2000; Kolganov et al., 2013; Kostrovitsky et al., 2015]. Согласно последним исследованиям, базирующимся на результатах минералого-петрографического картирования, а также учитывающим результаты анализа распределения алмаза в объеме трубок, выделены четыре магматических фазы кимберлитов в трубке Нюрбинской и три фазы в трубке Ботуобинской [Koshkarev et al., 2015; Gladkov et al., 2016]. На примере многофазных трубок Комсомольской и Юбилейной было показано, что анализ распределения алмаза позволяет весьма уверенно выделять границы распространения различных генераций кимберлита

[Koshkarev et al., 2010; Egorov et al., 2015]. Подобный подход был использован нами для разработки моделей вещественного строения трубок.

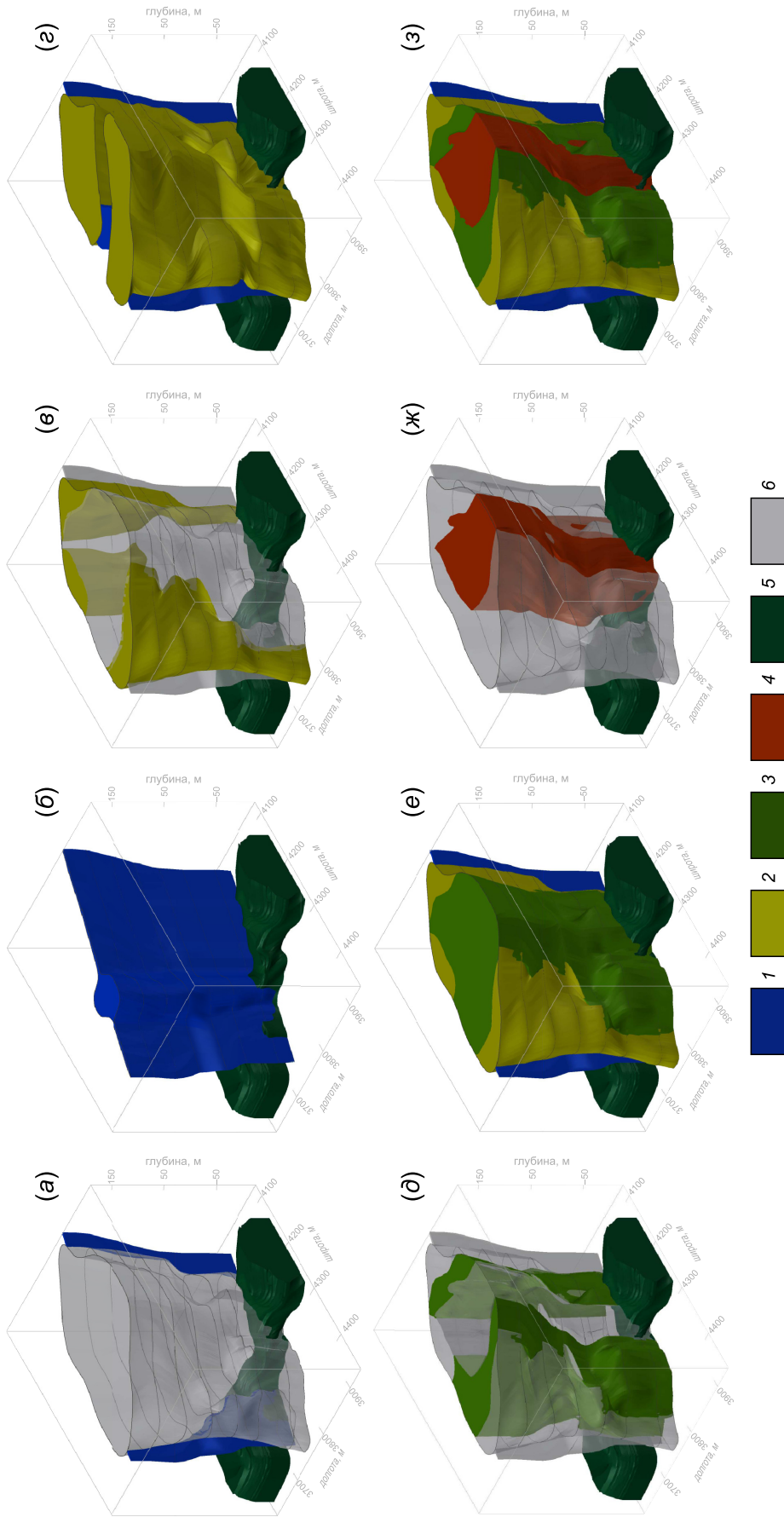
Самая ранняя магматическая фаза в современных контурах трубок представлена слюдистым порфиловым кимберлитом (ПК), локализованным в виде маломощных даек, распространенных в зоне экзоконтакта по северной и южной границе трубок. Последние имеют север-северо-восточную ориентировку по длинной оси трубок и прослежены скважинами на расстояние 25–120 м от контактов с вмещающей толщей [Kilizhekov, 2017]. Первичная форма залегания ПК, существовавшая на момент их внедрения, установлена путем определения распространенности обломков и автолитов первой фазы в областях развития более поздних генераций кимберлита. Выявлено, что рассматриваемая разновидность кимберлита образует в пределах современных контуров рудных тел шлейф обломков, автолитов и останцов, вытянутый в субмеридиональном направлении и пространственно коррелирующийся с положением упомянутых ранее даек. Шлейф образован в результате разрушения первичного реликтового тела ПК внедрением последующих порций расплава. Анализ особенности распределения обломков и автолитов первой магматической фазы, а также пространственного положения сохранившихся даек ПК позволил восстановить границы первых фаз кимберлита на момент внедрения и отобразить их в трехмерном виде (рис. 2, б; рис. 3, б).

Вторая магматическая фаза, представленная эруптивной кимберлитовой брекчией (ЭКБ), состоит на 40–60 % из ксенолитов осадочных пород и на 20 % из обломков порфиловых кимберлитов. Фрагменты тел брекчии в современных контурах трубки Нюрбинской сохранились лишь в приконтактовых частях на юго-восточном и северо-западном фланге (см. рис. 2, в). Анализ их пространственного положения показывает, что на втором магматическом этапе были сформированы два разобщенных тела, вытянутых в северо-восточном направлении и располагавшихся в северо-западной и юго-восточной части современного контура трубки (см. рис. 2, г). Внедрение ЭКБ привело к частичному разрушению дайкового тела первой фазы, что находит отражение в присутствии достаточно большого количества обломков ПК, в пределах областей развития второй магматической фазы. В трубке Ботубинской ЭКБ слагает кратерную постройку на ее северо-восточном фланге (рис. 3, в). Ксенолиты эруптивной брекчии в пределах основной массы ПК и автолитовой кимберлитовой брекчии (АКБ) имеют локальное распространение. Единичные обломки ЭКБ различных размеров обнаружены под кратерной постройкой на северо-восточном фланге

трубки вблизи зоны контакта с вмещающими отложениями. Их наличие, а также приведенные ранее данные о взаимоотношении ПК и ЭКБ позволяют предположить, что наблюдаемая в современном срезе кратерная постройка является останцом крупного субвертикального эруптивного аппарата, который был сформирован после становления дайки ПК. Его модель приведена на рисунке 3, г.

Породы третьей магматической фазы представлены автолитовой кимберлитовой брекчией (АКБ1), в составе которой отмечаются обломки ПК, осадочных пород и, реже, ксенолиты образований фундамента – гранулитов, кристаллических сланцев, гнейсов. Кимберлиты третьей фазы внедрения в трубке Нюрбинской слагают юго-восточный и северный рудные столбы (см. рис. 2, д). Установленные границы распространения пород третьей магматической фазы в пределах современного контура трубки, а также результаты изучения вариаций содержания и размеров обломков АКБ в более поздних генерациях кимберлита позволили наметить контуры и определить морфологические особенности первичной формы залегания автолитовых кимберлитов, что отражено в ее объемной модели (см. рис. 2, е). По конфигурации это вытянутое в субмеридиональном направлении тело, занимавшее на момент внедрения большую часть предельного контура трубки. В трубке Ботубинской АКБ является продуктом завершающего магматического этапа, в течение которого был окончательно сформирован современный контур рудного тела. Породы этой фазы внедрения слагают значительную часть наклонной диатремы (рис. 3, д, е). В ее пределах АКБ образует два рудных столба, разделенных штокообразным телом ПК.

Завершающая четвертая фаза внедрения в трубке Нюрбинской также сложена автолитовой брекчией (АКБ2), которая отличается от третьей фазы (АКБ1) аномальным содержанием мантийных и коровых включений (до 20–25 % от общего объема). АКБ2 четвертой фазы образуют центральный рудный столб, представляющий собой неправильное по форме тело (см. рис. 2 ж, з). Оно было инъецировано в центральную часть тела АКБ1 третьей фазы, частично дезинтегрируя породы последней. Между выделенными телами отсутствуют инъекционные контакты, а также наблюдаются постепенные переходы с образованием зон гибридных пород. Их формирование может быть вызвано внедрением более поздних порций кимберлита в еще не полностью консолидированный расплав предшествующих фаз. Подобные типы контактов возникают благодаря высокому интродуцирующему потенциалу и высокой проникающей способности отдельных фаз, что особенно характерно для автолитосодержащих разновидностей [Kostrovitsky et al., 2015].

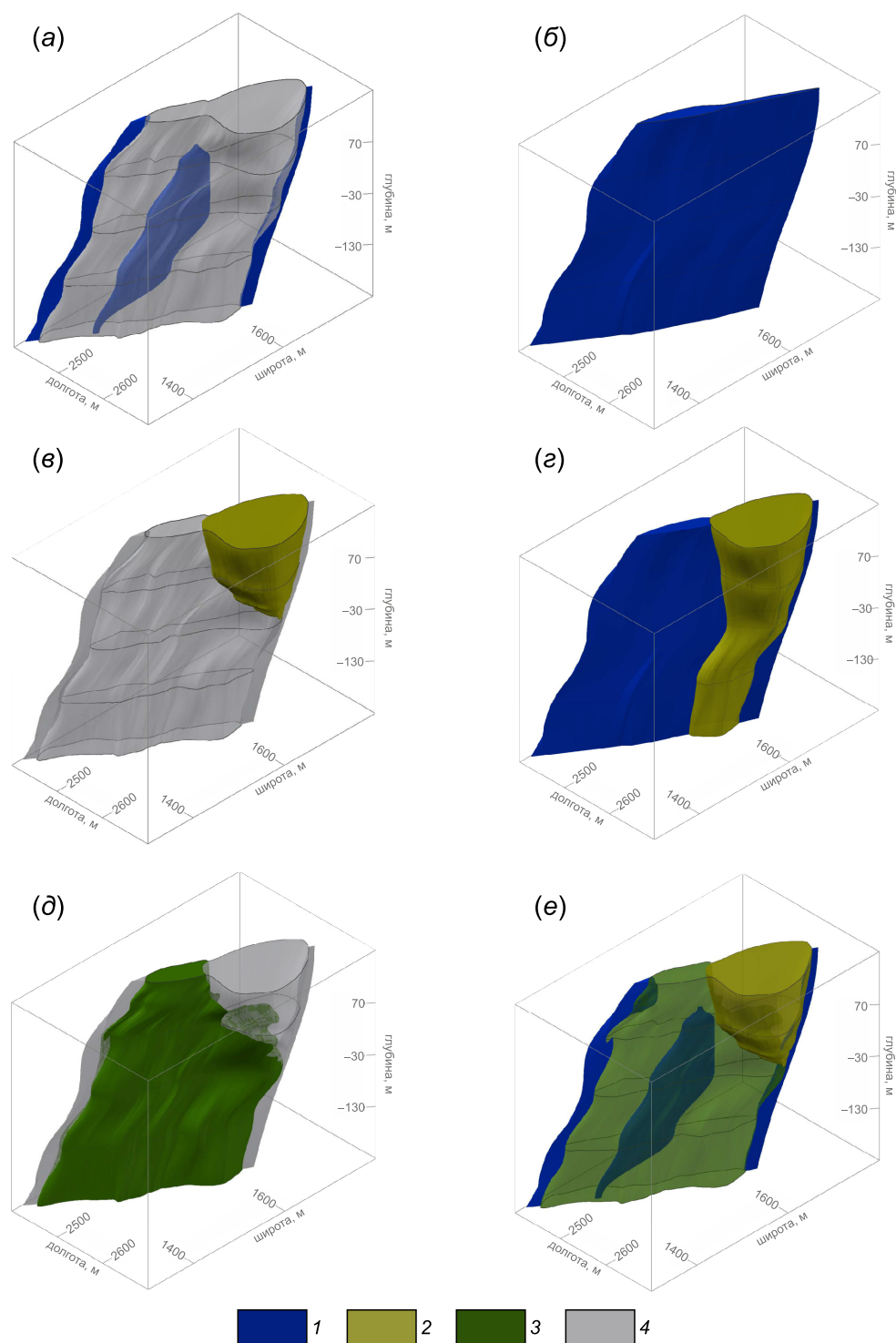


**Рис. 2.** Объемные модели вещественных комплексов, слагающих трубку Нюрбинскую: (а), (б), (в), (г), (д), (е), (ж), (з) – модели геологических тел в современном срезе, сложенных соответственно первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) фазой внедрения; (д), (е), (ж), (з) – реконструированные модели геологических тел, сложенных соответственно первой (б), второй (в), третьей (г) и четвертой (з) фазой внедрения.

1 – порфировый кимберлит первой фазы; 2 – эруптивная кимберлитовая брекчия второй фазы; 3 – аутолитовая кимберлитовая брекчия третьей фазы; 4 – аутолитовая кимберлитовая брекчия четвертой фазы, обогащенная коровыми и мантийными включениями; 5 – дайка долеритов по Ботубинскому разлому; 6 – современный контур трубки. Вид на модели с юго-востока.

**Fig. 2.** 3D models of the material complexes comprising the Nyurbinskaya pipe: (a), (б), (в), (г), (д), (е), (ж), (з) – models of the geological bodies in the modern cross-section in accordance with the intrusion phases: (a) – phase 1, (б) – phase 2, (в) – phase 3, (г) – phase 4; (д), (е), (ж), (з) – reconstructed models of the geologic bodies in accordance with the intrusion phases: (б) – phase 1, (в) – phase 2, (г) – phase 3, (з) – phase 4.

1 – porphyritic kimberlite (phase 1); 2 – eruptive kimberlite breccia (phase 2); 3 – autolithic kimberlite breccia (phase 3); 4 – autolithic kimberlite breccia (phase 4), rich in crustal and mantle inclusions; 5 – dolerite dike along the Botubinskaya fault; 6 – current contour of the pipe. View from the southeast.



**Рис. 3.** Объемные модели вещественных комплексов, слагающих трубку Ботуобинскую: (а), (в), (д) – модели геологических тел в современном срезе, сложенных соответственно первой (а), второй (в) и третьей (д) фазой внедрения; (б), (з), (е) – реконструированные модели геологических тел, сложенных соответственно первой (б), второй (з) и третьей (е) фазой внедрения.

1 – порфировый кимберлит первой фазы; 2 – эруптивная кимберлитовая брекчия второй фазы; 3 – автолитовая кимберлитовая брекчия третьей фазы; 4 – современный контур трубки. Вид на модели с юго-востока.

**Fig. 3.** 3D models of the material complexes comprising the Botuobinskaya pipe: (а), (в), (д) – models of the geological bodies in the modern cross-section in accordance with the intrusion phases: (а) – phase 1, (в) – phase 2, (д) – phase 3; (б), (з), (е) – reconstructed models of the geologic bodies in accordance with the intrusion phases: (б) – phase 1, (з) – phase 2, (е) – phase 3.

1 – porphyritic kimberlite (phase 1); 2 – eruptive kimberlite breccia (phase 2); 3 – autolithitic kimberlite breccia (phase 3); 4 – current contour of the pipe. View from the southeast.



Таким образом, по результатам анализа данных о минералого-петрографических особенностях и алмазности различных генераций кимберлита были разработаны объемные модели вещественных комплексов трубок Нюрбинской и Ботуобинской как для современных контуров кимберлитовых фаз (см. рис. 2, б, г, е, з; рис. 3, б, г, е), так и для момента их внедрения (см. рис. 2, а, в, д, ж; рис. 3, а, в, д). Построенные на цифровой основе данные модели отражают наиболее реальную пространственную форму выделенных комплексов, для которых установлены специфические морфологические особенности.

#### 4.2. РАЗРАБОТКА ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗЛОМНО-БЛОКОВОГО СТРОЕНИЯ УЧАСТКОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ТРУБОК НЮРБИНСКОЙ И БОТУОБИНСКОЙ

Детальные геолого-структурные исследования разломов, образующих кимберлитовмещающий узел трубки Нюрбинской, к числу которых относятся Диагональный, Ботуобинский и Широтный разломы (см. рис. 1) [Gladkov et al., 2016], позволили откартировать элементы их внутренней структуры, определить азимуты и углы падения нарушений, установить их мощность. Для отрисовки и определения точной пространственной позиции зон разломов нами проведен комплекс тахеометрических наблюдений. Подобные исследования (за исключением тахеометрической съемки) для зоны Диагонального разлома были выполнены также в карьере трубки Ботуобинской.

При определении пространственной позиции разломных зон, а также при выявлении в тектонической структуре участка нарушений более локального характера применялся комплексный анализ данных о распределении в породном массиве разномасштабных тектонических элементов (трещины, крупные сколы, зоны разломов). В качестве опорных точек при построении использовались выходы разломных зон, зафиксированные в бортах карьеров. Для участков, на которых в силу объективных причин визуальных выходов зон нарушений обнаружено не было, разломные зоны выделялись путем анализа схем распределения показателя густоты трещинной сети  $G_i$ , отражающего наиболее многочисленные и контрастно проявленные системы трещин, которые, согласно [Sherman, Dneprovsky, 1989], субпараллельны простиранию магистрального сместителя (рис. 4, а, б).

В процессе анализа выделялись цепочки выходов, которые при схожих элементах залегания характеризуются системой пространственно принадлежащих одной плоскости. При этом максимальный вес придавался плоскости с наибольшим показателем  $G_i$ . Эта плоскость в наших построениях при-

нималась в качестве осевой для отдельно взятого нарушения. Мощность зоны разлома, выделенного путем анализа систем трещин, определялась по средней мощности всех входящих в осевую плоскость систем.

Проверка корректности построений осуществлялась путем сравнения схемы с моделью распределения параметра  $N$  (количество трещин на  $1 \text{ м}^2$ ) (рис. 4, в, г). В случае сопоставления линии предполагаемого разрыва с линейным максимумом плотности на модели делался вывод о правомерности выделения разлома, в противном случае предполагаемые разломы не включались в итоговую модель.

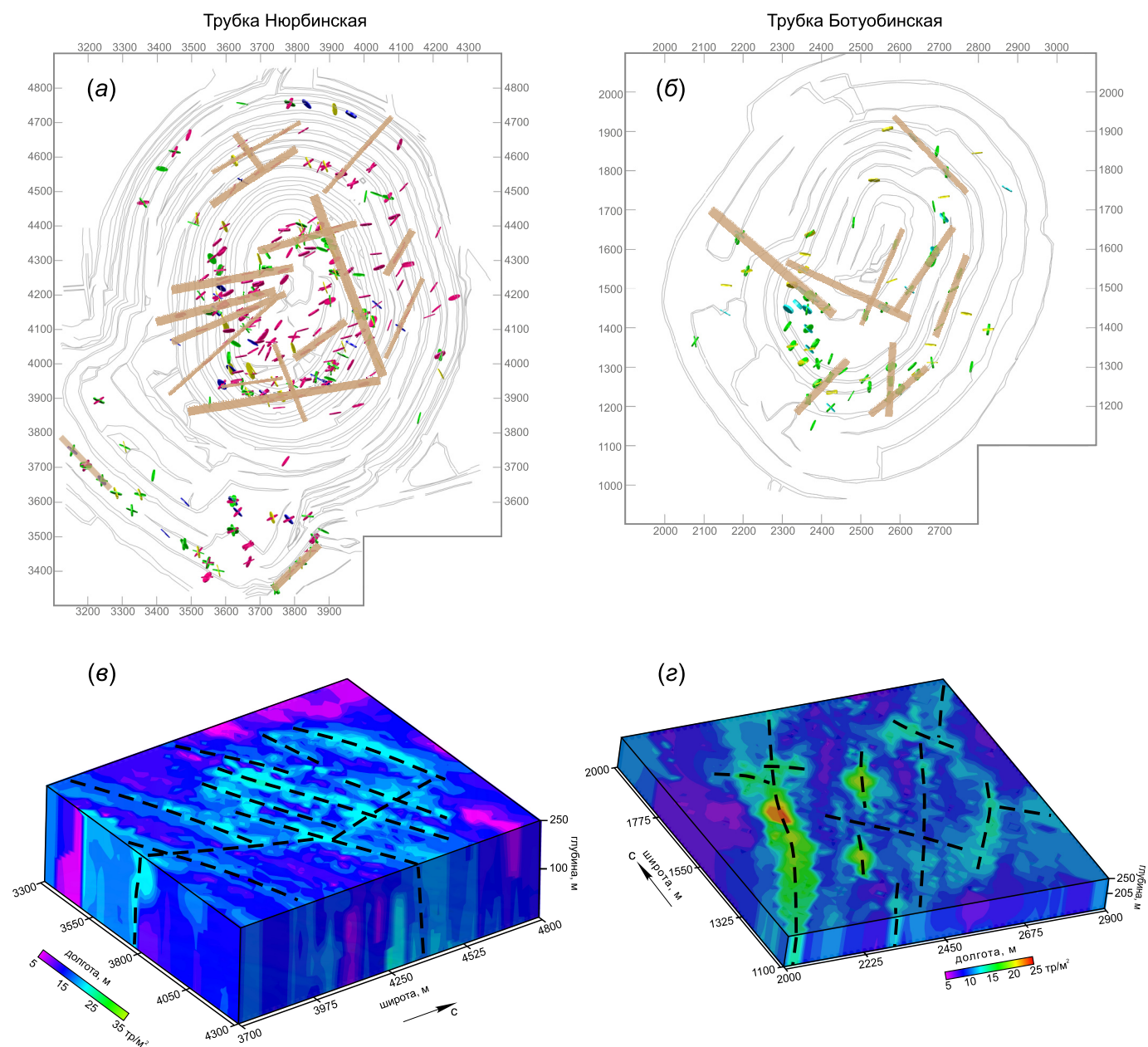
Выполненный таким образом комплексный анализ данных о тектонических элементах, распространенных в пределах карьерных полей трубок Нюрбинской и Ботуобинской, позволил создать модели разломно-блокового строения участков их локализации (рис. 5). Стоит отметить, что в них не включены наклонные разломные зоны, поскольку они проявлены локально и их вклад в общую разломную структуру минимален.

Полученные модели свидетельствуют о том, что разломные структуры месторождений определяются сочетанием субвертикальных и субгоризонтальных дизъюнктивов. Первые представлены серией разрывных нарушений четырех основных направлений: северо-восточного (Ботуобинский разлом), север-северо-восточного (Диагональный разлом), восток-северо-восточного (Широтный разлом) и северо-западного. Разрывы первых трех направлений выделены как непосредственно при документировании стенок карьера в виде зон повышенной трещиноватости и дробления, так и при анализе схем и моделей распределения количественных параметров трещиноватости. На схемах они представлены либо цепочками трассируемых наиболее проявленных систем трещин, либо вытянутыми линейными максимумами распределения показателя  $N$ .

## 5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

### 5.1. МЕХАНИЗМЫ И УСЛОВИЯ ВНЕДРЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ

Весь ансамбль разрывных структур, развитых в пределах кимберлитовых полей и участвующих в формировании кимберлитовых трубок, принято разделять на рудоконтролирующие, рудоподводящие и рудовмещающие. Первые обеспечивают возможность подъема расплава от магматических камер к приповерхностным горизонтам, создавая каналы повышенной проницаемости. С учетом мантийного происхождения алмаза, транспортером которого являются кимберлиты, глубинность рудо-



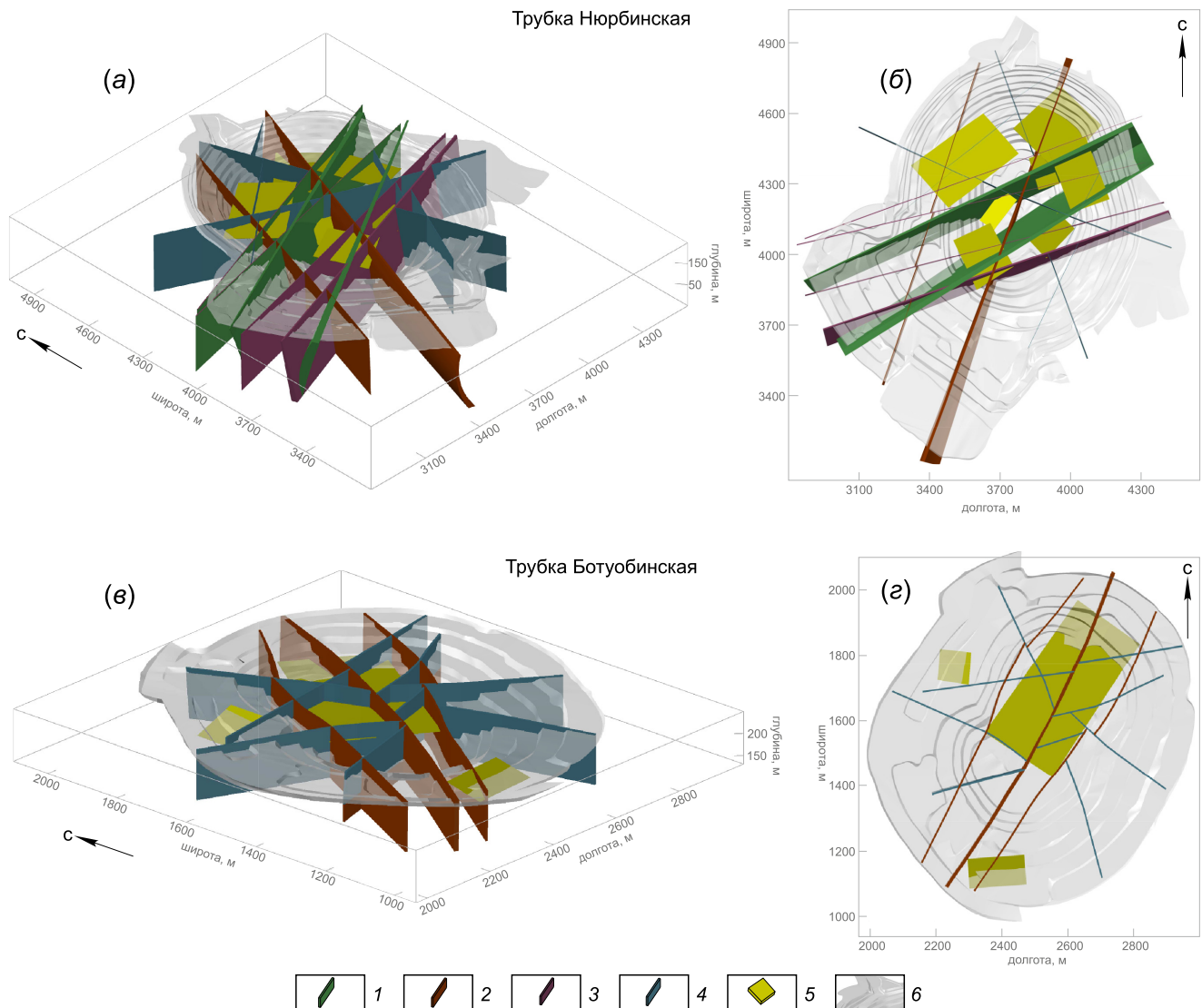
**Рис. 4.** Результаты анализа параметрических показателей тектонической трещиноватости: (а), (б) – схемы распределения основных систем трещин (разноцветные трехмерные диски, ширина которых пропорциональна показателю  $\Gamma_i$  в масштабе схемы), зафиксированных в точках наблюдения на различных горизонтах карьеров Нюрбинского и Ботуобинского, соответственно. Бежевыми прямоугольниками показаны линейные зоны наиболее густых систем трещин; (в), (г) – трехмерные модели распределения параметра плотности трещин ( $N$ ). Пунктирными линиями обозначены осевые зоны аномалий плотности трещин.

**Fig. 4.** Parametric indicators of tectonic fracturing: analysis results: (а), (б) – distribution patterns of the main systems of fractures (multi-coloured 3D disks, proportional in width to index  $\Gamma_i$  in the scale of the scheme) at observation points on different horizons of the Nyurba and Botuoba quarries, respectively. Beige-coloured rectangles – linear zones of the densest systems of fractures; (в), (г) – 3D models showing the distribution of fracture density ( $N$ ). Dashed lines – axial zones of the fracture density anomalies.

контролирующих разломов должна быть достаточной для проникновения в подкоровую область. Следовательно, такие разрывы можно считать корово-мантийными. В их строении наблюдается вертикальная структурная зональность (рис. 6), выз-

ванная различиями в реологических свойствах субстрата на больших глубинах и в приповерхностных горизонтах [Sherman, 1977].

По мере продвижения вверх по разрезу происходит уменьшение литостатического давления, тем-



**Рис. 5.** Трехмерные модели разломно-блокового строения участков локализации трубок Нюрбинской и Ботуобинской.

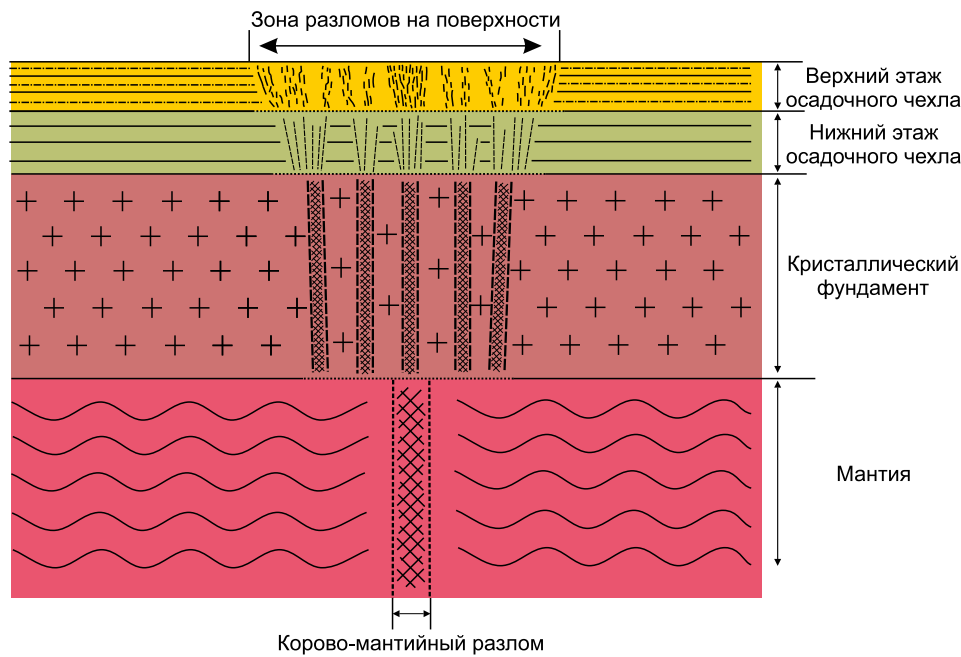
1 – дислокации Ботуобинского разлома; 2 – дислокации Диагонального разлома; 3 – дислокации Широтного разлома; 4 – локальные разломные зоны; 5 – пологие разломные зоны; 6 – контур карьеров Нюрбинского и Ботуобинского. (а), (в) – вид на модели с юго-запада; (б), (з) – вид на модели сверху.

**Fig. 5.** 3D models of the fault-block structures on the sites of the Nyurbinskaya and Botuobinskaya pipes.

1 – Botuobinskaya fault; 2 – Diagonal fault; 3 – Shirotny (Latitudinal) Fault; 4 – local fault zones; 5 – gently dipping fault zones; 6 – contours of the Nyurba and Botuoba quarries. (a), (v) – view from the southwest; (b), (z) – top view.

пературы, изменение гетерогенности среды, что приводит к смене преобладающих условий разрушения с пластических на хрупкие. В результате наблюдается постепенное усложнение строения корово-мантийного разлома, расщепление на серию более мелких составляющих, которые в породах фундамента выражены серией сближенных глубинных разломов. В пределах платформенного чехла над зонами глубинных разломов наблюдается серия локальных разломов, разломных зон, участков повышенной трещиноватости, а также пликативных форм, являющихся их поверхностным отражением.

Движения по глубинным разломам, разделяющим крупные блоки, провоцируют в осадочном чехле активизацию древних дизъюнктивов либо формирование новых парагенезов разрывов. Те из них, которые в период магматической активизации обладают повышенной проницаемостью, становятся рудовмещающими для кимберлитовых тел. Подобные разрывы выступают не только как транспортеры кимберлитового расплава от магмоподводящих каналов, но и как области формирования диатрем. При этом местом внедрения трубки является не весь разлом, а его сегменты, образующие структуры



**Рис. 6.** Схема вертикальной зональности глубинного разлома.

**Fig. 6.** Schematic vertical zoning of the deep-seated fault.

локального (активного) растяжения [Gladkov et al., 2008, 2016; Egorov et al., 2015; Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016]. С учетом тесной связи проявлений кимберлитового магматизма со сдвигами выделяется четыре типа подобных структур [Ignatov et al., 2008]: 1) пулл-апараты (pull-apart structure), в которых локализованы трубки Айхал, Мир, Юбилейная и Нюрбинская; 2) зоны дуплексов (аккомодации), в которых предположительно находятся дайки Ботуобинского и Мархинского месторождений, а также тело Майское; 3) узлы пересечения двусторонних сдвигов, к которым приурочена дайка «Д-96», а также Мархинское месторождение; 4) участки образования трубообразных (тубулярных) каналов фильтрации, где располагается трубка Нюрбинская. Они представляют собой потенциальные «ловушки» для кимберлитовой магмы, образование которых зависит от главенствующего поля тектонических напряжений и его ориентировки по отношению к разрывным структурам, что определяет кинематику последних.

Как известно, помимо тектонических на условия внедрения кимберлитов оказывают влияние магматические факторы, связанные с его «взрывным» характером. Под «взрывом» подразумевается создание в магматической камере избыточного давления, обеспечивающего мгновенный по геологическим меркам подъем расплава к местам разгрузки. При этом, согласно фреатомагматической гипотезе, основным агентом, обеспечивающим высокую скорость перемещения магматической колонны,

является сжатый и раскаленный газ [Milashev, 1984]. Он «прочистает» подводящий канал, образованный деструктивными формами, постепенно трансформируя его в трубообразный. Затем происходит заполнение проработанного канала кимберлитовым расплавом.

Для многофазных трубок механизм формирования второй и последующих фаз имеет особенности, зависящие от степени консолидации пород ранней фазы внедрения на момент начала формирования более поздней. Так, при полном застывании первой порции расплава кимберлит утрачивает пластические свойства, а канал, выполненный телом первой фазы внедрения, представляет собой то ослабленное направление, по которому легче всего происходит разрядка напряжений [Wolfson, Yakovlev, 1975]. Повышенная проницаемость канала обуславливается формированием во внедрившемся теле вторичных парагенезисов трещин, а также образованием в области эндоконтакта трещин термической контракции. В этом случае наиболее благоприятными для внедрения оказываются участки, расположенные на контакте кимберлитового тела с вмещающими отложениями. В результате сформированное на данном этапе тело кимберлита в значительных объемах будет содержать в себе ксеногенный материал как вмещающих пород, так и пород более ранней фазы.

При высокой интенсивности процессов интрузивного магматизма с незначительными временными промежутками в формировании порций рас-

плава более ранние фазы внедрения не успевают полностью консолидироваться. Из-за низкой теплопроводности кимберлитов [Ignatkin et al., 1989] центральные части тел остаются более горячими и менее вязкими по сравнению с краевыми областями. Внедрение более поздней фазы происходит в условиях растяжения именно по центральной части кимберлитового тела, представляющей зону разуплотнения. В результате образуется структура «трубка в трубке», которая близка по своим параметрам к формирующимся в срединно-океанических хребтах структурам типа «дайка в дайке» [Yeremenko, 2003]. При этом между внедрившимися телами будут развиты зоны смешанных гибридных пород, а содержание ксенолитов вмещающих пород в породах более поздней фазы будет минимальным.

Таким образом, внедрение кимберлитового тела обусловлено комплексным взаимодействием тектонических и магматических факторов, обладающих тесной парагенетической связью. Первые создают первичные каналы проницаемости, обеспечивающие возможность подъема магмы с глубин ее генерирования, а последние приводят в движение кимберлитовый расплав, создавая условия избыточного давления, который по подводящим каналам проникает на участки локализации. Результатирующей их кооперативного взаимодействия являются кимберлитовые месторождения, обладающие специфическими особенностями структурно-вещественного строения, обусловленными степенью проявленности выделенных факторов.

## 5.2. РАЗРАБОТКА ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТРУБОК

### 5.2.1. Трубка Нюрбинская

Для кимберлитовой трубки Нюрбинской рудоуправляющей структурой является Ботуобинский разлом, имеющий глубинное происхождение и длительный период развития, что выражено в наличии в его пределах дайки долеритов, сопряженной с телом трубки (см. рис. 2) [Kondratiev, Gorev, 2005; Kilizhekov, 2017]. С учетом более раннего возраста формирования дайки долеритов напрашивается вывод, что кимберлитовая магма наследовала пути движения базитов, являющихся индикаторами открытой флюидопроницаемой зоны [Tomshin et al., 2004]. Следовательно, к началу процесса кимберлитообразования в земной коре существовала магмоподводящая структура, по которой происходила доставка порций кимберлитового расплава от глубинного источника к платформенному чехлу.

Далее, в пределах осадочного чехла, продвижение магмы осуществлялось по рудовмещающему

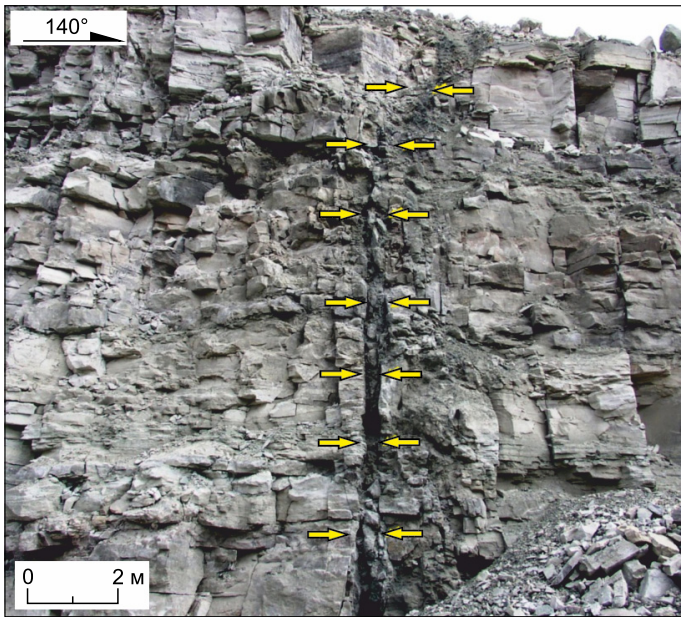
разрыву, в качестве которого для трубки Нюрбинской выступает Диагональный разлом [Kondratiev, Gorev, 2005]. В приповерхностных условиях активизированные сегменты указанного нарушения совместно с другими разрывами сформировали структуру растяжения, в которую была внедрена трубка.

Подавляющее большинство полученных по результатам анализа диаграмм трещиноватости решений отвечают сдвиговому полю напряжений (27 из 40 решений). На роза-диаграммах простирающей осей сжатия ( $\sigma_3$ ) и растяжения ( $\sigma_1$ ) выделены два ярко выраженных сдвиговых этапа: один из них характеризуется северо-западной ориентировкой оси  $\sigma_1$  и северо-восточной – оси  $\sigma_3$ , а другой – север-северо-западной ориентировкой оси  $\sigma_1$  и восток-северо-восточной  $\sigma_3$ . С первым из них мы связываем формирование кимберлитовой трубки Нюрбинской, что подтверждается результатами анализа кинематических данных и физического моделирования [Gladkov et al., 2016]. В его пределах цитируемыми авторами выделено четыре подэтапа, соответствующих четырем фазам внедрения кимберлита. На протяжении первых трех сохранялось поле напряжений с ориентировкой осей  $\sigma_1$  в северо-западном направлении и осей  $\sigma_3$  в северо-восточном, а на последнем главенствующее поле изменилось до обратного.

Принимая во внимание данные о том, что диатрема трубки образована в результате последовательного внедрения четырех фаз магмы в знакопеременном поле напряжений, можно предположить наличие для каждого тектономагматического этапа собственной локальной «ловушки». Для выявления подобных структур проведен анализ пространственно-морфологических параметров реконструированных моделей вещественного строения трубки (см. рис. 2) и их расположения по отношению к закартированным дизъюнктивам (см. рис. 5, а, б).

Согласно разработанной вещественной модели, на первом этапе было сформировано дайковое тело ПК, которое внедрилось в зоне влияния Диагонального нарушения, о чем свидетельствует их пространственная сопряженность и наличие сохранившихся даек ПК (рис. 7).

С учетом действующего на тот момент времени поля напряжений с северо-восточной ориентировкой осей сжатия и северо-западной – растяжения [Gladkov et al., 2016], при котором по разрывам субширотной ориентировки (Широтный разлом) существовали левосдвиговые, а по разрывам субмеридиональной ориентировки (Диагональный разлом) – правосдвиговые перемещения, в сегментах Диагонального нарушения, расположенных между сближенными сместителями Широтного разлома, формировались присдвиговые структуры растяжения (рис. 8, а). В гипабиссальной области подобные



**Рис. 7.** Дайка порфировых кимберлитов первой фазы внедрения (желтые стрелки), расположенная в зоне Диагонального разлома (фото А.С. Гладкова).

**Fig. 7.** Dike of porphyritic kimberlite (intrusion phase 1) in the Diagonal fault zone (photo by A.S. Gladkov). The dike is marked by yellow arrows.

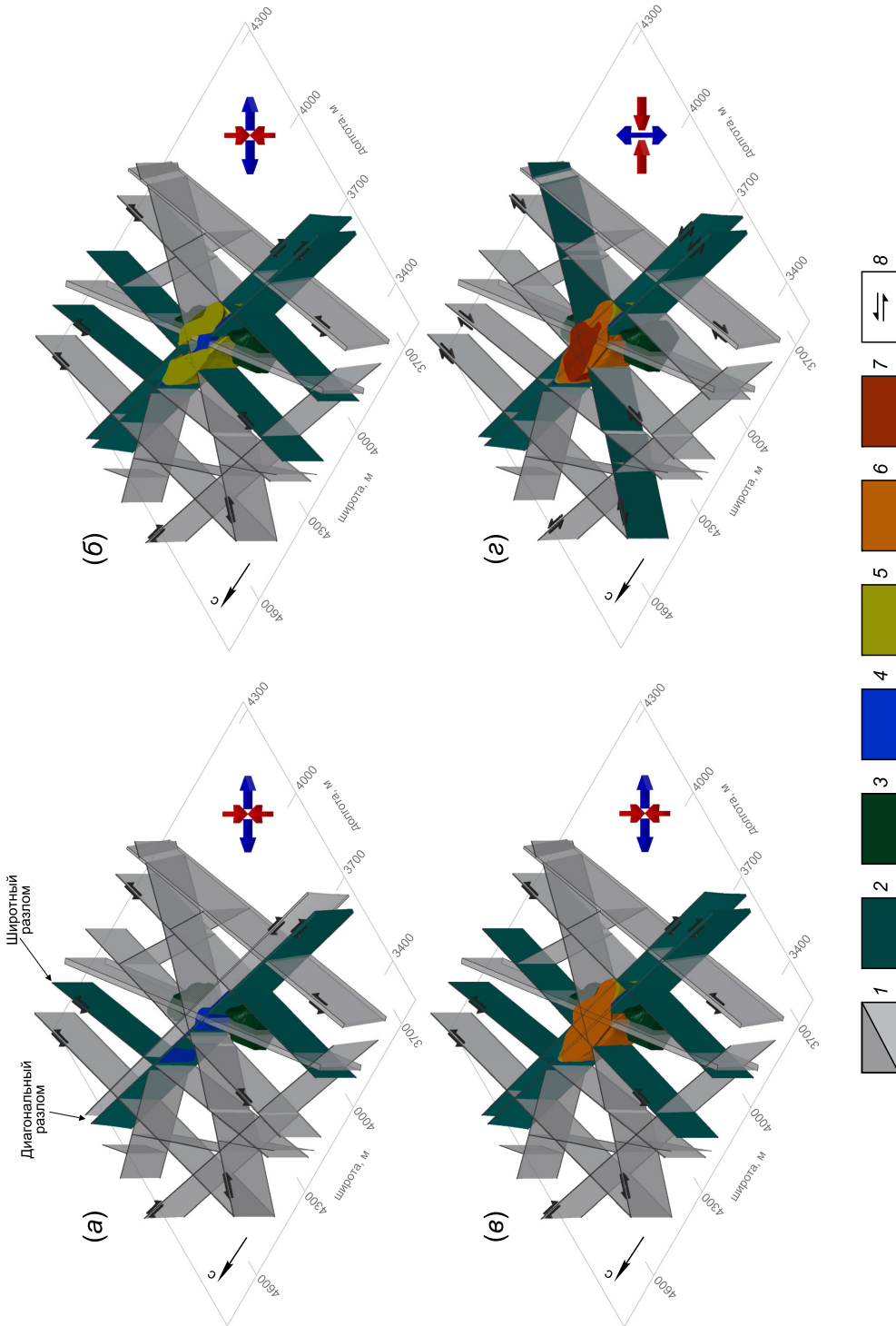
структуры образуются путем «растаскивания» блоков аналогично рифтовому растяжению [Tevelev, Grokhovskaya, 1995]. В результате возникают области разуплотнения и пониженных давлений, которые могут стать местом локализации расплава. Согласно вышеописанному, в пределах рассматриваемого участка были сформированы несколько подобных структур растяжения, потенциально благоприятных для внедрения кимберлитов первой фазы. Но, как показало сопоставление моделей, действительное внедрение произошло только в одной из них, расположенной в зоне влияния Ботубинского разлома. В пределах зон, в которых происходит наложение рудовмещающих и рудоконтролирующих структур, создаются условия резко повышенной проницаемости, что, по всей видимости, предопределило место локализации первой фазы трубки. От него в обе стороны по осевой линии Диагонального разлома развиты дайки ПК. Следует отметить, что ранее, с помощью моделирования на оптически анизотропных материалах, подобные структуры растяжения были установлены на участке локализации трубки Мир, расположенной в Мало-Ботубинском районе [Chernykh et al., 2014]. В ходе экспериментов локальные пулл-апараты возникали в областях сопряжения разрывов северо-западного и субмеридионального направления, угловое соотношение между которы-

ми схоже с таковым для структурообразующих разломов в трубке Нюрбинской и составляет 35–45°.

На втором этапе при сохраняющемся поле напряжений продолжились левосдвиговые смещения по Широкому и правосдвиговые смещения по Диагональному разлому и произошло внедрение эруптивной кимберлитовой брекчии второй фазы. Согласно вещественной модели (см. рис. 2, з), ЭКБ слагала два разобщенных тела, овально-вытянутых в плане по направлению, совпадающему с простиранием зоны Диагонального разлома. Сохранившийся режим присдвигового растяжения привел к формированию «фантомной» зоны разуплотнения, образованной путем наложения и объединения сближенных сопряженных структур растяжения, в одной из которых была локализована первая фаза (рис. 8, б). При внедрении ЭКБ в пределах этой зоны происходило обтекание вещества вдоль геологических границ тела ПК с частичным дроблением зоны эндоконтакта, что обусловило достаточно большое (до 20 %) содержание ксенолитов ПК в пределах сохранившихся тел эруптивной брекчии.

Третий этап ознаменовался внедрением штока АКБ, превосходящего по объему суммарное количество внедрившегося материала за первые два этапа (см. рис. 2, е). Его внедрение происходило в пределах тех же структур локального растяжения, образованных в результате право- и левосдвиговых перемещений соответственно по Диагональному и Широкому разломам. Вероятной причиной этого могут быть интенсивные взрывные процессы, сопровождавшие подъем расплава. Автолитовые разновидности кимберлита содержат в большом количестве раскаленные газовой-флюидные компоненты [Kostrovitsky, 1976], которые оказывают термодинамическое воздействие на стенки канала, что приводит к их интенсивному разрушению и формированию полостей, заполняющихся кимберлитовым расплавом (рис. 8, в). Предложенный механизм внедрения третьей фазы объясняет не только значительные размеры сформированного тела, но и аномальное содержание в его пределах продуктов разрушения первых двух фаз, которое достигает 60 % его объема.

Четвертый этап активизации характеризовался сменой регионального поля напряжений, при котором силы растяжения были ориентированы в северо-восточном направлении, а силы сжатия – в северо-западном, что вызвало изменения в кинематике движения по разрывам. В итоге на заключительном этапе формирования трубки разгрузка напряжения осуществлялась путем сдвиговых перемещений по разрывам субмеридиональной и северо-западной ориентировки, образующим Х-образное узловое сочленение (рис. 8, з). В результате подвижек как по левым, так и по правым сдвигам на участке



**Рис. 8.** Трехмерная структурно-вещественная модель формирования кимберлитовой трубки Ньюринской: (а), (б), (е), (з) – первый, второй, третий и четвертый этап тектономагматической активизации, соответственно.

1 – неактивизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушений, формирующие структуру растяжения; 3 – дайка по Ботубинскому разлому; 4 – кимберлитовое тело первой магматической фазы (ПК); 5 – кимберлитовое тело второй магматической фазы (ЭКБ); 6 – кимберлитовое тело третьей магматической фазы (АКБ); 7 – кимберлитовое тело четвертой магматической фазы (АКБ); 8 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

**Fig. 8.** 3D structural-material model showing the formation of the Nyurbinskaya kimberlite pipe: (a), (b), (e), (z) – tectonomagmatic activity phases 1, 2, 3 and 4, respectively.

1 – inactive fault segments; 2 – faults segments comprising the extension structure; 3 – dike along the Botubinskaya fault; 4 – kimberlitic body of magmatic phase 1 (autolithic kimberlite breccia, ACB); 5 – kimberlitic body of magmatic phase 2 (eruptive kimberlite breccia); 6 – kimberlitic body of magmatic phase 3 (ACB); 7 – kimberlitic body of magmatic phase 4 (ACB); 8 – movement directions of fault wings. Arrows – dominant stress field.

сопряжения разрывов произошло образование области растяжения, занимающей центральную часть тела АКБ третьего этапа. Это позволяет предположить, что внедрение четвертой порции расплава происходило по каналу, выполненному еще не раскристаллизованным веществом, что подтверждается наличием между выделенными телами контактовых зон, выполненных гибридными породами.

### 5.2.2. Трубка Ботуобинская

С учетом сопоставимого возраста образования трубок Нюрбинской и Ботуобинской, а также их пространственной близости и приуроченности к общей рудовмещающей структуре предполагается, что активизация разрывной сети и внедрение кимберлита происходили в едином поле тектонических напряжений.

Рудоконтролирующей структурой для трубки Ботуобинской является Дяhtarский разлом [Kondratiev, Gorev, 2005; Kilizhekov, 2017], от которого трубка находится приблизительно в 500 м. Это является существенным отличием от ранее рассмотренной трубки Нюрбинской, для которой установлена прямая корреляция с рудоконтролирующим Ботуобинским разрывом. Существование подобного нарушения обеспечило возможность подъема кимберлитовой расплава с глубин его формирования в гипабиссальную зону, где движение расплава продолжалось по рудовмещающему Диагональному разлому, в пределах которого сформировались структуры локального растяжения.

Согласно разработанной вещественной модели на первом магматическом этапе произошло внедрение дайки ПК (см. рис. 3, б). Как и в трубке Нюрбинской, она пространственно тяготеет к Диагональному разлому и выполняет его осевую зону. Сильно вытянутая форма тела ПК отвечает жерлу трещинного типа, характерному для начальных стадий формирования диатрем [Milashev, 1984]. Наиболее мощная часть дайки ограничена сегментами разрывов восток-северо-восточной ориентировки, что позволяет предположить, что внедрение первой фазы происходило именно в этой области в структуре присдвигового растяжения, аналогичной той, что была сформирована на первом этапе в трубке Нюрбинской (рис. 9, а). Далее происходило растекание слабвязкого расплава ПК и заполнение открытых полостей Диагонального разлома.

В ходе дальнейшей активизации разломного узла в сохраняющемся поле напряжений за счет взаимодействия сегментов нарушений север-северо-восточной (правый сдвиг), восток-северо-восточной (левый сдвиг) и северо-западной (правый сдвиг) ориентировки на северо-восточном фланге области развития порфировых кимберлитов сфор-

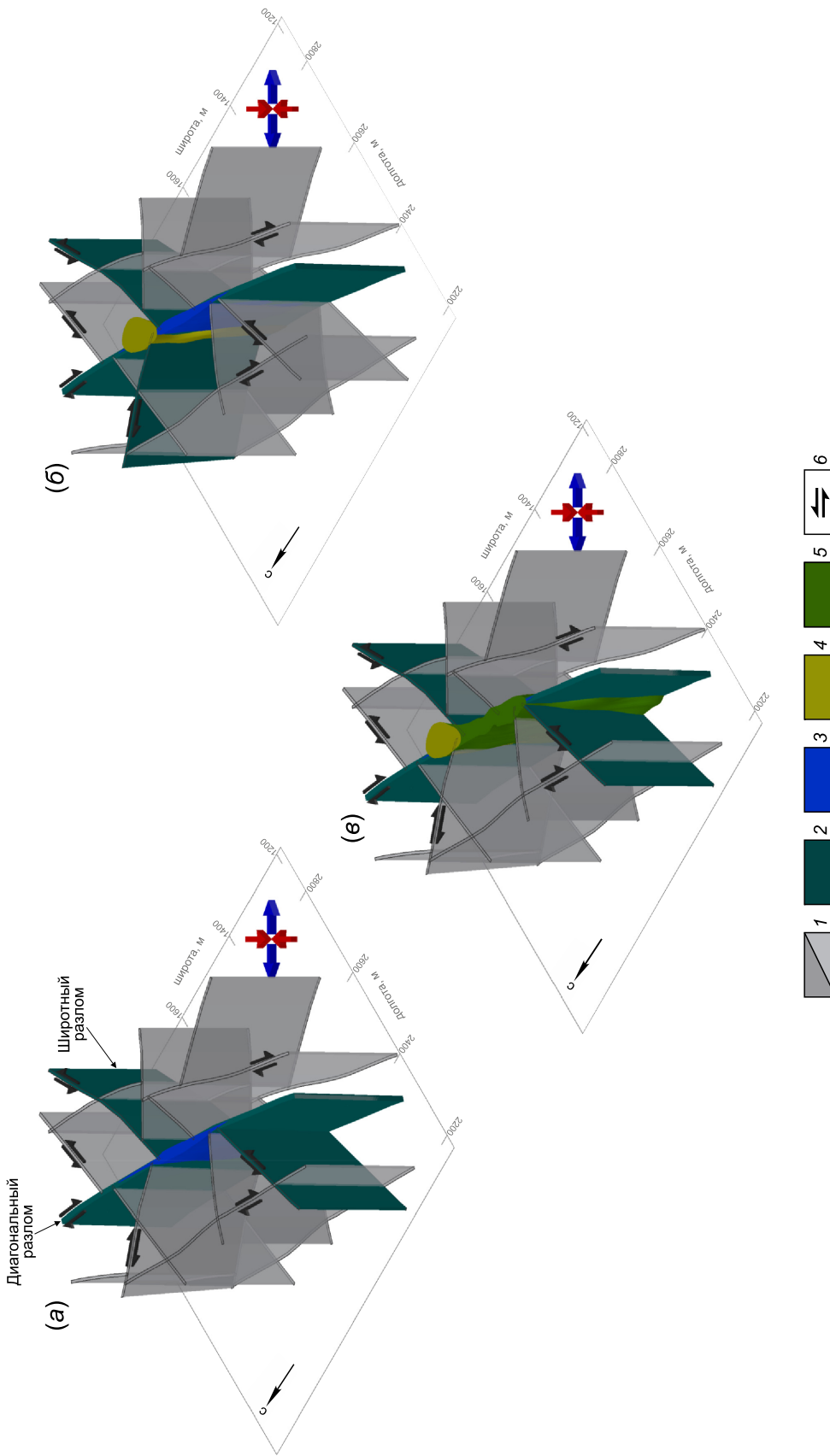
мировался участок локального растяжения, в пределах которого происходили взрывные процессы, приведшие к брекчированию и диспергации ПК, а также к образованию трубообразной полости, которая была заполнена продуктами второй фазы внедрения (рис. 9, б).

Наконец, на завершающем, третьем, магматическом этапе было сформировано тело АКБ, которое по морфологии представляет собой дайку, вытянутую по осевой линии Диагонального разлома (см. рис. 3, д, е). По простирацию дайка ограничена теми же сегментами разрывов восток-северо-восточной ориентировки, что и дайка ПК первой фазы внедрения, что позволяет сделать вывод о единстве вмещающей структуры первого и заключительного этапов (рис. 9, в). Механизм внедрения АКБ был аналогичен механизму образования пород первой фазы, за исключением того, что на этапе формирования третьей фазы деструкции подверглись в равной мере вмещающие породы, дайка ПК и тело АКБ. Это проявилось в присутствии в пределах интрузии АКБ большого количества разноразмерных ксенолитов указанных вещественных комплексов. Самый крупный из таких ксенолитов располагается в центральной части тела АКБ и представляет собой останец дайки ПК первой фазы внедрения (см. рис. 3, а).

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оба изученных кимберлитовых тела локализованы в пределах разломных узлов, имеющих схожее строение. Для трубки Нюрбинской узел включает в себя разрывные нарушения север-северо-восточной (Диагональный разлом), восток-северо-восточной (Широтный разлом), северо-восточной (Ботуобинский разлом) и северо-западной ориентировки (см. рис. 5, а, б). Разломы первых трех направлений по протяженности отвечают региональному уровню, а последнего – локальному уровню согласно ранговой шкале дизъюнктивных структур. Для трубки Ботуобинской выделены те же основные направления развития разрывных структур, но из них региональному уровню отвечают только дизъюнктивы север-северо-восточного направления, являющиеся продолжением Диагонального разлома. Как известно, более протяженные разрывы обладают большей глубиной активного проникновения, амплитудой смещения, зоной динамического влияния [Sherman, 1977]. Следовательно, разломы регионального и более высоких рангов и в еще большей степени узлы их пересечения образуют высокопроницаемые для флюидов зоны, что может являться одной из причин формирования в их пределах наиболее крупных по размеру кимберлитовых тел. Данный вывод справедлив по отношению к изученным объектам,



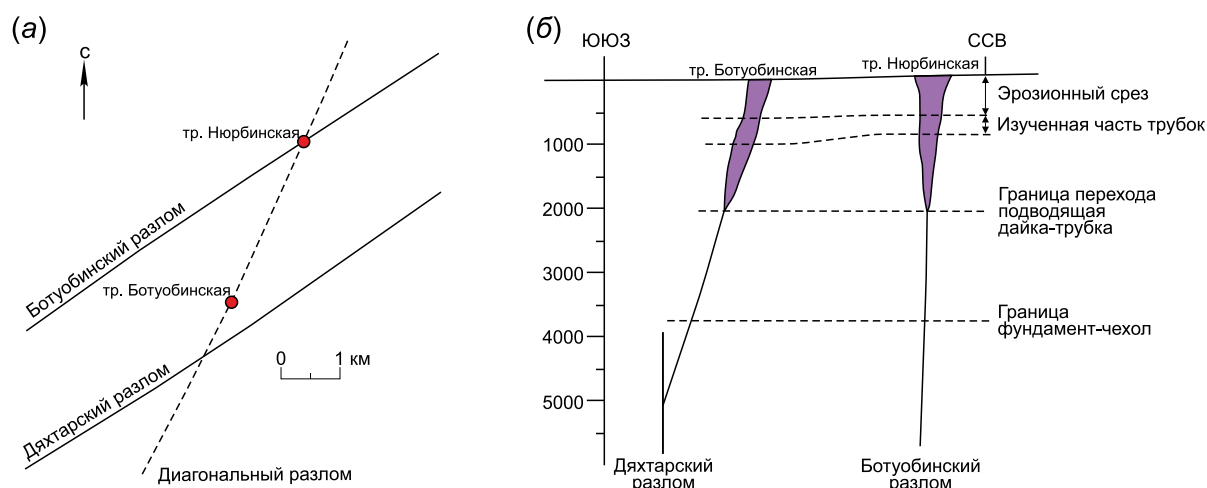


**Рис. 9.** Трехмерная структурно-вещественная модель формирования кимберлитовой трубки Ботуобинской: (а), (б), (в) – первый, второй и третий этап тектономагматической активизации, соответственно.

1 – неактивизированные сегменты разрывных нарушений; 2 – сегменты нарушенных, формирующие рудовмещающую структуру; 3 – кимберлитовое тело первой магматической фазы (ПК); 4 – кимберлитовое тело второй магматической фазы (ЭКБ); 5 – кимберлитовое тело третьей магматической фазы (АКБ); 6 – направление перемещения крыльев разломов. Стрелками показано главенствующее поле напряжений.

**Fig. 9.** 3D structural-material model showing the formation of the Botuobinskaya kimberlite pipe: (a), (b), (c) – tectonomagmatic activity phases 1, 2 and 3, respectively.

1 – inactive fault segments; 2 – faults segments comprising the ore-bearing structure; 3 – kimberlitic body of magmatic phase 1 (porphyric kimberlite); 4 – kimberlitic body of magmatic phase 2 (eruptive kimberlite breccia); 5 – kimberlitic body of magmatic phase 3 (ACB); 6 – movement directions of fault wings. Arrows – dominant stress field.



**Рис. 10.** План и разрез трубок Ботуобинской и Нюрбинской: (а) – план расположения рудовмещающего и рудоконтролирующих разломов; (б) – схематический разрез по осевой линии Диагонального разлома.

**Fig. 10.** Plan view and cross-section of the Botuobinskaya and Nyurbinskaya pipes: (a) – locations of ore-bearing and ore-controlling faults; (b) – schematic cross-section along the axial line of the Diagonal fault.

для которых устанавливается более чем двукратное превосходство в объеме внедрившегося магматического материала трубки Нюрбинской над трубкой Ботуобинской.

Локализация порций кимберлитового расплава для рассматриваемых трубок происходила в структурах присдвигового растяжения. Выделенные структуры развиты преимущественно в гипабиссальной зоне и отвечают за непосредственную локализацию порций кимберлитового расплава. Его транспортировка от магматических камер к приповерхностным горизонтам происходит по глубинным рудоконтролирующим разломам. Прямая пространственная корреляция рудолокализирующих и рудоконтролирующих структур приводит к созданию весьма благоприятных условий для миграции и локализации расплавов. В таких зонах магма обладает наиболее высокой механической активностью, вызванной постоянной подпиткой от магматической камеры [Korobkov, 2014], что приводит к формированию более крупных месторождений. Подобное наложение структур наблюдается на участке локализации трубки Нюрбинской, для которой рудоподводящим является Ботуобинский разлом (см. рис. 1; рис. 10).

Несколько иная картина формирования получена для трубки Ботуобинской. Структуры, отвечающие за локализацию тела трубки, находятся приблизительно в 500 м от осевой линии рудоконтролирующего Дяктарского разлома (рис. 10, а). При реконструкции формы трубки Ботуобинской с учетом эрозионного среза, глубина которого составляет 650 м [Tarabukin et al., 2003], и известных данных о переходе диатремы к подводящему каналу на

глубинах порядка 2 км [Hawthorne, 1975; Kharkiv et al., 1998] установлено, что рудовмещающий разрыв сопрягается с подводящим каналом на глубине около 5 км от палеоповерхности (рис. 10, б). Перемещение расплава от магматической камеры до этой глубины происходило по Дяктарскому разлому, а далее – по наклонной зоне, что привело к формированию наклонного дайкообразного тела относительно небольшой мощности и размеров.

Приведенные выше факты свидетельствуют о том, что кимберлитовые тела могут внедряться как непосредственно над рудоконтролирующей структурой, так и на небольшом удалении от нее в пределах зоны динамического влияния разрыва. По мере удаления предполагается смена кимберлитовых фаций от трубочной к дайковой и жильной.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе впервые для Якутской алмазонасной провинции реализован комплексный подход к детальному изучению структурной и вещественной позиции коренных месторождений Накынского кимберлитового поля – трубок Нюрбинской и Ботуобинской, позволивший создать трехмерные динамические модели становления кимберлитовых тел. Проведенные исследования показали, что определяющую роль в строении структур, контролируемых кимберлитовыми трубками Накынского поля, играют узловое сочленения разрывов платформенного чехла север-северо-восточного, восток-северо-восточного и северо-западного

направлений. В результате исследования минералогического-петрографических особенностей и специфики алмазности различных генераций кимберлита, слагающих трубки Нюрбинскую и Ботуобинскую, восстановлена морфология и пространственное положение каждого из выделенных комплексов как в современном срезе, так и на этапе внедрения. Комплексный анализ результатов моделирования разрывной структуры и особенностей вещественного строения позволил выявить основные черты структурно-вещественной организации рудоносной системы и определить этапность проявления процессов тектономагматической активизации, приведшей к образованию кимберлитовых трубок, что отражено в структурно-вещественных моделях эталонных объектов Накынского поля. Согласно полученным моделям, локализация отдельных фаз рассматриваемых трубок происходила в пределах единых рудовмещающих структур, коими являются структуры присдвигового растяжения двух типов. Первые представляют собой структуры растяжения, образованные на участках сопряжения Диа-

гонального рудовмещающего разлома север-северо-восточной ориентировки с частными дислокациями зоны разрывных нарушений восток-северо-восточного направления. В них сформированы первые три фазы кимберлитовой трубки Нюрбинской, а также первая и заключительная фазы трубки Ботуобинской. Остальные генерации кимберлита рассматриваемых трубок были внедрены на участках пересечения знакопеременных сдвигов, одним из которых в обоих случаях являлся Диагональный разлом.

Полученные результаты используются при прогнозно-поисковых работах геологоразведочных подразделений АК «АЛРОСА» (ПАО).

## 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Проекта программы фундаментальных исследований «Структурно-вещественная эволюция литосферы Сибирского кратона, магматизм и рудогенез», а также при частичной финансовой поддержке АК «АЛРОСА» (ПАО).

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Agashev A.M., Watanabe T., Bydaev D.A., Pokhilenko N.P., Fomin A.S., Maehara K., Maeda J., 2001. Geochemistry of kimberlites from the Nakyn field, Siberia: evidence for unique source composition. *Geology* 29 (3), 267–270. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0267:GOKFTN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0267:GOKFTN>2.0.CO;2).
- Bogatikov O.A., Kononova V.A., Golubeva Y.Y., Kondrashov I.A., Zinchuk N.N., Rotman A.Y., Ilupin I.P., Levsky L.K., Ovchinnikova G.V., 2004. Variations in chemical and isotopic compositions of the Yakutian kimberlites and their causes. *Geochemistry International* 42 (9), 799–821.
- Bolanev V.S., Safyannikov V.I., 2000. Report on the results of detailed exploration of primary diamond deposits of kimberlite pipes Nyurbinskaya and Botuobinskaya in 1994–2000. Mirniy, 380 p. (in Russian) [Боланев В.С., Сафьянников В.И. Отчет о результатах детальной разведки коренных месторождений алмазов – кимберлитовых трубок Нюрбинская и Ботуобинская в 1994–2000 гг. Мирный, 2000. 380 с.].
- Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Afonkin A.M., Potekhina I.A., Serebryakov E.V., Kuzmin I.V., 2014. Stress-strain state simulation in fault cluster boundaries enclosing Mir kimberlite diamond pipe (Yakutsk diamond-bearing province). *Proceedings of Siberian Department of the Section of Earth Sciences Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits* (1), 35–43 (in Russian) [Черемных А.В., Гладков А.С., Афонкин А.М., Потехина И.А., Серебряков Е.В., Кузьмин И.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестностях разломного узла района кимберлитовой трубки «Мир» (Якутская алмазоносная провинция) // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2014. № 1. С. 35–43].
- Egorov K.N., Koshkarev D.A., Gladkov A.S., 2015. Structural-compositional evolution and diamond content of the multi-phase kimberlite pipe «Komsomolskaya» (Alakit-Markha field, Yakutia). *Otechestvennaya Geologiya (Russian Geology)* (3), 16–23 (in Russian) [Егоров К.Н., Кошкарев Д.А., Гладков А.С. Структурно-вещественная эволюция и алмазность многофазной кимберлитовой трубки «Комсомольская» (Алакит-Мархинское поле, Якутия) // *Отечественная геология*. 2015. № 3. С. 16–23].
- Field M., Stiefenhofer J., Robey J., Kurszlauskis S., 2008. Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: a review. *Ore Geology Reviews* 34 (1–2), 33–75. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.11.002>.
- Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A., 2008. Tectonophysics Studies During Prospecting for Diamonds. Nauchnyi Mir, Moscow, 175 p. (in Russian) [Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазописковых работах. М.: Научный мир, 2008. 175 с.].
- Gladkov A.S., Koshkarev D.A., Cheremnykh A.V., Joao F., Karpenko M.A., Marchuk M.V., Potekhina I.A., 2016. Structural-compositional model of the Nyurbinskaya kimberlite pipe formation (Sredne-Markha area of the Yakutian diamondiferous province). *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (3), 435–458 (in Russian) [Гладков А.С., Кошкарев Д.А., Черемных А.В., Жоао Ф., Карпенко М.А., Марчук М.В., Потехина И.А. Структурно-вещественная модель становления кимберлитовой трубки Нюрбинская (Средне-Мархинский район Якутской алмазоносной про-

- винции) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 3. С. 435–458]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0216>.
- Gzovsky M.V., 1975. Fundamentals of Tectonophysics. Moscow, Nauka, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с].
- Hawthorne J.B., 1975. Model of a kimberlite pipe. *Physics and Chemistry of the Earth* 9, 1–15. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(75\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0079-1946(75)90002-6).
- Ignatkin E.I., Onikienko S.K., Afanaseva M.A., Shishkov A.Yu., 1989. Thermal conductivity of kimberlites. *Izvestiya VUZov. Geologiya i Razvedka (Geology and Exploration)* (2), 145–147 (in Russian) [Игнаткин Е.И., Оникиенко С.К., Афанасьева М.А., Шишков А.Ю. Теплопроводность кимберлитов // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1989. № 2. С. 145–147].
- Ignatov P.A., Bushkov K.Yu., Tolstov A.V., Yuanygin Yu.T., 2008. Mapping of cryptic strike-slip kimberlite-controlling structures in the Nakyn field. In: Problems of prediction and prospecting of diamond deposits within covered territories. Proceedings of Conference dedicated to the 40 anniversary of YaNIGP TsNIGRI AC «ALROSA». Publishing House of Yakutian Scientific Center SB RAS, Yakutsk, p. 325–332 (in Russian) [Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Толстов А.В., Яныгин Ю.Т. Картирование скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур в Накыном поле // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: Материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. С. 325–332].
- Kharkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I., 1998. Primary Diamond Deposits of the World. Nedra, Moscow, 555 p. (in Russian) [Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.].
- Kilizhekov O.K., 2017. Patterns of Localization and Features of the Exploration of Buried Placer Diamonds in the Middle-Markhinsky District (Yakutsk Diamondiferous Province). PhD Thesis. Mirniy, 160 p. (in Russian) [Килижеков О.К. Закономерности локализации и особенности разведки погребенных россыпей алмазов Средне-Мархинского района (Якутская алмазоносная провинция): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Мирный, 2017. 160 с.].
- Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V., 2013. Mining and Geological Features of the Primary Diamond Deposits of Yakutia. Mirniy City Printing House, Mirniy, 568 p. (in Russian) [Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. 568 с.].
- Kondratiev A.A., Gorev N.I., 2005. Tectonic structure and development history of the Sredne-Markha diamond-bearing region of the Western Yakutia. In: Geology of diamond – the present and the future (geologists to the 50-year anniversary of the Mirnyy and the diamond industry in Russia). Voronezh state university, Voronezh, 95–104 (in Russian) [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: Воронежский государственный университет, 2005. С. 95–104].
- Korobkov I.G., 2014. Structural-Tectonic, Lithofacial and Magmatic Factors of Mineragenic Zoning and Local Diamond-Bearing Prediction in the East of the Tunguska Syncline (Yakutsk Diamondiferous Province). PhD Thesis. Tomsk, 370 p. (in Russian) [Коробков И.Г. Структурно-тектонические, литолого-фациальные и магматические факторы минерогенического районирования и локального прогноза алмазоносности на востоке Тунгусской синеклизы (Якутская алмазоносная провинция): Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск, 2014. 370 с.].
- Koshkarev D.A., Egorov K.N., Karpenko M.A., Makovchuk I.V., 2010. The main parameters of diamond-bearing geological and technological types of kimberlite ores of the Yubileynaya pipe, Yakutia. *Rudy i Metally (Ores and metals)* (4), 27–34. (in Russian) [Кошкарев Д.А., Егоров К.Н., Карпенко М.А., Маковчук И.В. Основные параметры алмазоносности геолого-технологических типов кимберлитовых руд трубки Юбилейная, Якутия // *Руды и металлы*. 2010. № 4. С. 27–34].
- Koshkarev D.A., Orlova G.V., Andryushchenko L.G., Karnaushenko M.G., 2015. Report on the results of research work on the topic: «Geological and technological typification of kimberlite ores of the upper horizons of the Botuobinskaya pipe in order to increase the efficiency of their advanced screening in terms of diamond content and sieve characteristics» (the material composition of the different types kimberlites of the Botuobinskaya pipes). Irkutsk, 77 p. (in Russian) [Кошкарев Д.А., Орлова Г.В., Андриященко Л.Г., Карнаушенко М.Г. Отчет о результатах научно-исследовательских работ по теме: «Геолого-технологическая типизация кимберлитовых руд верхних горизонтов трубки «Ботуобинская» с целью повышения эффективности их опережающей разбраковки по уровню алмазоносности и ситовым характеристикам» (вещественный состав разнотипных кимберлитов трубок «Ботуобинская»). Иркутск, 2015. 77 с.].
- Kostrovitsky S.I., 1976. Physical Conditions, Hydraulics and Kinematics Filling Kimberlite Pipes. Nauka, Novosibirsk, 96 p. (in Russian) [Костровицкий С.И. Физические условия, гидравлика и кинематика заполнения кимберлитовых трубок. Новосибирск: Наука, 1976. 96 с.].
- Kostrovitsky S.I., Spetsius Z.V., Yakovlev D.A., Fon der Flaas G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N., 2015. Atlas of Primary Diamond Deposits of the Yakutsk Kimberlite Province. Mirniy City Printing House, Mirniy, 480 p. (in Russian) [Костровицкий С.И., Специс З.В., Яковлев Д.А., Фон-дер-Флаас Г.С., Суворова Л.Ф., Богущ И.Н. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: Мирнинская городская типография, 2015. 480 с.].

- Milashev V.A., 1984. Volcanic Pipes. Nedra, Leningrad, 268 p. (in Russian) [Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.].
- Milashev V.A., 1985. Structural Classification of Kimberlite Fields. Leningrad, Nedra, 167 p. (in Russian) [Милашев В.А. Структурная классификация кимберлитовых полей. Л.: Недра, 1985. 167 с.].
- Nikolayev P.N., 1992. Technique of Tectonodynamic Analysis. Nedra, Moscow, 295 p. (in Russian) [Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.].
- Nowicki T., Crawford B., Dyck D., Carlson J., McElroy R., Oshust P., Helmstaedt H., 2004. The geology of kimberlite pipes of the Ekati property, Northwest Territories, Canada. *Lithos* 76 (1–4), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.020>.
- Pervov V.A., Somov S.V., Korshunov A.V., Dulapchii E.V., Félix J.T., 2011. The Catoca kimberlite pipe, Republic of Angola: A paleovolcanological model. *Geology of Ore Deposits* 53 (4), 295–308. <https://doi.org/10.1134/S1075701511040052>.
- Petrov O.V. (Ed.), 2012. Geological dictionary. In three volumes. Third edition, revised and supplemented. Vol. 3. (R–Ya). VSEGEI, Saint Petersburg, 440 p. (in Russian) [Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, переработанное и дополненное / Ред. О.В. Петров. Т. 3 (Р–Я). СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. 440 с.].
- Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin A.V., Vasiliev D.A., 2017. Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform. *Lithos* 282–283, 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.02.020>.
- Sablukov S.M., Sablukova L.I., Stegnitsky Yu.B., Karpenko M.A., Neustroev R.G., 2010. Kimberlites and basalts with differing age of the Nyurbinskaya pipe (Nakyn field, Yakutia): a portrayal of regional upper mantle evolution from the Riphean to the Carboniferous time, and its geodynamic relationships. In: *Geochemistry of magmatic rocks – 2010. Abstracts of XXVII International Conference School «Geochemistry of Alkaline rocks»*. Moscow – Koktebel, p. 152–153.
- Seminsky K.Zh., 1994. Principles and stages of special mapping of the fault-block structure based on the study of fracture. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 35 (9), 112–130 (in Russian) [Семинский К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // *Геология и геофизика*. 1994. Т. 35. № 9. С. 112–130].
- Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones and Its Capabilities in the Study of the Structural Control of Kimberlites in the Alakit-Markhinsky Field of the Yakut Diamondiferous Province. Publishing House of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 204 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алакит-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.].
- Serebryakov E.V., 2018. Fault Structure of the Primary Diamond Deposits of the Nakyn Kimberley Field (Based on Three-Dimensional Models). PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, 150 p. (in Russian) [Серебряков Е.В. Разрывная структура коренных месторождений алмаза Накынского кимберлитового поля (на основе трехмерных моделей): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 2018. 150 с.].
- Sherman S.I., 1977. Physical Regularities of Faulting in the Earth's Crust. Nauka, Novosibirsk, 102 p. (in Russian) [Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.].
- Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I., 1989. Stress fields of the Earth's Crust and Geological and Structural Methods of its Study. Nauka, Novosibirsk, 157 p. (in Russian) [Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 157 с.].
- Tarabukin V.P., Reimers A.N., Nefedova I.V., 2003. Evaluation of the erosion cut of kimberlite pipes of the Nakyn field. *Otechestvennaya Geologiya (Russian Geology)* (6), 84–85 (in Russian) [Тарабукин В.П., Реймерс А.Н., Неведова И.В. Оценка эрозионного среза кимберлитовых трубок Накынского поля // *Отечественная геология*. 2003. № 6. С. 84–85].
- Tevelev A.V., Grokhovskaya T.L., 1995. Early Proterozoic PGE provinces in the Eastern Baltic shield. In: 5th Zonenshain conference on plate tectonics. GEOMAR, Kiev, p. 95–96.
- Tomshin M.D., Fomin A.S., Kornilova V.P., Chernyi S.D., Yanygin Y.T., 1998. Peculiarities of magmatic formations from the Nakyn kimberlite field of the Yakutian province. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 39 (12), 1693–1703. (in Russian) [Томшин М.Д., Фомин А.С., Корнилова В.П., Черный С.Д., Яныгин Ю.Т. Особенности магматических образований Накынского кимберлитового поля Якутской провинции // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39. № 12. С. 1693–1703].
- Tomshin M.D., Zaitsev A.I., Zemnuhov A.L., Kopylova A.G., 2004. Character formation of mafic rocks in Nakyn kimberlite field Yakutia. *Otechestvennaya Geologiya (Russian Geology)* (5), 44–49 (in Russian) [Томшин М.Д., Зайцев А.И., Земнухов А.Л., Копылова А.Г. Характер становления базитов в Накынском кимберлитовом поле Якутии // *Отечественная геология*. 2004. № 5. С. 44–49].
- Wolfson F.N., Yakovlev P.D., 1975. Structures of Ore Fields and Deposits. Nedra, Moscow, 271 p. (in Russian) [Вольфсон Ф.Н., Яковлев П.Д. Структуры рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1975. 271 с.].

Yeremenko A.V., 2003. On the mechanism of kimberlite diatremes formation in Arkhangelsk diamondiferous province. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology* (1), 160–165 (in Russian) [Еременко А.В. О механизме формирования кимберлитовых диатрем Архангельской алмазоносной провинции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2003. № 1. С. 160–165].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

---

### **Евгений Валерьевич Серебряков**

канд. геол.-мин. наук, м.н.с.

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

✉ e-mail: [serebryakov.e.v@mail.ru](mailto:serebryakov.e.v@mail.ru)

### **Evgenii V. Serebryakov**

Candidate of Geology and Mineralogy, Junior Researcher

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia

### **Андрей Станиславович Гладков**

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.

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

e-mail: [gladkov@crust.irk.ru](mailto:gladkov@crust.irk.ru)

### **Andrey S. Gladkov**

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia

### **Денис Анатольевич Кошкарёв**

канд. геол.-мин. наук, зав. отделом,  
зам. директора по науке

Научно-исследовательское геологоразведочное  
предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)  
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия

e-mail: [KoshkarevDA@alrosa.ru](mailto:KoshkarevDA@alrosa.ru)

### **Denis A. Koshkarev**

Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Department,  
Deputy Director for Science

Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»  
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia