



DYNAMIC PHYSICAL-GEOLOGICAL MODEL OF THE FIELD OF DIAMONDS FROM THE KOMSOMOLSKAYA KIMBERLITE PIPE (ALAKIT-MARKHA FIELD OF WESTERN YAKUTIA)

K.M. Konstantinov ^{1,2}✉, A.S. Gladkov ²

¹ Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

² Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. Petrophysical, tectonophysical and paleomagnetic studies were done on the field of diamonds from the Komsomolskaya kimberlite pipe to interpret the observed gravimagnetic field. As a result of studying the structural-material complexes (SMC) of the field, there was formed a dynamic physical-geological model (DPhGM). The structure of the deposit is a dynamically developing network of faults that control heterochronous igneous complexes (kimberlites and traps). The features of the tectonic structure and physical properties of the SMC of the field were reflected in the nature of the observed gravitational and magnetic fields. DPhGM provides proofs for the existence of geophysical anomalies, genetically related to the structures of diatreme association – anomalies of the structural type.

KEYWORDS: Yakut diamond province; Alakit-Markha field; Komsomolskaya pipe; kimberlites; basites; petrophysics; tectonophysics; paleomagnetism; physical and geological model; structural-type anomaly

FUNDING: The work was done as part of the state assignment of the IEC SB RAS (project 21050400020-9). The studies were carried out using the equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian academy of Sciences (grant no 075-15-2021-682) with support of AC "ALROSA" (PJSC).

RESEARCH ARTICLE

Received: March 11, 2022

Revised: May 15, 2022

Accepted: May 16, 2022

Correspondence: Konstantin M. Konstantinov, konstantinovkm@crust.irk.ru

FOR CITATION: Konstantinov K.M., Gladkov A.S., 2022. Dynamic Physical-Geological Model of the Field of Diamonds from the Komsomolskaya Kimberlite Pipe (Alakit-Markha Field of Western Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0678. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0678

ДИНАМИЧЕСКАЯ ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛМАЗОВ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ КОМСОМОЛЬСКОЙ (АЛАКИТ-МАРХИНСКОЕ ПОЛЕ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ)

К.М. Константинов^{1,2}, А.С. Гладков²

¹ Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

² Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. В пределах месторождения алмазов Комсомольская проведены петрофизические, тектонофизические и палеомагнитные исследования с целью интерпретации наблюдаемого гравимагнитного поля. В результате изучения структурно-вещественных комплексов (СВК) месторождения сформирована динамическая физико-геологическая модель (ДФГМ). Структура месторождения представляет собой динамически развивающуюся сеть разрывных нарушений, которые контролируют разновозрастные магматические комплексы (кимберлиты и траппы). Особенности тектонического строения и физических свойств СВК месторождения отразились на характере наблюдаемых гравитационного и магнитного полей. На основе ДФГМ доказано существование геофизических аномалий, генетически связанных со структурами диатремовой ассоциации, – аномалий структурного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Якутская алмазоносная провинция; Алакит-Мархинское поле; трубка Комсомольская; кимберлиты; базиты; петрофизика; тектонофизика; палеомагнетизм; физико-геологическая модель; аномалия структурного типа

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа проводилась в рамках государственного задания Института земной коры СО РАН (проект № 21050400020-9). Исследования выполнены с использованием оборудования и инфраструктуры Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (грант 075-15-2021-682) при поддержке АК «АЛРОСА» (ПАО).

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство кимберлитовых трубок, которые имели выход на дневную поверхность или отражались контрастными геофизическими аномалиями (например, «трубчатого типа»), уже найдены. Перспективы открытия новых месторождений связываются с закрытыми площадями (2–5-й алмазопромысловые геотипы) [Vladimirov et al., 1984], в пределах которых в геологическом разрезе присутствуют мощные покровы траппов и/или осадочных толщ. В этих условиях существенно снижается эффективность шлихоминералогических и геофизических методов. Необходима разработка дополнительных поисковых критериев и признаков структурно-тектонического контроля кимберлитовых трубок и методики их идентификации в потенциальных геофизических полях. О справедливости такого подхода применительно к поискам коренных месторождений алмазов на территориях, характеризующихся сложными геолого-геофизическими условиями, свидетельствуют окружающие их на флангах трапповые «окна» и «коридоры» [Lelyukh, 1988; Tomshin et al., 2001; Nikulin et al., 2002]. Не исключено, что могут существовать и другие геофизические аномалии, генетически связанные со структурами диатремовой ассоциации, – аномалии структурного типа (АСТ). Одним из путей решения данной проблемы видится постановка специализированных структурно-вещественных исследований

вмещающих и перекрывающих горных пород на известных месторождениях.

В качестве объекта для проведения подобных исследований выбрано месторождение алмазов – кимберлитовая трубка Комсомольская (рис. 1). Целью детального геолого-структурного, петрофизического и палеомагнитного изучения структурно-вещественных комплексов (СВК) месторождения было:

- 1) выявление разломных структур, вмещающих кимберлитовое тело, выяснение закономерностей их внутреннего строения и особенностей активизации на различных этапах развития;
- 2) получение и анализ распределения петрофизических и палеомагнитных данных и установление природы геофизических (гравимагнитных) аномалий;
- 3) формирование динамической физико-геологической модели (ДФГМ) [Vakhromeev, Davydenko, 1987] как основы комплексной интерпретации полученных материалов по установлению сценария геологических процессов, формирующих месторождения алмазов 4 и 5-го геотипа.

2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Далдыно-Алакитский район Западной Якутии, к которому приурочено месторождение алмаза кимберлитовая трубка Комсомольская, находится в области

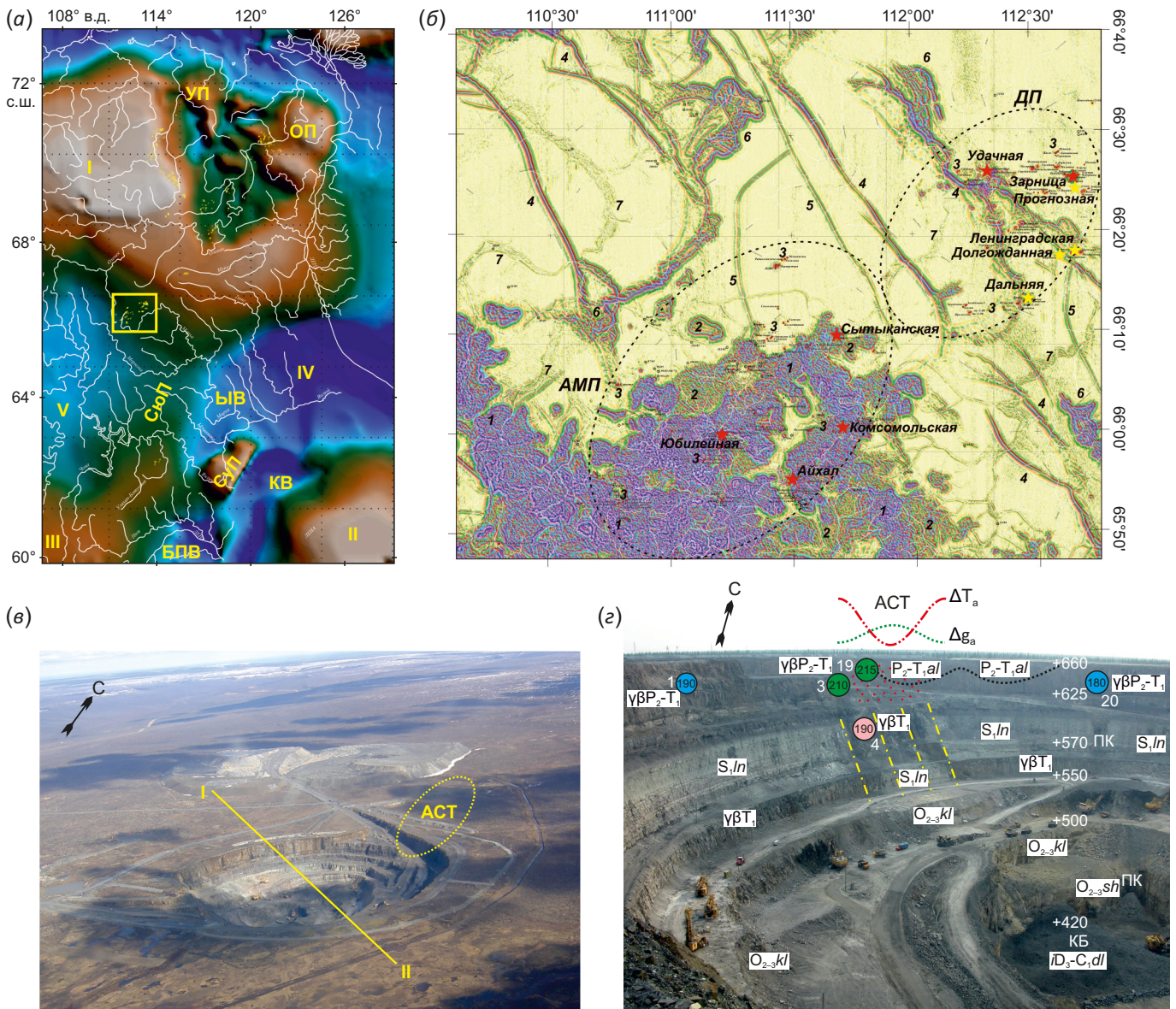


Рис. 1. Район работ.

(а) – положение Далдыно-Алакитского района (прямоугольник) на тектонической схеме восточной части Сибирской платформы. Структуры фундамента Сибирской платформы: первый порядок – антиклизы (I – Анабарская, II – Алданская, III – Непско-Ботуобинская), синеклизы (IV – Вилюйская, V – Тунгусская); второй порядок – поднятия (СуП – Сунтарское, ОП – Оленекское, УП – Уджинское, СюП – Сюгджерское), впадины (БПВ – Байкало-Патомская, КВ – Кемпендяйская, ЫВ – Ыгыаттинская). (б) – положение изученных кимберлитовых тел (красная/желтая звездочка – известные месторождения алмазов/забалансовые руды) на сводной карте локальной составляющей магнитного поля (ΔT)loc. Картирование магматических образований: 1–2 – силлы трапповых интрузий, бронирующих водоразделы; 1 – оленек-велинггинский и катангский интрузивные комплексы (неразделенные), 2 – кузьмовский интрузивный комплекс; 3 – кимберлитовые трубки; 4–5 – положительно и отрицательно намагниченные дайки долеритов Вилюйско-Котуйской зоны разломов (подводящие каналы); 6 – околодайковые секущие и субпластовые интрузии долеритов; 7 – зоны аккумуляции продуктов разрушения трапповых образований в поймах водотоков. АМП и ДП – кимберлитовые поля, соответственно, Алакит-Мархинское и Далдынское. (е) – вид карьера трубки Комсомольской с воздуха. (z) – геологический разрез по линии I–II (см. фрагмент (е)): ПК – порфировые кимберлиты; КБ – кимберлитовые брекчии; красные точки – петромагнитные неоднородности зоны обжига (ПМН-2 типа); желтые штрихпунктирные линии – зона повышенной трещиноватости; Δg_a и ΔT_a – геофизические аномалии, соответственно, гравитационного и магнитного поля; АСТ – аномалия структурного типа и ее контур; арабские цифры – абсолютная отметка горизонта карьера. Другие пояснения см. на рис. 3 и 6.

Fig. 1. Study area.

(а) – position of the Daldyn-Alakitsky region (rectangle) on the tectonic scheme of the eastern part of the Siberian Platform. Basement structures of the Siberian Platform: first-order – anticlines (I – Anabar, II – Aldan, III – Nepa-Botuobinsk), synclises (IV – Vilyui, V – Tunguska); second-order – uplifts (СуП – Suntar, ОП – Olenek, УП – Udzha, СюП – Syugdzhera), depressions (БПВ – Baikal-Patom, КВ – Kempendyay, ЫВ – Ygyattin). (б) – position of the studied kimberlite bodies (red/yellow asterisk stands for known diamond deposits / off-balance ores) on the summary map of the local component of the magnetic field (ΔT)loc. Mapping of igneous formations: 1–2 – sills

of trap-intrusion armor on watersheds: 1 – Olenek-Velingninsky and Katangsky intrusive complexes (non-separated), 2 – Kuzmovsky intrusive complex; 3 – kimberlite pipes; 4–5 – positively and negatively magnetized dolerite dikes of the Vilyui-Kotui fault zone (feeders); 6 – near-dike intersecting and sublayer dolerite intrusions; 7 – zones of accumulation of trappean-formation disintegration products in the floodplains. AMF and DF are kimberlite fields, Alakit-Markhin and Daldyn, respectively. (e) – aerial view of the Komsomolskaya pipe. (z) – geological section along line I-II (see fragment (e)): ПК – porphyritic kimberlites; КБ – kimberlite breccias; red dots are petromagnetic heterogeneities of the sintering zone (PMH-2 type); yellow dash-dotted lines show highly fractured zone; Δg_a and ΔT_a are geophysical anomalies of the gravitational and magnetic fields, respectively; АСТ – structural-type anomaly and its contour; Arabic numerals are the absolute marks of the quarry horizon. See Fig. 3 and Fig. 6 for further explanations.

Таблица 1. Схема развития траппов восточного борта Тунгусской синеклизы [Tomshin et al., 2001]

Table 1. A scheme of trapping in the eastern side of the Tungus syneclyse [Tomshin et al., 2001]

№	Фаза	Фация	Петрографический состав
1	Интрузивная, $\gamma\beta P_2$ (бронирует водоразделы)	Пластовых и секущих интрузий	Долериты, оливиновые долериты, в зонах контакта – толеитовые долериты, микродолериты, в шлирах – габбро-долериты, феррогаббро, гранофиры
		Туфовая	Туфы, ксенотуфы, пизолитовые туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты
		Туффизитовая	Туфы, ксенотуфы, эруптивные брекчии переходных зон
2	Вулканосубвулканическая, $\beta_0-\gamma\beta P_2-T_1$ (интрузирует P_2-C_1 отложения)	Бескорневых вулканов (жерловая)	Микродолериты, атаксивные микродолериты, эруптивные брекчии (кластолавы)
		Пластовых и секущих интрузий	Долериты, оливиновые долериты, в эндоконтактах – толеитовые долериты и микродолериты, часто миндалекаменные, иногда стекловатые разности, в шлирах – габбро-долериты
3	Интрузивная, $\gamma\beta T_1$ (интрузирует породы PZ_1 цоколя)	Пластовых и секущих интрузий	Долериты, микродолериты (эндоконтакт), габбро-долериты трахитоидного облика

Примечание. Первая, вторая и третья фазы соответствуют оленек-велингнинскому, катангскому и кузьмовскому интрузивным комплексам Вилуйской серии листов [State Geological Map..., 2013].

Note. The first, second, and third phases correspond to the Olenek-Velingninsky, Katangsky and Kuzmovsky intrusive complexes of the Vilyui sheet series [State Geological Map..., 2013].

сочленения двух крупных структур Сибирской платформы: Анабарской антеклизы и Тунгусской синеклизы (рис. 1, а). Трубка открыта в 1974 г. геологами Амакинской экспедиции Г.Б. Баландиной, И.Я. Богатых, М.Г. Контаревой, И.В. Лашкевичем, В.И. Стегний, И.К. Сарычевым при проведении поисковых буровых работ по сети 500×500.

Месторождение трубки Комсомольской относится к 5-му поисковому геотипу (рис. 1, б, в) – площади преимущественного развития в верхней части геологического разреза (до 250 м) высокомагнитных изверженных пород. Карбонатные породы олдондинской (C_3-O_1ol), сохолохской ($O_{1,2}sh$), кылахской ($O_{2,3}kl$) свит и ландоверского (S_1ln) яруса (рис. 1, г) служат вмещающей рамой (карбонатный цоколь) для кимберлитов далдино-алакитского интрузивного комплекса среднегопалеозойского возраста (D_3-C_1dl) [Khar'kiv et al., 1998]. По содержанию петрогенных оксидов, таких как FeO_{tot} (7.0–11.5 %) и TiO_2 (2.0–3.2 %), кимберлиты трубки Комсомольской относятся к 3-му петрохимическому типу (магнезиально-железистый, высокотитанистый, низкокалиевый), что согласуется с относительно высоким содержанием ильменита [Kostrovitsky et al., 2007].

Изученное месторождение имеет удлиненную форму с изометрическим расширением примерно в центральной части. Длинная ось ее ориентирована в северо-

восточном направлении по азимуту 65°. Месторождение сложено двумя типами кимберлитов [Egorov et al., 2015]:

- на флангах дайка порфировых кимберлитов (ПК) северо-восточного простирания первой фазы внедрения;

- в центре диатрема кимберлитовых брекчий (КБ) второй и третьей фазы внедрения.

Месторождение перекрывается маломощной (до 3 м) пачкой терригенных отложений карбона айхальской ($C_{2,3}ah$) свиты и траппами, относимыми к двум поздним вулканическим комплексам базитового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы (табл. 1) [Tomshin et al., 2001; State Geological Map..., 2013], суммарной мощностью (над трубкой) около 65 м (рис. 1, г). Силл долеритов ($\gamma\beta P_2-T_1$) катангского интрузивного комплекса и комагматичные ему линзы туфов алакитской свиты (P_2-T_1al) бронируют дневную поверхность, залегая на породах айхальской свиты субгоризонтально. Силл долеритов ($\gamma\beta T_1$) кузьмовского интрузивного комплекса образует уступ при переходе из нижнего горизонта (граница $O_{2,3}kl$ и S_1ln) в верхний (подошва траппов II фазы), срезая тем самым северо-западный блок диатремы с образованием кимберлитового отторженца (рис. 2, г). Особенностью базитов катангского и кузьмовского вулканических комплексов месторождения

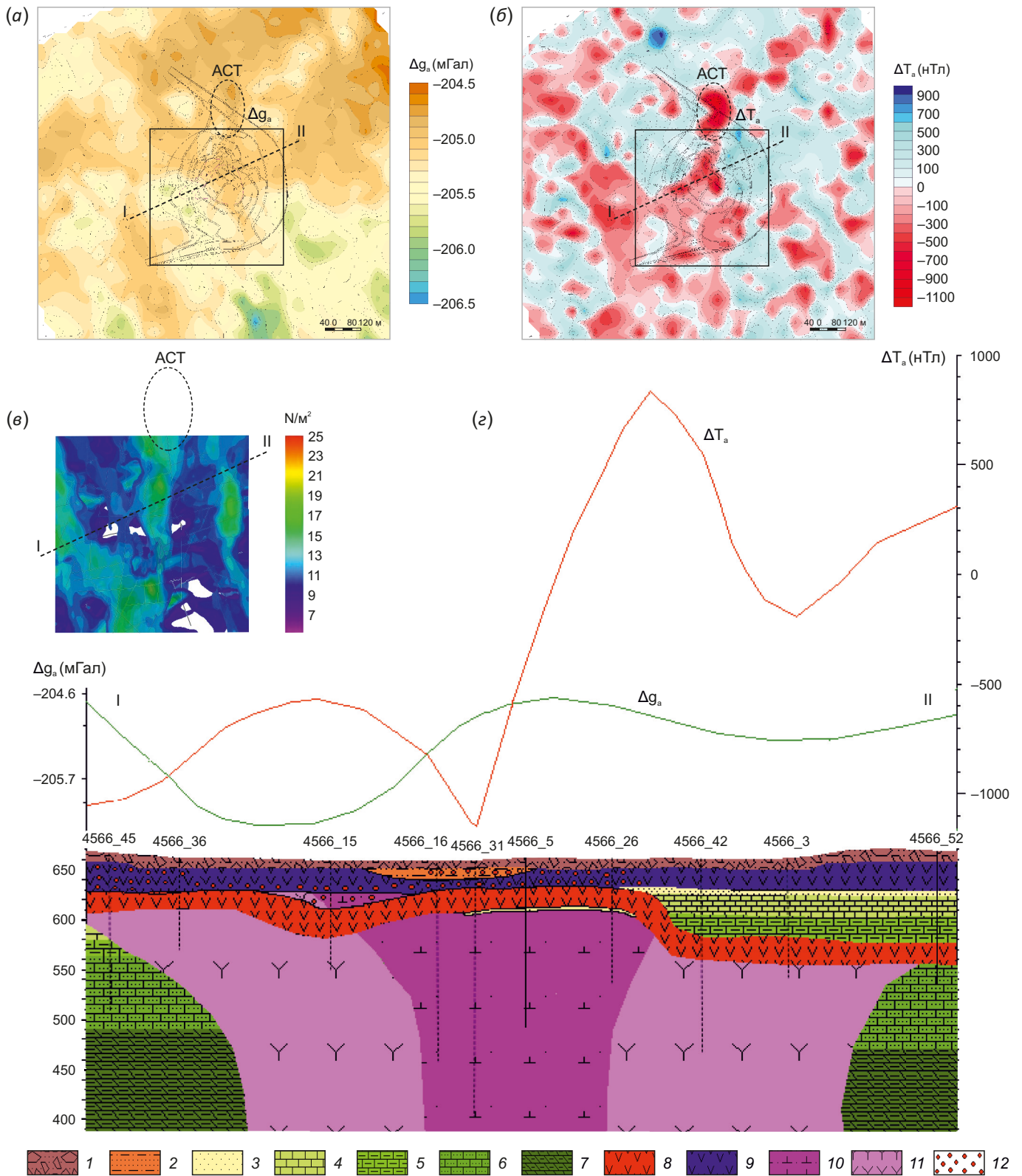


Рис. 2. Результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов по трубке Комсомольской. Карты аномальных полей: (а) – гравитационного; (б) – магнитного; (в) – распределение параметра плотности трещин (показано распределение изолиний, начиная с величины 10.0 трещин/м²); (г) – геолого-геофизический разрез по линии I-II (1 – современные элювиально-делювиальные отложения Q₄; 2 – алакитская свита P₂-T₁a, туфы и туфо-песчаники (вторая фаза); 3 – айхальская свита C₂₋₃ah, алевролиты и песчаники; 4-7 – породы вмещающего комплекса (карбонатный цоколь): 4 – ландоверский ярус S₁ln, известняки и доломиты, 5 – кылахская свита O₂₋₃kl, известняки, 6 – сохолохская свита O₁₋₂sh, известняки, 7 – олдондинская свита E₃-O₁ol, известняки; 8-9 – траппы пермотриаса: 8 – отрицательно намагниченный силл долеритов γβT₁ кузьмовского интрузивного комплекса, 9 – положительно намагниченный силл долеритов γβP₂-T₁ катангского интрузивного комплекса; 10-11 – далдыно-алакитский комплекс iD₃-C₁dl: 10 – кимберлитовая брекчия, диатрема (поздняя

фаза), 11 – порфировый кимберлит, дайка (ранняя фаза); 12 – петромагнитные неоднородности зон обжига (ПМН 2-го типа). Другие пояснения см. на рис. 1.

Fig. 2. Results of the complex interpretation of geological and geophysical materials for the Komsomolskaya pipe. Maps of anomalous fields: (a) – gravitational; (b) – magnetic; (c) – distribution of the crack density parameter (the distribution of iso-lines is shown from 10.0 cracks/m² value); (d) – geological and geophysical section along line I–II (1 – modern eluvial-deluvial deposits Q₄; 2 – Alakit suite P₂-T₁al, tuffs and tuff-sandstones (second phase); 3 – Aikhal suite C₂₋₃ah, siltstones and sandstones; 4–7 – rocks of the host complex (carbonate basement): 4 – Landoverian stage S₁ln, limestones and dolomites, 5 – Kylakh suite O₂₋₃kl, limestones, 6 – Sokhsolokh suite O₁₋₂sh, limestones, 7 – Oldondin suite E₃-O₁ol, limestones; 8 and 9 – Permian-Triassic traps: 8 – negatively magnetized γβT₁ dolerite sill of the Kuzmovsky intrusive complex, 9 – positively magnetized γβP₂-T₁ dolerite sill of the Katangsky intrusive complex; 10–11 – Daldyn-Alakit complex (D₃-C₁dl: 10 – kimberlite breccia, diatreme (late phase), 11 – porphyritic kimberlite, dike (early phase); 12 – petromagnetic heterogeneities of the sintering zone (PMH-2 type). See Fig. 1 for further explanations.

трубки Комсомольской, в отличие от ранее изученных месторождений Айхал, Сытыканская и Юбилейная [Kravchinsky et al., 2002], является то, что они сформировались в эпохи, соответственно, прямой (N) и обратной (R) полярности магнитного поля Земли [Konstantinov et al., 2004], когда Сибирская платформа занимала высокое широтное палеогеографическое положение [Khramov, 1982]. Согласно [Konstantinov et al., 2012], месторождение по геолого-геофизической сложности относится к 3-му варианту поисковой обстановки, который является самым сложным для обнаружения месторождений алмаза по гравимагнитным аномалиям (рис. 2, а, б).

Таким образом, трубка Комсомольская представляет собой уникальный объект для установления геолого-геофизических, тектоно-, петрофизических и других поисковых критериев и разработки на их основе оптимального комплекса геолого-геофизических методов поисков коренных месторождений алмазов в пределах восточного борта Тунгусской синеклизы (4 и 5-й алмазопоисковые геотипы площадей). В этой связи изучение структуры и физических свойств СВК месторождения трубки Комсомольской является актуальной задачей настоящих исследований с целью формирования его ФГМ и разработки на ее основе методологии корректной геологической интерпретации материалов гравимагниторазведки.

3. МЕТОДИКА РАБОТ

Тектонофизические исследования. Для характеристики тектонического строения участка локализации трубки Комсомольской использовались полевые геолого-структурные и тектонофизические методические приемы, направленные на полевое изучение зон разломов, картирование основных элементов их внутреннего строения и восстановление полей тектонических напряжений [Gladkov et al., 2008]. Основой для реализации этих методов служат создаваемые в процессе полевых работ точки наблюдений, в пределах которых выполняется комплекс однотипных геолого-

структурных измерений (всего в карьере создано 266 точек). Картирование разрывных нарушений в пределах горной выработки выполнялось путем фиксации их выходов на различных горизонтах и прослеживания в бортах карьера. Стандартная точка наблюдений в карьере трубки Комсомольской представляла собой отрезок стенки карьера (на определенном горизонте) протяженностью от 10 до 20 м (рис. 3, а).

Электронная база данных, составленная по результатам выполненных исследований, содержит более 1600 замеров тектонических трещин и разрывных нарушений разного ранга. Для их анализа использовались как известные программные продукты, так и оригинальная разработка лаборатории тектонофизики – программный комплекс STRUCTURE, предназначенный для построения структурных диаграмм по замерам трещин и разрывных нарушений [Gladkov et al., 2008].

Петрофизические, петро- и палеомагнитные исследования. Всего в карьере изучено 30 обнажений, из которых отобрано 334 штуфа. Изученные горные породы месторождения трубки Комсомольской отнесены к семи петрофизическим СВК¹ (табл. 2). Наиболее представительной является коллекция базитов (долериты и туфы), поскольку данные по ним важны для решения широкого круга задач: петромагнитного картирования, интерпретации наблюдаемых геофизических полей и др. По кимберлитам представительность выборки меньше, но ее достаточно для построения корректной ПФМ [Konstantinov et al., 2004]. Относительно небольшое количество образцов из терригенно-осадочных пород объясняется тем, что их магнитные свойства слабые и существенно не влияют на характер поля. В то же время физические свойства карбонатного цоколя достаточно хорошо изучены на соседних объектах (трубки Айхал, Юбилейная и др.) [Konstantinov et al., 2012, 2017, 2018a; Konstantinov, 2014].

Ориентированные штуфы отбирались в современной системе координат с помощью горного компаса² [Khramov, 1982]. Для этой цели выбирались выступы

¹ Петрофизические структурно-вещественные комплексы (ПСВК) – структурно-вещественные комплексы геологического объекта, характеризующиеся определенными значениями физических параметров (плотность, магнитная восприимчивость, естественная остаточная намагниченность (ЕОН), фактор Q и др.). Их объемное распределение в геологическом пространстве формирует петрофизическую модель (ПФМ) [Vakhromeev et al., 1997].

² Отбор сильномагнитных горных пород (долеритов) проводился с постоянным контролем магнитного склонения; кроме того, использованы ориентиры с известной маркшейдерской привязкой.

Таблица 2. Спектр плотностных и магнитных параметров основных ПСВК месторождения трубки Комсомольской
Table 2. A range of density and magnetic parameters for main SMC of the Komsomolskaya pipe

№ пп	Обнажение (горизонт)	N	σ (s), кг/м ³	n	$\bar{\alpha}$ (ε), 10 ⁻⁵ СИ	In				Q (ε), ед.
						In (ε), 10 ⁻³ А/м	Dcp, град.	Jcp, град.	k, ед./α ₉₅ , град.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вмещающие породы карбонатного цоколя, ПСВК-1										
1	26, 28, 29 (+280...+235)	4	2600 (43.0)	16	8 (1.06)	0.5 (1.17)	353	18	37.7/6.1	0.13 (1.14)
2	28* (+280)	2	2606 (103.7)	10	3 (1.03)	2 (1.21)	61	-20	89.6/5.1	0.98 (1.19)
3	4, 5, 7, 15, 23** (+625...+610)	6	2352 (133.8)	24	28 (1.38)	6 (1.66)	284	-65	4.2/16.6	0.43 (1.51)
Порфиновые кимберлиты далдыно-алакитского интрузивного комплекса D_3-C_1dl , ПСВК-2 (дайка)										
4	27, 28 (+280...+235)	16	2321 (59.6)	65	44 (1.17)	6 (1.23)	1	-18	2.9/12.7	0.29 (1.10)
Кимберлитовые брекчии далдыно-алакитского интрузивного комплекса D_3-C_1dl , ПСВК-3 (некк)										
5	9-12 (+595)	9	2311 (34.7)	33	828 (1.34)	438 (1.29)	249	50	2.3/21.7	1.09 (1.21)
6	21** (+595), отторженец	-	-	7	5205 (1.13)	2594 (1.26)	229	-59	19.8/13.9	1.02 (1.12)
7	22, 23 (+560)	7	2466 (20.8)	55	1673 (1.11)	271 (1.08)	10	8	2.9/13.9	0.33 (1.07)
8	25, 26, 29, 30 (+330...+235)	43	2509 (15.4)	232	447 (1.13)	92 (1.13)	17	14	2.5/7.5	0.42 (1.04)
Перекрывающие песчаники айхальской свиты $C_{2-3}ah$, ПСВК-4 (линзы)										
9	3 (+632)	3	2160 (34.6)	14	9 (1.06)	15 (1.21)	107	79	81.3/4.4	3.55 (1.22)
10	11** (+605)	5	2296 (80.2)	16	73 (1.56)	28 (2.11)	257	-58	12.9/10.7	0.80 (1.55)
Туфы алакитской свиты P_2-T_1al , ПСВК-5 (линзы)										
11	19, 24 (+650...+625)	6	2425 (129.4)	55	37 (1.04)	7 (1.13)	62	86	24.7/3.9	0.38 (1.13)
12	1, 19** (+650...+640)	14	2401 (33.2)	54	36 (1.03)	7 (1.14)	284	-62	22.3/4.2	0.42 (1.12)
Долериты катангского интрузивного комплекса $\beta_0-\gamma\beta P_2-T_1$, ПСВК-6 (силл)										
13	1-3, 18-20, 24 (+650...+625)	53	2925 (6.4)	249	1349 (1.03)	1808 (1.04)	77	83	31.1/1.6	2.75 (1.04)
14	5, 15-19** (+650...+625)	22	2887 (20.7)	119	1288 (1.03)	949 (1.07)	285	-29	1.7/15.7	1.51 (1.07)
Долериты кузьмовского интрузивного комплекса $\gamma\beta T_1$, ПСВК-7 (силл)										
15	4-7, 10, 13-15, 21-23 (+625...+550)	52	2962 (4.5)	225	1808 (1.02)	842 (1.05)	284	-51	3.8/5.6	0.96 (1.04)

Примечание. N – количество штучных образцов; σ – среднее арифметическое значение объемной плотности; s – ошибка среднее арифметическое; n – количество кубиков; $\bar{\alpha}$, In и Q – средние геометрические значения, соответственно, магнитной восприимчивости, ЕОН и коэффициента Кёнигсбергера (In/Ii); ε – ошибка среднего геометрического; Dcp – среднее склонение; Jcp – среднее наклонение; k – кучность; α₉₅ – угол доверия с вероятностью 95 % векторов In. */** – образцы отобраны в контакте с кимберлитами/долеритами (петромагнитная неоднородность зоны обжига [Konstantinov, Gladkov, 2009]).

Note. N is a number of hand specimen samples; σ is the arithmetic mean value of bulk density; s is the error in the arithmetic mean; n is a number of cubes; $\bar{\alpha}$, In and Q are the geometric mean values of the magnetic susceptibility, natural remanent magnetization (NRM), and Königsberger coefficient (In/Ii), respectively; ε – is the error in the geometric mean; Dav – average declination; Jav – average inclination; k – spacing density; α₉₅ is confidence angle with a 95 % probability of vectors In. */** – samples taken in contact with kimberlites/dolerites (petromagnetic heterogeneity of the sintering zone [Konstantinov, Gladkov, 2009]).

в стенках карьера с не нарушенным взрывными работами залеганием горных пород (рис. 3, а). В целом изученный интервал составил >400 м (с гор. +650 до гор. +235, здесь и далее указаны абсолютные отметки) (см. рис. 1, г). Из них выпиливались не менее трех кубиков с ребром 20 мм. В итоге было изучено 1260 кубиков (табл. 2).

В лабораторных исследованиях использовалась современная аппаратура и оборудование: весы ВМК 4001 (САРТОГОСМ, РФ), многофункциональный измеритель

магнитной восприимчивости MFK1-FA (AGICO, Чехия), спин-магнитометр JR-6 (AGICO, Чехия), размагничивающие установки с переменным магнитным полем AF-Demagnetizer (Magnetic Measurements LTD, Великобритания) и LDA-5 (AGICO, Чехия) и температурой MMTD80A (Magnetic Measurements LTD, Великобритания) и др.

Полученная фактография (схемы отбора проб, данные измерений и экспериментов и др.) сводилась в базу данных «RESEARCH» НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) [Konstantinov et al., 2018c]. При проведении исследований

использовались отечественные и зарубежные методические разработки по графической и аналитической реализации решений петро- и палеомагнитных задач с применением компьютерных программ «Statistica-6» [Borovikov, 2001], «Enkin-96» [Enkin, 1994], «Anisoft-42» [Jelinek, 1997], «PetroStat» и «AMSSStat» [Konstantinov et al., 2018c].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Результаты тектонофизических исследований легли в основу тектонической схемы участка локализации трубки Комсомольской, а также позволили восстановить поля тектонических напряжений для различных этапов развития структуры, вмещающей кимберлитовое тело, – дорудного, рудного и пострудного.

В уступах карьера зафиксированы разрывные нарушения, которые были прослежены как по простиранию, так и на различных уровнях по высоте. Установлено, что наибольшее развитие имеют субвертикальные (углы падения 60° и более) нарушения, представленные зонами повышенной трещиноватости мощностью до 10 м и более (рис. 3, а), реже – зонами дробления и

перетирания пород. Наряду с субвертикальными разрывами, существенную роль в строении участка играют субгоризонтальные (углы падения менее 30°) зоны повышенной трещиноватости, дробления и межслоевого скольжения мощностью от сантиметров до первых метров. Как правило, они приурочены к границам слоев различной компетентности. Наклонные разрывные структуры встречаются реже и характеризуются меньшими масштабами по сравнению с дизъюнктивами упомянутых выше групп.

Интерпретация и анализ собранных данных позволили составить схему разломно-блокового строения участка локализации трубки Комсомольской (рис. 3, б). Она свидетельствует, что кимберлитовое тело приурочено к сложно построенному узлу субвертикальных разрывных нарушений четырех направлений. Наиболее крупным из них является субмеридиональный разлом, состоящий из трех субпараллельных разрывных нарушений. Кроме него строение узла определяют разрывные нарушения восток-северо-восточного, субширотного и северо-западного направлений. Вдоль первого из них вытянута длинная ось трубки, а также в его

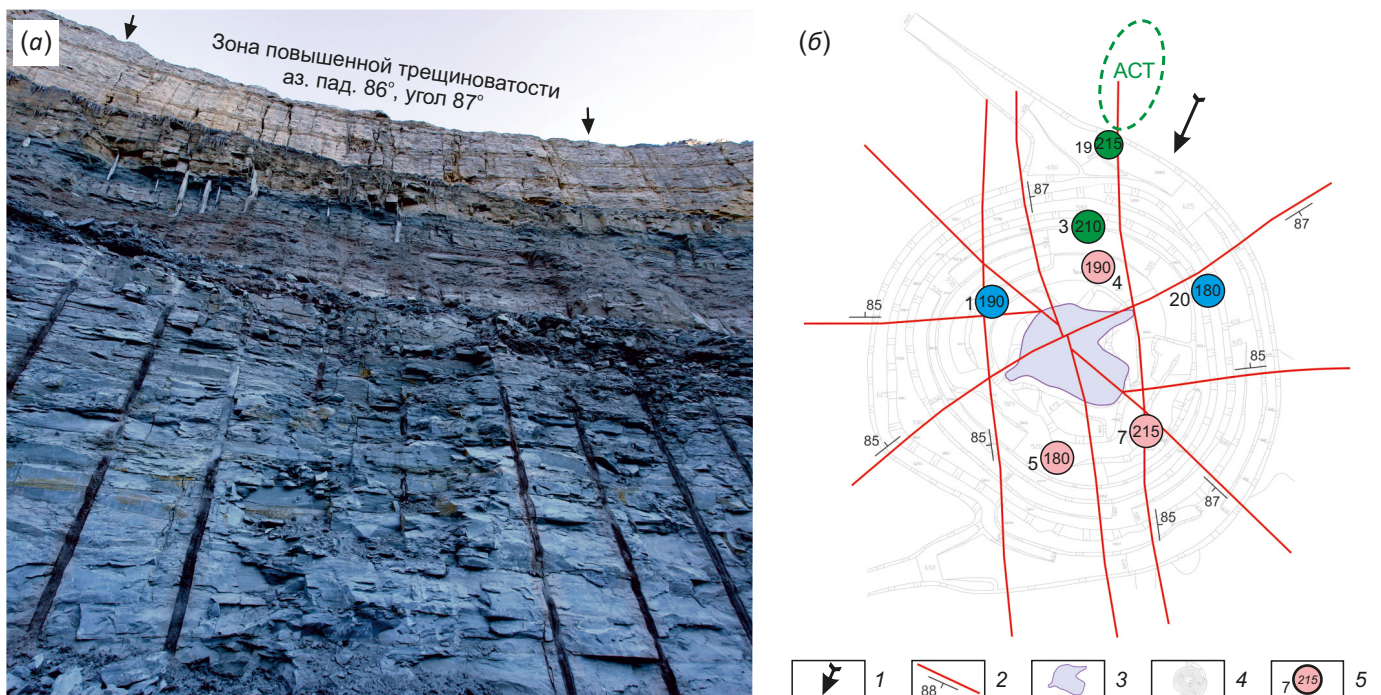


Рис. 3. Разрывные нарушения в карьере месторождения трубки Комсомольской. (а) – субвертикальная зона повышенной трещиноватости в северном борту карьера; (б) – схема разломно-блокового строения участка локализации трубки с элементами магнитной текстуры «течения» силлов долеритов, бронирующих месторождение. 1 – предполагаемое направление движения силлов; 2 – разломы и элементы их залегания; 3 – контур рудного тела; 4 – уступы карьера; 5 – азимут длинной оси эллипса анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) (К1) в обнажении (цифра), синий/красный и зеленый кружок – соответственно, катангский/кузьмовский интрузивный комплекс и ПМН 2-го типа. Другие пояснения см. ниже по тексту.

Fig. 3. Faults in the Komsomolskaya diamond quarry. (а) – highly fractured subvertical zone in the northern side of the open pit; (б) – diagram of the fault-block structure of the pipe localization area with elements of the magnetic texture of the "flow" of dolerite-sill armor on the deposit. 1 – inferred direction of movement of the sills; 2 – faults and their dip and strike components; 3 – contour of the ore body; 4 – quarry steps; 5 – azimuth of the long axis of the AMS (K1) ellipse in the outcrop (number), blue/red and green circles are the Katangsky/Kuzmovsky intrusive complex and type 2 PMH, respectively. See further explanations below.

пределах локализована кимберлитовая дайка, продолжающаяся рудное тело к северо-востоку и юго-западу.

Необходимо отметить, что, в отличие от других участков локализации кимберлитовых тел (Юбилейная и Айхал) Алакит-Мархинского района, в карьере трубки Комсомольской не наблюдалось сколько-нибудь значительных сбросовых смещений по субвертикальным разрывным нарушениям. Этот факт, а также наличие смещений линий разломов (рис. 3, б) служат подтверждением полученных ранее выводов о главенствующей роли сдвиговых деформаций при формировании и активизации разломов в пределах вмещающих трубку отложений и перекрывающих породах. Результаты детального изучения тектонической трещиноватости позволили восстановить поля тектонических напряжений и определить последовательность их проявления во времени [Gladkov et al., 2008]. Было установлено, что формирование трубки Комсомольской началось на временном отрезке, характеризующемся субгоризонтальным положением действующих (максимальной и минимальной) осей главных нормальных напряжений, ориентированных соответственно в северо-восточном и северо-западном направлении.

По результатам сопоставления структурных данных со схемами локализации трех последовательных фаз внедрения кимберлитового материала в пространстве [Egorov et al., 2015] предложена следующая структурно-вещественная модель становления кимберлитового тела, включающая три этапа (рис. 4). Внедрение трубки началось в поле напряжений, характеризующемся северо-восточной ориентировкой оси сжатия и северо-западной – растяжения и ознаменовалось внедрением дайки слюдистых порфировых кимберлитов восток-северо-восточного простирания, а также формированием вытянутого также в восток-северо-восточном направлении штока порфировых кимберлитов. Внедрение кимберлитов приходится на сегмент восток-северо-восточного разлома, в пределах которого возникали условия локального растяжения за счет левосдвиговых смещений по нарушениям субмеридионального разлома (рис. 4, а). При этом максимальное раскрытие (шток) приходится на центральную часть сегмента, в которой он пересекается с субширотным нарушением.

Внедрение второй и третьей фазы кимберлитового тела происходило в изменившемся поле тектонических

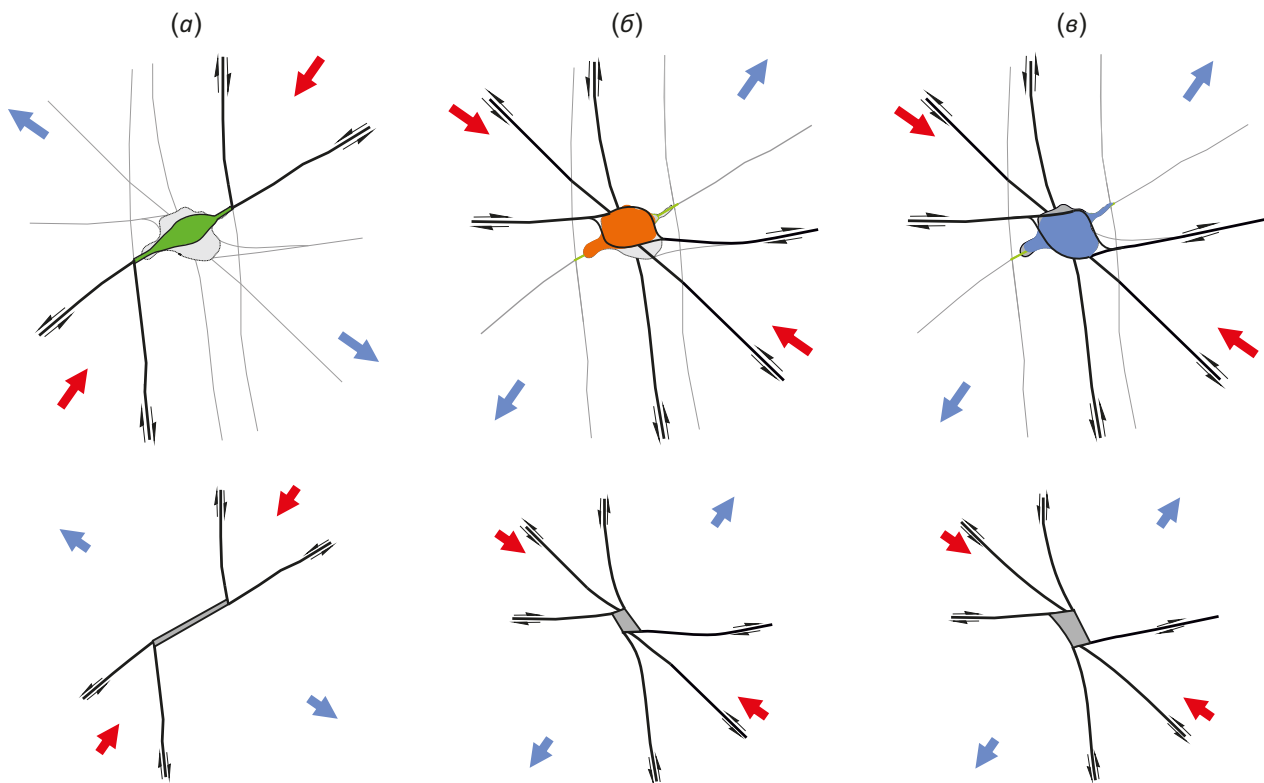


Рис. 4. Структурно-вещественная модель становления кимберлитовой трубки Комсомольской в разломном узле.

(а–в) – структурно-вещественные этапы: верхние рисунки – кинематика разломных структур и кимберлитовые тела различных фаз внедрения; нижние рисунки – участки локального растяжения (раскрытия), формируемые в результате сдвиговых смещений по разломам, образующим узел. Стрелками показано направление действия сил сжатия (красные) и растяжения (синие).

Fig. 4. Structural-material model of formation of the Komsomolskaya kimberlite pipe in a fault node.

(a–b) – structural-material stages: upper figures show kinematics of fault structures and kimberlite bodies of various intrusion phases; lower figures show the areas of local tension (opening) formed as a result of shear displacements along the tectonic knot. The arrows show the direction of action of the compression (red) and tension (blue) forces.

напряжений, оси сжатия и растяжения которого имели северо-западную и северо-восточную ориентировку соответственно. В этих условиях знаки смещения по сегментам нарушений восток-северо-восточного и субширотного разломов поменялись на противоположные (первый функционировал как правый, а второй – как левый сдвиг). В результате тектоническим фактором, определяющим положение участка максимального раздвижения в разломном узле, явилось взаимодействие нарушений субширотного направления и сегментов дизъюнктивов северо-западного и субмеридионального простирания (рис. 4, б, в). Безусловно, что на форму этого участка и величину его раскрытия также существенное влияние оказали эксплозивные процессы, воздействие которых многократно усиливало деформационные эффекты от тектонических сил.

Дальнейшая активизация разломного узла в указанном поле напряжений приводила к тому, что за счет взаимодействия нарушений субширотного разлома (по которым происходили правосдвиговые смещения) и сегментов нарушений северо-западного и субмеридионального простирания формировался участок локального растяжения (раскрытия) (рис. 4, б). В его пределах проявились интенсивные эксплозивные процессы с преобладанием в кимберлитовом расплава-флюиде газофлюидной составляющей, которые совместно с тектоническими движениями привели к интенсивному дроблению осадочного цоколя и обусловили становление штока эруптивных кимберлитовых брекчий с массивной текстурой цемента в центральной части трубки, полностью дезинтегрировавшее шток порфировых кимберлитов. Следует отметить, что эксплозивные процессы практически не затронули дайку порфировых кимберлитов на северо-восточном фланге трубки.

Продолжение смещений по указанным нарушениям в совокупности с эксплозивным воздействием привело к формированию значительной по размерам полости в карбонатном цоколе с внедрением большого объема кимберлитового расплава-флюида и образованием геологического тела автолитовых брекчий (рис. 4, в). На данном этапе была дезинтегрирована дайка порфировых кимберлитов на северо-восточном фланге трубки и образовался апофиз, сложенный автолитовыми брекчиями. Эруптивные кимберлитовые брекчии также подверглись интенсивной ассимиляции, особенно в пределах юго-западного фланга трубки, где наличие тел брекчий диагностируется исключительно по количеству и размеру их обломков в автолитовой брекчии. В течение этого этапа был полностью сформирован контур месторождения с образованием специфических структур диатремовой ассоциации, к которому впоследствии мимикрировались поздние магматические процессы (траппы Тунгусской синеклизы).

Петрофизические, петро- и палеомагнитные исследования (табл. 2; рис. 5, 6) легли в основу формирования ДФГМ месторождения алмазов кимберлитовой трубки Комсомольской (см. рис. 2), что позволило

установить связь наблюдаемого аномального гравимагнитного поля со структурой, вещественным составом, физическими характеристиками, природой и возрастом намагниченности ПСВК с целью обоснования поисковых физико-геологических критериев. На этапе первичных измерений получен спектр изменений значений физических параметров ПСВК, которые являются составными элементами ДФГМ месторождения трубки Комсомольской (табл. 2).

ПСВК-1, к которому относятся неизменные вмещающие породы карбонатного цоколя раннего палеозоя – алевро-песчаники и известняки олдондинской (O_3-O_1ol), сохолохской ($O_{1-2}sh$), кылахской ($O_{2-3}kl$) свит и ландоверского (S_1ln) яруса (см. рис. 1, г; рис. 3, а), характеризуется объемной плотностью $\sigma=2600\pm 43$ кг/м³, магнитной восприимчивостью $\alpha < 10 \cdot 10^{-5}$ СИ, естественной остаточной намагниченностью (ЕОН/NRM) $In < 5 \times 10^{-3}$ А/м и фактором $Q < 0.2$ (т.е. практически немагнитные образования). Направления векторов ЕОН сгруппированы в северных румбах $D_{cp} \approx 353^\circ$ с пологим наклоном $J_{cp} \approx 18^\circ$. Средние значения достаточно близки к значениям вмещающих пород карбонатного цоколя трубки Нюрбинской [Konstantinov et al., 2017]. В зонах «обжига» (петромагнитные неоднородности (ПМН) 2-го типа) с кимберлитами и долеритами кузьмовского комплекса наклонения векторов ЕОН становятся отрицательными в 1 и 3-м секторе стереограммы соответственно: $D_{cp}=61^\circ$ и $J_{cp}=-20^\circ$, $D_{cp}=284^\circ$ и $J_{cp}=-65^\circ$.

ПСВК-2 (ПК) и ПСВК-3 (КБ) представляют объекты геолого-геофизических поисков – коренные месторождения алмазов (см. рис. 1, г; 2, г). Объемная плотность их варьируется от 2300 до 2500 кг/м³, немного увеличиваясь с глубиной (табл. 2). Магнитные характеристики изученных кимберлитов повышены относительно осадочных ПСВК-1 и ПСВК-4, но имеют ряд особенностей. Кимберлиты верхних горизонтов, особенно отторженца, явно испытали температурное воздействие со стороны силла долеритов кузьмовского комплекса (см. рис. 5, а): метакронная среднетемпературная компонента вектора ЕОН В в интервале температур 250–400 °С согласуется с направлением первичной ЕОН силла (см. рис. 5, г) [Kravchinsky et al., 2002; Konstantinov et al., 2014a; Kirguyev et al., 2019, 2020]. У таких кимберлитов наблюдаются повышенные значения фактора $Q > 1$, а в непосредственном эндоконтакте с силлом долеритов $\alpha \approx 5200 \cdot 10^{-5}$ СИ, $In \approx 2600 \cdot 10^{-3}$ А/м, вектор ЕОН – $D_{cp}=229^\circ$ и $J_{cp}=-59^\circ$. На глубине, где влияние магматических и экзогенных процессов уменьшается, кимберлиты имеют обычные значения фактора $Q=0.3-0.4$ ед. и пологие наклонения вектора (J_{cp} от -18 до 14°) в 1-м секторе стереограммы. В целом, векторы ЕОН кимберлитов сохранили первичную высокотемпературную компоненту С, которая соответствует среднепалеозойскому тектономагматическому этапу [Kravchinsky et al., 2002; Konstantinov et al., 2018b; Konstantinov, 2010, 2014, 2021].

К практически немагнитным образованиям относятся ПСВК-4 (песчаники айхальской свиты $C_{2-3}ah$),

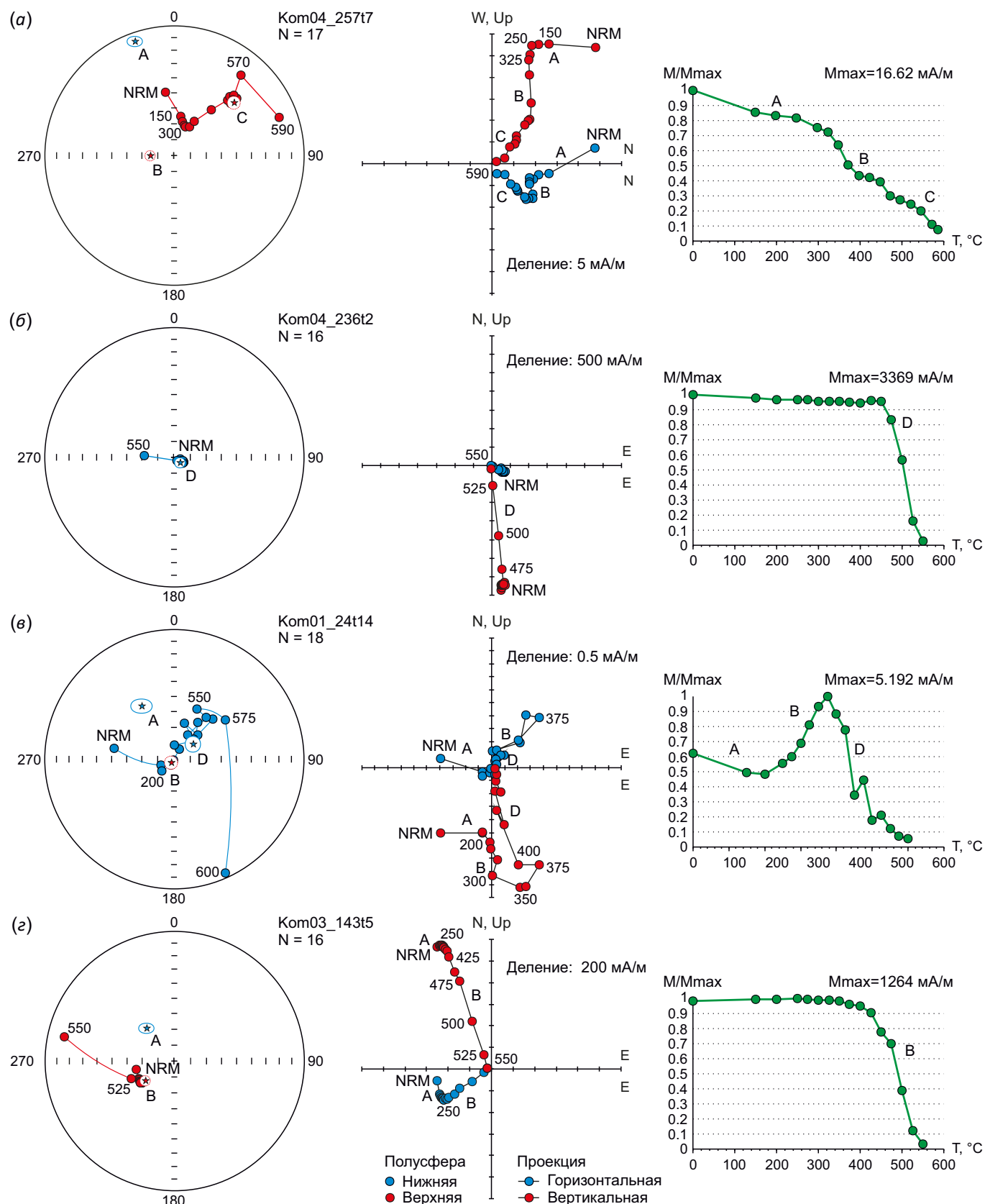


Рис. 5. Палеомагнитные исследования.

(а) – кимберлиты, (б) и (г) – долериты, соответственно, катангского и кузьмовского интрузивных комплексов, (в) – туфы. Другие пояснения см. в тексте.

Fig. 5. Paleomagnetic studies.

(a) – kimberlites, (б) and (г) – dolerites of the Katangsky and Kuzmovsky intrusive complexes, respectively, (в) – tufts. See text for further explanations.

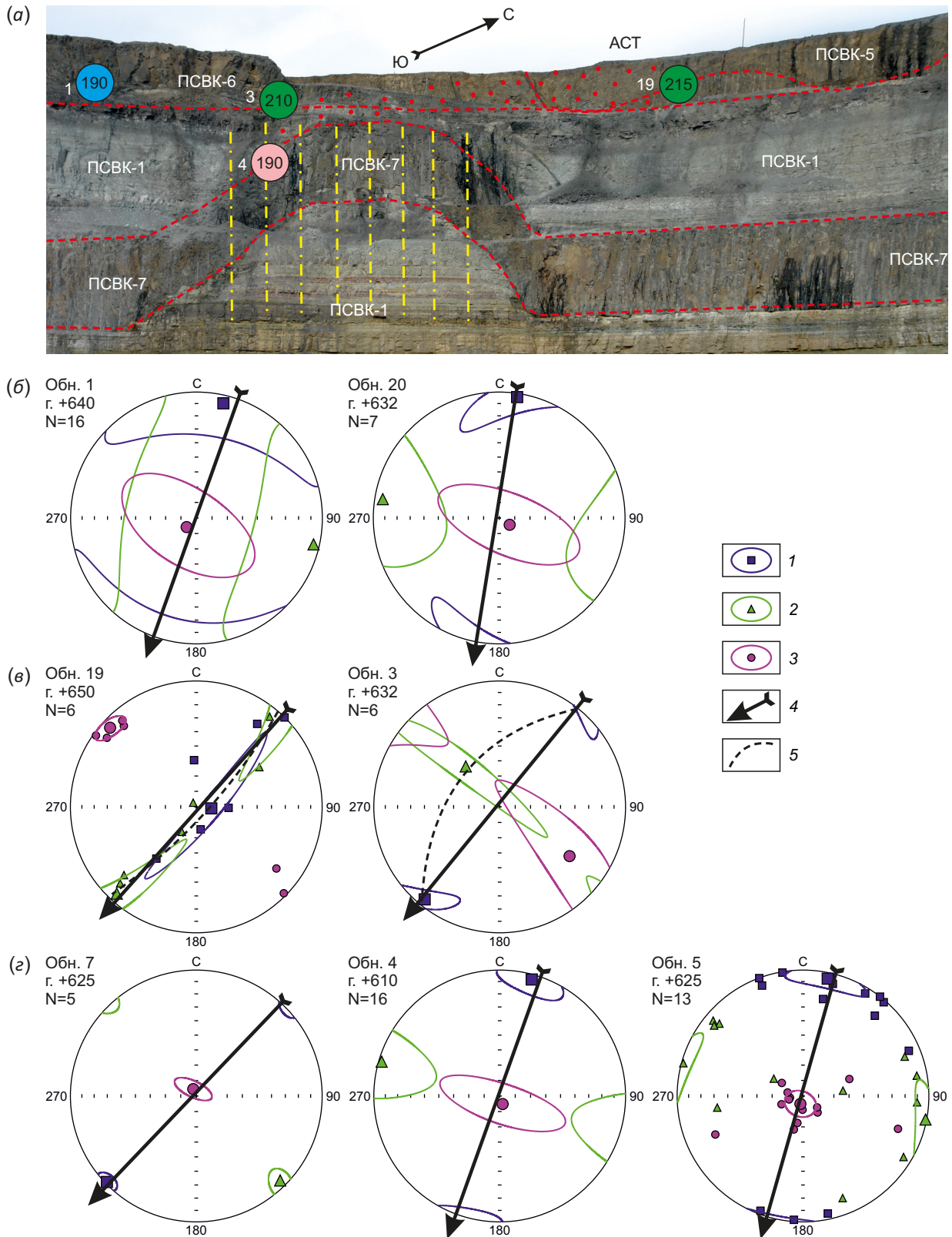


Рис. 6. Изучение АМВ горных пород северного борта карьера трубки Комсомольской.

(а) – привязка изученных обнажений; (б–з) – стереограммы АМВ (1–3 – оси эллипсоида с овалами доверия 95 %, соответственно, длинная K1, средняя K2 и короткая K3; 4 – направление движения силла долеритов; 5 – плоскость магнитного расчленения (K1 и K2). Другие пояснения см на рис. 3.

Fig. 6. AMS study of rocks from the northern side of the Komsomolskaya pipe.

(a) – locating the position of the outcrops studied; (b–z) – AMS stereograms (1–3 – axes of the ellipsoid with 95 % confidence ovals, long K1, medium K2, and short K3, respectively; 4 – direction of movement of the dolerite sill; 5 – plane of magnetic separation (K1 and K2). See Fig. 3 for further explanations.

которые залегают на кимберлитах в виде линз небольшой мощности. Плотность неизменных песчаников $\sigma=2160\pm 34.6$ кг/м³ существенно меньше, чем у пород карбонатного цоколя (см. выше) и песчаников, ороговикованных долеритами катангского комплекса – $\sigma=2296\pm 80.2$ кг/м³ (табл. 2). Направления векторов ЕОН in situ последних (ПМН 2-го типа) также согласуются с зонами перемагничивания ПСВК-1 силлом долеритов кузьмовского комплекса: $D_{cp}=257^\circ$ и $J_{cp}=-58^\circ$. В целом (по размерам и физическим свойствам) породы этого комплекса вряд ли могут существенно исказить аномальное гравимагнитное поле месторождения.

Наиболее серьезные аномалии-помехи в наблюдаемых геофизических полях месторождения создают базиты катангского и кузьмовского вулканогенных комплексов (см. рис. 1, в, г) [Konstantinov et al., 2012]. Они характеризуются значительными размерами в объеме и варьирующимися в широком диапазоне значениями плотностных и магнитных параметров (табл. 2).

ПСВК-5, к которым относятся туфы алакитской свиты P_2-T_1al (см. рис. 1, г; 2, г; 6, а), залегают на горизонтах +625...+650 м и характеризуются средними значениями плотностных и магнитных параметров (табл. 2), сопоставимыми с ПСВК-4: $\sigma=2400$ кг/м³, $\alpha\approx 37\cdot 10^{-5}$ СИ, $I_n\approx 7\cdot 10^{-3}$ А/м. Туфы залегают в виде линз достаточно существенных объемов (протяженность от 50 до 100 м и более, мощность первые десятки метров), что следует учитывать при построении ФГМ месторождений алмазов на площадях 4 и 5-го геотипа. Эти объекты в карбонатном цоколе способны создать на дневной поверхности ложные гравитационные аномалии, аналогичные кимберлитовым телам (аномалии трубчатого типа). По векторам ЕОН в туфах выделяются два петромагнитных таксона (ПМТ): петромагнитные группы (ПМГ) и ПМН 2-го типа [Konstantinov et al., 2014b; Konstantinov, 2014]. В ПМН 2-го типа, в отличие от ПМГ, дополнительно, кроме первичной компоненты D, в пределах температур 150–350 °С установлены векторы ЕОН метахронной (компонента В) природы (см. рис. 5, в), характерные для зон «обжига»: $D_{cp}=284^\circ$ и $J_{cp}=-62^\circ$, что свидетельствует о их перемагничивании силлом долеритов кузьмовского комплекса [Konstantinov et al., 2014a; Kirguez et al., 2019, 2020]. На северном участке над туфами, характеризующимися низкими значениями плотности и намагниченности, наблюдается повышенная положительная (от 1 до 2 мГл) гравитационная и интенсивная отрицательная (до –1000 нТл) магнитная аномалия (см. рис. 2, а, б, г), что представляет парадоксальное явление в геофизике. Вероятнее всего, причина наблюдаемой гравимагнитной аномалии объясняется глубинным строением месторождения. На этом основании ее следует интерпретировать как АСТ, отражающую благоприятную поисковую обстановку на флангах месторождения (см. рис. 1, в, г; 2; 3, б).

ПСВК-6 (совместно с ПСВК-5) бронирует месторождение трубки Комсомольской на горизонтах +625...+650 м (см. рис. 1, в, г; 2, г; рис. 6, а). Его объемная плотность достигает $\sigma=2900$ кг/м³, а магнитная восприимчивость

$\alpha\approx 1300\cdot 10^{-5}$ СИ (табл. 2). Это обстоятельство подтверждает, что силл характеризуется достаточно однородным химическим и петрографическим составом долеритов [Tomshin et al., 2001]. Тип АМВ (обнажения 1 и 20) – осадочный: плоскость магнитного расслоения субгоризонтальная (рис. 6, б), направление движения силла юг-юго-западное, что свидетельствует о его связи с Вилуйско-Котуйской зоной разломов (см. рис. 1, б). В то же время по векторам ЕОН и фактору Q ПСВК-6, так же как и туфы (ПСВК-5), разбивается на два ПМТ. Первый представлен неизменными долеритами (ПМГ) и характеризуется значениями $I_n\approx 1800\cdot 10^{-3}$ А/м и $Q=2.75$ и компактными векторами $D_{cp}=77^\circ$, $J_{cp}=83^\circ$, $k=31.1$ и $\alpha_{95}=1.6^\circ$. Как правило, векторы ЕОН являются магнитожестькими с одной компонентой D (см. рис. 5, б).

Во втором ПМТ силла долеритов катангского комплекса, так же как в ПСВК-1, 3, 4 и 5 у 30 % изученных образцов (22 шт.), установлены векторы с $I_n\approx 950\cdot 10^{-3}$ А/м и $Q=1.51$ с отрицательной полярностью $D_{cp}=-285^\circ$, $J_{cp}=-29^\circ$, характеризующиеся большими разбросами $k=1.7$ и $\alpha_{95}=15.7^\circ$ (табл. 2). Это явный признак ПМН, формирование которых происходило за счет прогрева отрицательно намагниченным силлом долеритов кузьмовского комплекса (2-го типа ПМН или зон обжига) [Konstantinov, Gladkov, 2009]. Тип АМВ (обнажения 3 и 19) – даечный: плоскость магнитного расслоения субвертикальная, юго-западного простирания (см. рис. 1, г; 3, б; рис. 6, в) [Konstantinov et al., 2018a]. Установленные ПМН характеризуются достаточно большими размерами (мощность 20 м и более, протяженность более 150 м) и широким развитием в верхней части карьера.

ПСВК-7, или силл долеритов кузьмовского комплекса, в основном развит в карбонатном цоколе на горизонтах +550...+580 м (граница $O_{2,3}kl$ и S_1ln свит), местами достигая гор. +625 м (см. рис. 1, г; 2, г; рис. 6, а) [Khar'kiv et al., 1998]. Силл долеритов характеризуется относительно высокой объемной плотностью $\sigma=2960$ кг/м³ и, соответственно, магнитной восприимчивостью $\alpha\approx 1800\cdot 10^{-5}$ СИ (табл. 2), что указывает на повышенный процент содержания железа и титана [Tomshin et al., 2001]. С другой стороны, для долеритов этого комплекса характерны пониженные, относительно ПСВК-6, значения $I_n\approx 840\cdot 10^{-3}$ А/м и $Q=0.96$. Векторы ЕОН in situ имеют положительную и в основном отрицательную полярность: $D_{cp}=284^\circ$, $J_{cp}=-51^\circ$, $k=3.8$ и $\alpha_{95}=5.6^\circ$. Согласно [Konstantinov et al., 2014b], базиты ПСВК-7 также относятся к ПМН 1-го типа – тела, перемагниченные геомагнитным полем: вектор ЕОН включает вязкую низкотемпературную (до 250 °С) компоненту А и первичную высокотемпературную компоненту В (см. рис. 5, г). Метахронные компоненты ЕОН геологической природы отсутствуют. В силле долеритов установлен осадочный тип АМВ, свидетельствующий о его движении в юго-западном направлении (см. рис. 1, г; 3, б; рис. 6, г) от Вилуйско-Котуйской зоны разломов (см. рис. 1, б).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работы, выполненные в карьерном поле трубки Комсомольской, позволили впервые для Якутской алмазодобывающей провинции провести комплексный анализ вещественной и структурной составляющих в строении месторождения и обосновать ДФГМ (см. рис. 2, 3, 4), которая включает следующие элементы:

1. Трубка Комсомольская, которая приурочена к узлу пересечения региональных разломов субмеридионального (имеет определяющее значение в локализации кимберлитового тела), восток-северо-восточного, широтного и северо-западного направлений и сложена кимберлитами трех фаз внедрения, которые последовательно сформировали современную форму рудного тела (см. рис. 3, 6). Особенности строения рудного тела и вмещающего его разломного узла в комплексе с данными по восстановлению полей тектонических напряжений, определявших его активизацию в течение различных временных отрезков (в том числе и на время внедрения кимберлитового тела), указывают на то, что внедрение рудных определялось наличием участков локального растяжения, возникавших в результате сдвиговых смещений по нарушениям меридионального и субширотного простирания (см. рис. 4).

2. Разломно-блоковая тектоника, вмещающая кимберлитовую трубку, которая определила также характер поведения силла долеритов кузьмовского комплекса в карбонатном цоколе. Его переход на верхний горизонт осуществлялся по зонам повышенной трещиноватости, благодаря чему такая кимберлитовмещающая структура (сигмоида, ступень) маркируется характерными гравитационными ΔG_a и магнитными ΔT_a аномалиями (см. рис. 1, г; 2, г).

3. ПМН 2-го типа – области изменения первоначальных магнитных характеристик за счет «обжига», которые образовались в зоне контакта долеритов кузьмовского комплекса с вмещающими породами (кимберлиты, долериты и туфы катангского комплекса) [Konstantinov, Gladkov, 2009; Konstantinov et al., 2014b; Konstantinov, 2014; Kirguyev et al., 2019, 2020]. Двигаясь в юг-юго-западном направлении (в пределах $185-215^\circ$) от Вилюйско-Котуйской зоны разломов (см. рис. 1, б, г; 3, б; рис. 6, г), отрицательно намагниченный силла кузьмовского комплекса поднялся с нижнего структурного этажа карбонатного цоколя (гор. +550 м) по зонам повышенной трещиноватости до подошвы положительно намагниченного катангского комплекса (гор. +625 м) (см. рис. 1, г; 2, г; рис. 6, а). В результате возникновение векторов ЕОН обратной полярности во всех изученных нами ранее сформированных ПСВК определяется перемагничиванием со стороны силла долеритов кузьмовского комплекса (ПСВК-7). Следовательно, зоны обжига целесообразно рассматривать в качестве своеобразных ПМТ, формирование которых связано с определенной геолого-тектонической обстановкой. В процессе образования зон обжига (ПМН 2-го типа) в траппах ранних фаз внедрения происходит заметное смещение петромагнитных границ (на

20 м и более вверх), что необходимо учитывать при физико-геологическом моделировании верхней части разреза [Konstantinov et al., 2012].

Таким образом, местоположение «слепой» кимберлитовой трубки Комсомольской маркируется наличием ПМН зон обжига в перекрывающих ее траппах и сопровождающих их повышенным гравитационным ΔG_a и отрицательным магнитным ΔT_a аномальными полями, которые контролируются зонами повышенной трещиноватости (см. рис. 1, г; 2, а-в). По этой причине ПМН зон обжига в траппах ранних фаз внедрения логично рассматривать в качестве петрофизического поискового критерия присутствия кимберлитовых трубок на алмазопромышленных территориях 4 и 5-го геотипов (разумеется, в комплексе с геофизическими, структурно-тектоническими и другими признаками), а связанные с ними геофизические аномалии – как АСТ перспективных на проявление кимберлитовых тел участков.

Предлагаемая ДФГМ объединяет установленные особенности расположения и кинематики разрывных нарушений с закономерностями изменения вещественного строения, формы, физических (в т.ч. магнетоминералогических и палеомагнитных) свойств ПСВК месторождения алмазов трубки Комсомольской и характера поведения наблюдаемых над ними геофизических полей в рамках функционирования единой тектонодинамической системы в целом.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе структурно-вещественной и ПФМ предложена ДФГМ месторождения трубки Комсомольской, которая имеет очевидную практическую значимость. Она позволяет предложить для поисковых площадей 4 и 5-го геотипов следующий образ объекта поисковых работ (участка, в пределах которого возможна локализация кимберлитового тела типа трубки Комсомольской): разломный узел определенного строения, характер поведения траппов (особенно кузьмовского интрузивного комплекса) и наличие петромагнитных неоднородностей зон обжига (ПМН 2-го типа). Последние характеризуются не только наличием метахронной компоненты векторов ЕОН долеритов оленек-велингнинского и катангского интрузивных комплексов, но и даечным типом АМВ, повышенными значениями гистерезисных параметров и др. [Konstantinov, Gladkov, 2009; Konstantinov et al., 2014b; Konstantinov, 2014]. Для получения этих данных, кроме ориентированных образцов из коренных обнажений и горных выработок (карьеры, шахты), также можно использовать ориентированный керн скважин.

Поскольку геологическое строение месторождения трубки Комсомольской не является уникальным (близкая геологическая ситуация установлена и на трубке Краснопресненской [Khar'kiv et al., 1998]), не исключена вероятность обнаружения месторождений аналогичного типа на других участках восточного борта Тунгусской синеклизы.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны главному геологу Айхальского ГОКа И.В. Маковчуку и бывшему начальнику Амакинской ГРЭ С.Г. Мишенину за помощь в проведении исследований на карьере Комсомольском.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. The authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Borovikov V.P., 2001. STATISTICA: Computing for Data Analytics. For Professionals. Piter, Saint Petersburg, 658 p. (in Russian) [Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 658 с.].

Egorov K.N., Koshkarev D.A., Gladkov A.S., 2015. Structural-Material Evolution and Diamond Potential of the Komсомolskaya Multiphase Kimberlite Pipe (Alakit-Markhin Field, Yakutia). *National Geology* 3, 16–23 (in Russian) [Егоров К.Н., Гладков А.С., Кошкарев Д.А. Структурно-вещественная эволюция и алмазоносность многофазной кимберлитовой трубки «Комсомольская» (Алакит-Мархинское поле, Якутия) // Отечественная геология. 2015. №3. С. 16–23].

Enkin R.J., 1994. A Computer Program Package for Analysis and Presentation of Paleomagnetic Data. Geological Survey of Canada, Sidney, 16 p.

Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A., 2008. Tectonophysical Studies for Diamond Prospecting. Guidelines. Nauchny Mir, Moscow, 175 p. (in Russian) [Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисхождении работ: Методическое пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с.].

Jelinek V., 1997. Measuring Anisotropy of Magnetic Susceptibility on a Slowly Spinning Specimen – Basic Theory. *Agico, Brno*, 27 p.

Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I., 1998. Indigenous Diamonds 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.].

Khramov A.N. (Ed.), 1982. Paleomagnetology. Nedra, Leningrad, 312 p. (in Russian) [Палеомагнитология / Ред. А.Н. Храмов. Л.: Недра, 1982. 312 с.].

Kirguez A.A., Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Makarov A.A., Vasilyeva A.E., 2020. Petromagnetic Classification

of the Basis of the Eastern Board of the Tungus Syncline. *Geophysics* 3, 45–61 (in Russian) [Киргуев А.А., Константинов К.М., Кузина Д.М., Макаров А.А., Васильева А.Е. Петромагнитная классификация базитов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геофизика. 2020. № 3. С. 45–61].

Kirguez A.A., Konstantinov K.M., Vasilyeva A.E., 2019. Base Petromagnetic Legend of the Tungus Syncline Eastern Board. *Arctic and Subarctic Natural Resources* 24 (1), 18–32 (in Russian) [Киргуев А.А., Константинов К.М., Васильева А.Е. Петромагнитная легенда базитов восточного борта Тунгусской синеклизы // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24. № 1. С. 18–32]. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-18-32>.

Konstantinov K.M., 2010. Age of the Natural Remanent Magnetization of Kimberlites from the Yakut Diamond-Bearing Province. *Science and Education* 1, 47–54 (in Russian) [Константинов К.М. Возраст естественной остаточной намагниченности кимберлитов Якутской алмазодобывающей провинции // Наука и образование. 2010. № 1. С. 47–54].

Konstantinov K.M., 2014. Magnetism of Kimberlites and Traps in the Junction Zone of the Vilyui and Tungus Synclines of the Siberian Platform. Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 34 p. (in Russian) [Константинов К.М. Магнетизм кимберлитов и траппов зоны сочленения Вилюйской и Тунгусской синеклиз Сибирской платформы: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск, 2014. 34 с.].

Konstantinov K.M., 2021. A Generalized Petromagnetic Model of the Primary Diamond Deposit of the Yakut Kimberlite Province. In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Proceedings of Scientific Meeting (October 19–22, 2021). Iss. 19. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 111–113 (in Russian) [Константинов К.М. Обобщенная петромагнитная модель коренного месторождения алмазов Якутской кимберлитовой провинции // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания (19–22 октября 2021 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. Вып. 19. С. 111–113].

Konstantinov K.M., Artemova E.V., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Kirguez A.A., 2018a. Possibilities of the Method of Anisotropy of Magnetic Susceptibility in the Solution of Geologic-Geophysical Problems of Search Radical Diamond Fields. *Geophysics* 1, 67–77 (in Russian) [Константинов К.М., Артёмова Е.В., Константинов И.К., Яковлев А.А., Киргуев А.А. Возможности метода анизотропии магнитной восприимчивости в решении геолого-геофизических задач поисков коренных месторождений алмазов // Геофизика. 2018. № 1. С. 67–77].

Konstantinov K.M., Bazhenov M.L., Fetisova A.M., Khutorskoy M.D., 2014a. Paleomagnetism of Trap Intrusions, East Siberia: Implications to Flood Basalt Emplacement and the Permo-Triassic Crisis of Biosphere. *Earth and Planetary Science Letters* 394, 242–253. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>.

Konstantinov K.M., Gladkov A.S., 2009. Petro-magnetic Heterogeneities in Sintering Zones of Permian-Triassic Traps of Komsomolsk Pipe Deposit (Yakutsk Diamond Province). *Doklady Earth Sciences* 427, 880–886. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09050365>.

Konstantinov K.M., Ivanyushin N.V., Mishenin S.G., Ubini S.G., Suntsova S.P., 2004. Petrophysical Model of the Komsomolskaya Kimberlite Pipe. *Geophysics* 6, 50–53 (in Russian) [Константинов К.М., Иванюшин Н.В., Мишенин С.Г., Убинин С.Г., Сунцова С.П. Петрофизическая модель кимберлитовой трубки Комсомольская // Геофизика. 2004. № 6. С. 50–53].

Konstantinov K.M., Kirguyev A.A., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., 2018b. Paleomagnetism of Kimberlites from the Komsomolskaya Pipe (Yakut Diamond-Bearing Province). In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Proceedings of Scientific Meeting (October 16–19, 2018). Iss. 16. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 134–136 (in Russian) [Константинов К.М., Киргуев А.А., Константинов И.К., Яковлев А.А. Палеомагнетизм кимберлитов трубки Комсомольская (Якутская алмазоносная провинция) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания (16–19 октября 2018 г.). Иркутск: ИЭК СО РАН, 2018. Вып. 16. С. 134–136].

Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Kovalchuk O.E., 2014b. Petro-magnetic Heterogeneities of the Permo-Triassic Traps of the Daldyn-Alakit Diamond Province (Western Yakutia). *Lithosphere* 2, 77–98 (in Russian) [Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермотриасовых траппов Далдыно-Алаakitского алмазоносного района (Западная Якутия) // Литосфера. 2014. № 2. С. 77–98].

Konstantinov K.M., Novopashin A.V., Evstratov A.A., Konstantinov I.K., 2012. Modeling of Gravimagnetic Fields of Primary Diamond Deposits in Areas of Permian-Triassic Traps. *Geophysics* 6, 64–72 (in Russian) [Константинов К.М., Новопашин А.В., Евстратов А.А., Константинов И.К. Физико-геологическое моделирование гравимагнитных полей коренных месторождений алмазов в условиях развития пермотриасовых траппов (Далдыно-Алаakitский алмазоносный район) // Геофизика. 2012. № 6. С. 64–72].

Konstantinov K.M., Yakovlev A.A., Antonova T.A., Konstantinov I.K., Ibragimov S.Z., Artemova E.V., 2017. Petro- and Paleomagnetic Characteristics of the Structural-Material Complexes of the Diamond Mining of the Nyurbinskaya Pipe (Middle Markha District, West Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 135–169 (in Russian) [Константинов К.М., Яковлев А.А., Антонова Т.А., Константинов И.К., Ибрагимов Ш.З., Артёмова Е.В. Петро- и палеомагнитные характеристики структурно-вещественных комплексов месторождения алмазов трубка Нюрбинская (Среднемархинский район, Западная Якутия) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 135–169]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0235>.

Konstantinov K.M., Zabelin A.V., Zaitsevskiy F.K., Konstantinov I.K., Kirguyev A.A., Khoroshikh M.S., 2018c. Structure and Functions of the Petro-magnetic "RESEARCH" Database of the Yakut Kimberlite Province. *Geoinformatics* 4, 30–39 (in Russian) [Константинов К.М., Забелин А.В., Зайцевский Ф.К., Константинов И.К., Киргуев А.А., Хороших М.С. Структура и функции петромагнитной базы данных «RESEARCH» Якутской кимберлитовой провинции // Геоинформатика. 2018. № 4. С. 30–39].

Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., Morikiyo T., Serov I.V., Amirzhanov A.A., 2007. Isotope-Geochemical Systematics of Kimberlites and Related Rocks from the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics* 48 (3), 272–290. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.02.011>.

Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J.-P., Cherniy S.D., Mishenin S.G., Parasotka B.S., 2002. Paleomagnetism of East Siberian Traps and Kimberlites: Two New Poles and Paleogeographic Reconstructions at about 360 and 250 Ma. *Geophysical Journal International* 48 (1), 1–33. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01548.x>.

Lelyukh M.I., 1988. Geological Structure and Features of Diamond Exploration and Local Forecast of Diamond Content in Closed Areas of the Northeastern Tungus Syncline (by the Example of the Aikhal Pipe). PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 307 p. (in Russian) [Лелюх М.И. Геологическое строение и особенности поисков и локального прогнозирования месторождений алмазов в закрытых районах северо-востока Тунгусской синеклизы (на примере Айхальского района): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1988. 307 с.]

Nikulin V.I., Lelyukh M.I., fon der Flaas G.S., 2002. Diamond Diagnostics. Guidelines. Glazkovskaya Tipografia, Irkutsk, 320 p. (in Russian) [Никулин В.И., Лелюх М.И., фон дер Флаас Г.С. Алмазопрогностика: Методическое пособие. Иркутск: Глазковская типография, 2002. 320 с.]

State Geological Map of the Russian Federation, 2013. Verkhnevilyuyskaya Series. Scale 1:200000. Sheet Q-49-XXI, XXII (Aikhal). Explanatory Note. Moscow Branch of VSEGEI, Moscow, 284 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Верхневильюйская. Масштаб 1:200000. Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал): Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 284 с.]

Tomshin M.D., Lelyukh M.I., Mishenin S.G., Suntsova S.P., Kopylova A.G., Ubini S.G., 2001. A Scheme of Development of Trappean Magmatism in the Eastern Side of the Tungus Syncline. *National Geology* 5, 19–24 (in Russian) [Томшин М.Д., Лелюх М.И., Мишенин С.Г., Сунцова С.П., Копылова А.Г., Убинин С.Г. Схема развития траппового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы // Отечественная геология. 2001. № 5. С.19–24].

Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu., 1987. Modeling in Exploration Geophysics. Nedra, Moscow, 192 p. (in Russian) [Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.]

Vakhromeev G.S., Erofeev L.Ya., Kanaikin V.S., Nomokono G.G., 1997. Petrophysics. Textbook for Universities.

Publishing House of the Tomsk University, Tomsk, 462 p. (in Russian) [Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канайкин В.С., Номоконова Г.Г. Петрофизика: Учебник для вузов. Томск: Изд-во Томского университета, 1997. 462 с.].

Vladimirov V.M., Dauev Yu.M., Zubarev V.M., Kaminsky F.V., Minorin V.E., Prokopchuk B.I., Sobolev N.V., Sobolev E.V., Kharkiv A.D., Chernyi E.D., 1984. Diamond Deposits in the USSR. Prospecting and Exploration Methods. Geology of

Diamond Deposits in the USSR. Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, 435 p. (in Russian) [Владимиров Б.М., Дауев Ю.М., Зубарев Б.М., Каминский Ф.В., Минорин В.Е., Прокопчук Б.И., Соболев Н.В., Соболев Е.В., Харьков А.Д., Черный Е.Д. Месторождения алмазов СССР: Методика поисков и разведки. Геология месторождений алмазов СССР. М.: ЦНИГРИ, 1984. Т. 1. 435 с.].