



## ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.838.4

EDN: GNUPHH

DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363

**Магнитоупругий эффект кимберлитовмещающих пород  
(Якутская алмазоносная провинция)****К.М. Константинов<sup>a,✉</sup>, М.Д. Томшин<sup>b</sup>, М.С. Хороших<sup>c</sup>**<sup>a</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия<sup>a,c</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия<sup>b</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Россия

**Резюме.** Цель данного исследования заключалась в проведении петро- и палеомагнитных исследований раннепалеозойских пород карбонатного цоколя ряда месторождений алмазов Якутской алмазоносной провинции с целью изучения изменения значений петрофизических параметров в зоне динамического влияния кимберлитовой трубки. Показано, что при формировании кимберлитовых диатрем, сопровождаемых пульсационными, смещающимися кверху взрывами, в кимберлитовмещающей среде возникают поля термоупругих напряжений, характеризующихся эпигенетическими изменениями и связанными с ними петрофизическими неоднородностями (петрофизическими аномалиями). Естественно, что одними из таких петрофизических аномалий являются петромагнитные неоднородности обжига и стресса, в пределах которых кимберлитовмещающие породы под действием термодинамических процессов контрастно изменили свои первоначальные магнитные характеристики. В основном петромагнитные аномалии отражаются в изменении характера анизотропии магнитной восприимчивости: от осадочного до даечного геотипа. Не исключено, что петромагнитные аномалии магнитной восприимчивости будут сопровождаться образованием векторов метакристаллической остаточной намагниченности в кимберлитовмещающих породах. Размеры петромагнитных аномалий (петромагнитных неоднородностей) в плане могут значительно превышать размеры собственно кимберлитовой трубки, что способствует выделению и оконтуриванию наиболее перспективных участков. Кроме того, магнитоупругий эффект может создать вблизи кимберлитовых тел зоны, труднопроницаемые для относительно вязких обогащенных протокристаллами базитовых магм. Это объясняет их выклинивание вдоль петрофизических барьеров: расщепление на маломощные «языки», образование безтрапповых «окон» и «коридоров», торообразных валов с резко возрастающей в интрузивах мощностью и т. п. Обладая относительно повышенными значениями магнитных и плотностных параметров, такие формы магматических образований будут отражаться в наблюдаемых геофизических полях. Таким образом, петро-магнитные аномалии целесообразно рассматривать в качестве важного петрофизического поискового критерия обнаружения коренных кимберлитовых тел.

**Ключевые слова:** Якутская алмазоносная провинция, базиты, кимберлитовая трубка, трапповые коридоры и окна, петрофизические неоднородности (аномалии) и барьеры, петрофизический поисковый критерий, карбонатный цоколь, анизотропия магнитной восприимчивости

**Для цитирования:** Константинов К.М., Томшин М.Д., Хороших М.С. Магнитоупругий эффект кимберлитовмещающих пород (Якутская алмазоносная провинция) // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 344–363. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363>. EDN: GNUPHH.



## GEOPHYSICS

### Original article

# Magnetoelastic effect of kimberlite host rocks (Yakutsk diamondiferous province)

Konstantin M. Konstantinov<sup>a✉</sup>, Mikhail D. Tomshin<sup>b</sup>, Maxim S. Khoroshikh<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>a,c</sup>Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>b</sup>Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

**Abstract.** The purpose of the research is to conduct petro- and paleomagnetic studies of Early Paleozoic rocks of the carbonate basement of a number of diamond deposits in the Yakutsk diamondiferous province in order to study the changes in petrophysical parameter values in the dynamic influence zone of a kimberlite pipe. It is shown that the formation of kimberlite diatremes accompanied by pulsating explosions shifting upwards brings about thermoelastic stress fields in the kimberlite-bearing medium, which are characterized by epigenetic changes and associated petrophysical heterogeneities (petrophysical anomalies). Petromagnetic heterogeneities of burning and stress are, therefore, some of these petrophysical anomalies, within which kimberlite-bearing rocks have contrastingly changed their original magnetic characteristics under the action of thermodynamic processes. Primarily, petromagnetic anomalies are reflected in the changed nature of the anisotropy of magnetic susceptibility: from sedimentary to dyke geotype. In addition, petromagnetic anomalies of magnetic susceptibility can be accompanied by the formation of metachronous natural residual magnetization vectors in kimberlite host rocks. The dimensions of petromagnetic anomalies (petromagnetic heterogeneities) may significantly exceed the size of the kimberlite pipe itself, which facilitates identification and delineation of the most promising areas. Besides, the magnetoelastic effect can create zones close to the kimberlite bodies that are hardly permeable for relatively viscous, protocystal-rich mafic magmas. This is the reason for their wedging out along petrophysical barriers that is presented by splitting into thin tongues, formation of trap-free windows and corridors, toroidal shafts with sharply increasing thickness in intrusions, etc. Having relatively elevated values of magnetic and density parameters, such forms of igneous formations will be reflected in the observed geophysical fields. Thus, it is reasonable to consider petromagnetic anomalies as an important petrophysical search criterion for the detection of bedrock kimberlite bodies.

**Keywords:** Yakutsk diamondiferous province, basites, kimberlite pipe, trap corridors and windows, petrophysical heterogeneities (anomalies) and barriers, petrophysical search criterion, carbonate basement, anisotropy of magnetic susceptibility

**For citation:** Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Khoroshikh M.S. Magnetoelastic effect of kimberlite host rocks (Yakutsk diamondiferous province). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):344-363. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363>. EDN: GNUPHH.

### Введение

Поиск коренных месторождений полезных ископаемых по первичным ореолам рассеивания химических элементов довольно часто и успешно используется в практике геолого-разведочных работ<sup>1</sup>. Первичные ореолы рассеивания месторождений возникают в окружающих горных породах одновременно с формированием залежи полезных ископаемых или становлением рудосодержащей магматической колонны. Первичные ореолы рассеивания повторяют в расширенном объеме контур залежи (магматического тела) и иногда

протягиваются на сотни метров за ее пределы, подчиняясь магматическим, тектоническим, литолого-фациальным, стратиграфическим и структурным признакам, определявшим условия формирования месторождения. Это является благоприятным моментом для прогноза, поисков и разведки месторождения. Формирование первичных ореолов рассеивания сопровождается эпигенетическими изменениями вмещающего рудное тело пространства. В свою очередь, эпигенетические изменения (от греч. еpi – «после, сверх» и genesis – «возникновение») являются вторичными про-

<sup>1</sup> Ворошилов В.Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 104 с.



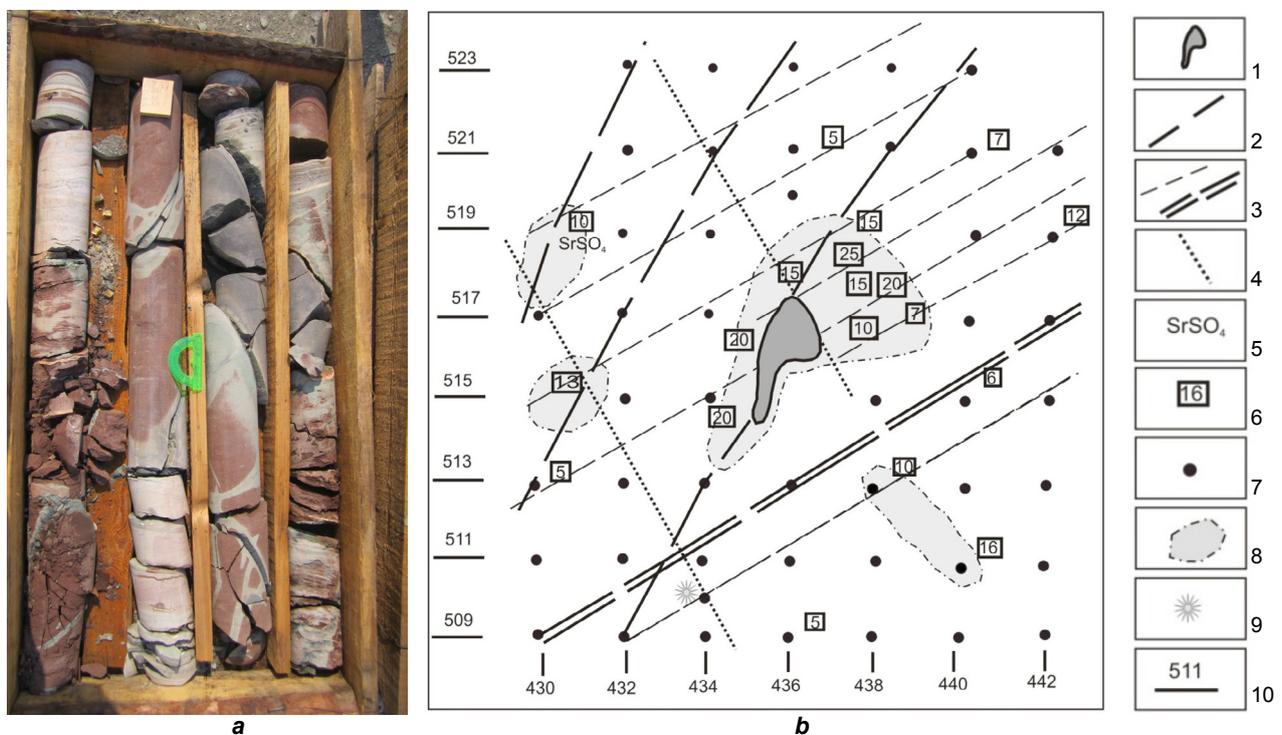
цессами, совершающимися через следующие одно за другим новообразования, которые обуславливают любые изменения минералов и горных пород, в том числе полезных ископаемых после их образования. Особенностью первичных ореолов рассеивания является их зональное строение – направленное и закономерное изменение соотношений между содержаниями элементов, что широко используется при литохимических поисках.

Несмотря на то что литогеохимический метод имеет максимальную разрешающую способность, вопрос о вовлечении в практику поисковых работ на алмазы по методу первичных ореолов рассеивания пока остается открытым [1]<sup>2</sup>. На сегодняшний день из-за специфики формирования коренных место-

рождений алмазов (трубка взрыва) поиск кимберлитовых тел по первичным ореолам рассеивания является менее эффективным, чем по вторичным ореолам. В связи с этим для его применения требуется постановка опытно-методических работ.

В настоящее время проведенные на ряде месторождений алмазов научно-исследовательские работы по изучению кимберлитомещающих пород выявили комплекс признаков первичных ореолов рассеивания, характерных для кимберлитовой природы [2, 3]. Прежде всего к ним относятся изменения, связанные с привносом и консервацией вторичных минералов (рис. 1).

Рассеивание вторичной минерализации в породах околотрубчатого пространства по-



**Рис. 1. Первичные ореолы рассеивания вблизи месторождения трубки «Ботуобинская» [2]:**

*a* – сетчатое и прожилковое осветление (скважина 514-1, интервал 281–285 м);

*b* – локальные ореолы экстенсивной пиритизации:

- 1 – контур трубки «Ботуобинская»; 2 – диагональный разлом; 3 – швы Ботуобинского разлома;
- 4 – шов поперечного разлома; 5 – проявления целестиновой минерализации; 6 – мощность экстенсивности пиритизации; 7 – скважины с отсутствием экстенсивной пиритизации или ее мощностью менее 1 м;
- 8 – ореол экстенсивной пиритизации; 9 – взрывные брекчии; 10 – линии скважин

**Fig. 1. Primary dispersion halos near the Botuobinskaya pipe deposit [2]:**

*a* – reticulate and veinlet clarification (514-1 well, 281–285 m interval);

*b* – local halos of extensive pyritization:

- 1 – Botuobinskaya pipe contour; 2 – diagonal fault; 3 – Botuoba fault sutures;
- 4 – transverse fault suture; 5 – manifestations of celestine mineralization; 6 – pyritization extensiveness thickness; 7 – wells lacking extensive pyritization or pyritization thickness of less than 1 m;
- 8 – extensive pyritization halo; 9 – explosive breccias; 10 – well lines

<sup>2</sup> Серов И.В., Граханов О.С., Кошкарев Д.А., Агеенков Е.В., Бояров В.М., Герасимчук А.В. [и др.]. Прогнозирование и поиски коренных месторождений алмазов на Сибирской платформе: метод. пособие / под ред. А.В. Толстова. Мирный: Изд-во АК «АЛРОСА», 2020. 155 с.



мимо их литолого-фациальных особенностей зависит от давления, связывающего процесс кимберлитовнедрения со взрывными явлениями [4–7]. В ходе взрыва происходит уплотнение пород в околотрубочном пространстве, возникновение в них полей термоупругих напряжений на подобии тех, что возникают в результате подземного ядерного взрыва. В процессе становления кимберлитовой трубки вмещающие породы вблизи от контакта диатремы могут испытывать разного типа тектонические деформации на макро- (рис. 2) и

микроуровнях (рис. 3). Но если первые, как правило, располагаются вблизи (первые метры) от контакта с диатремой, то вторые могут распространяться на более значительные расстояния (см. рис. 1, b).

Таким образом, согласно имеющейся информации, важно отметить следующие моменты:

– формы и размеры первичных ореолов рассеивания могут заметно варьировать, что зависит от особенностей геологического строения той или иной кимберлитовой трубки (месторождения);



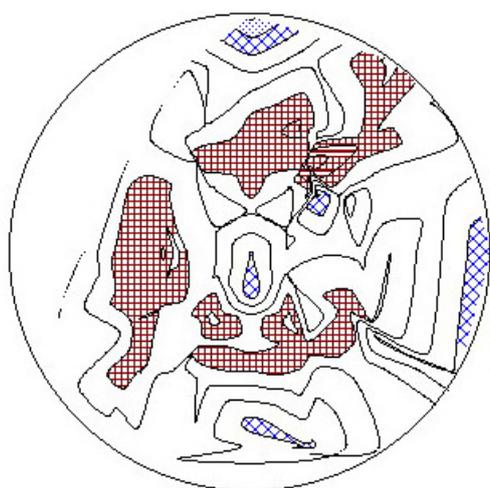
a



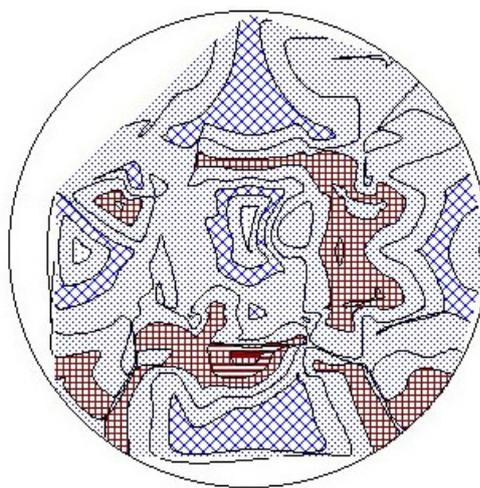
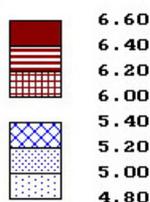
b

**Рис. 2. Приконтактные деформации пород карбонатного цоколя на контакте с кимберлитами трубками «Айхал» (a) и «Комсомольская» (b)**

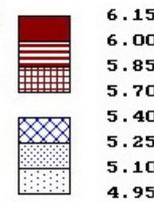
**Fig. 2. Near-contact deformations of carbonate basement rocks at the contact with Aikhal kimberlite pipe (a) and Komsomolskaya kimberlite pipe (b)**



a



b



**Рис. 3. Диаграммы, отражающие ударный характер деформаций кимберлитовмещающих пород на месторождении трубки «Нюрбинская» [3]:**

a – долерит на контакте с кимберлитами (образец H-16-150-306, глубина отбора – 306 м);  
b – перекристаллизованный доломит в околотрубочном пространстве (образец 568-421-185, глубина отбора – 185 м)

**Fig. 3. Diagrams reflecting the shock nature of kimberlite rock deformations at the Nyurbinskaya pipe deposit [3]:**

a – dolerite at the contact with kimberlites (sample H-16-150-306, sampling depth – 306 m);  
b – recrystallized dolomite in the near-pipe space (sample 568-421-185, sampling depth – 185 m)



– логично предположить, что окружающие рудные тела эпигенетически измененные горные породы могут менять и свои исходные физические свойства (плотность, намагниченность, проводимость и т. п.). Так возникают петрофизические неоднородности или петрофизические аномалии – часть геологического пространства (таксон), в котором наблюдаются изменения первоначальных магнитных характеристик горных пород в результате воздействия различных физико-химических процессов [8–10]. Их вещественная регистрация является актуальной для петрофизических исследований с целью обоснования построения петрофизической модели [11] и выбора на ее основе соответствующего физическим эффектам оптимального комплекса геофизических методов поиска месторождений полезных ископаемых по петрофизическим неоднородностям или аномалиям. В этой связи необходимо показать практическую возможность одного из петрофизических параметров по обнаружению петрофизических неоднородностей или аномалий околотрубного пространства и связанных с ним потенциальных геофизических полей.

Цель проведенного исследования состояла в повышении качества поисковых геолого-геофизических работ на основе изучения петрофизических неоднородностей или аномалий. Основная задача заключалась в выборе петрофизических методов, способных фиксировать тонкие изменения значений физических параметров кимберлитовмещающих пород.

### Материалы и методы исследования

С начала алмазопроисловых работ в Якутской алмазонасной провинции постоянно ведутся петрофизические исследования всех структурно-вещественных комплексов, в том числе вмещающих кимберлиты терригенно-карбонатных пород [12]. В основном изучение физических свойств проведено по результатам геофизических исследований скважин (каротаж), лабораторных измерений керна и образцов, отобранных в ходе геологических маршрутов. В комплекс изучения физических свойств горных пород входят измерения объемной плотности, магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности, удельного электрического сопротивления, проводимости, радиоактивности и др.

В процессе проведения петрофизических исследований структурно-вещественных комплексов Якутской алмазонасной провинции собран уникальный материал по магнитным свойствам горных пород. Для изучения этих параметров использовались ориентированные в современной системе координат образцы [13] (ориентированный образец – образец горной породы, положение которого определено в пространстве), которые отбирались с помощью горного компаса из горных пород с ненарушенными элементами залегания в естественных и искусственных обнажениях.

Опыт петрофизических работ показал, что первичные измерения тех или иных физических параметров не всегда подходят для решения поставленной задачи, что объясняется их большой дисперсией. Поэтому нам следует остановиться на прецизионных методах, которые позволяют однозначно интерпретировать полученные материалы и в то же время являются высокопроизводительными. К ним можно отнести следующие магнитометрические анализы [14], которые вполне реально выполнять в производственных условиях.

1. Анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ) [15, 16]. Несмотря на то что измерение магнитной восприимчивости  $\chi$  входит в комплекс методов каротажа поисковых скважин, ее анизотропия ранее не изучалась. Метод изучения АМВ может быть востребован для измерения петроструктуры горных пород с целью определения их происхождения и эволюции. Более наглядно АМВ можно представить в виде эллипсоида, где она достигает наивысшей интенсивности вдоль длинной оси  $K_1$ , а наименьшей – вдоль короткой оси  $K_3$  (рис. 4).

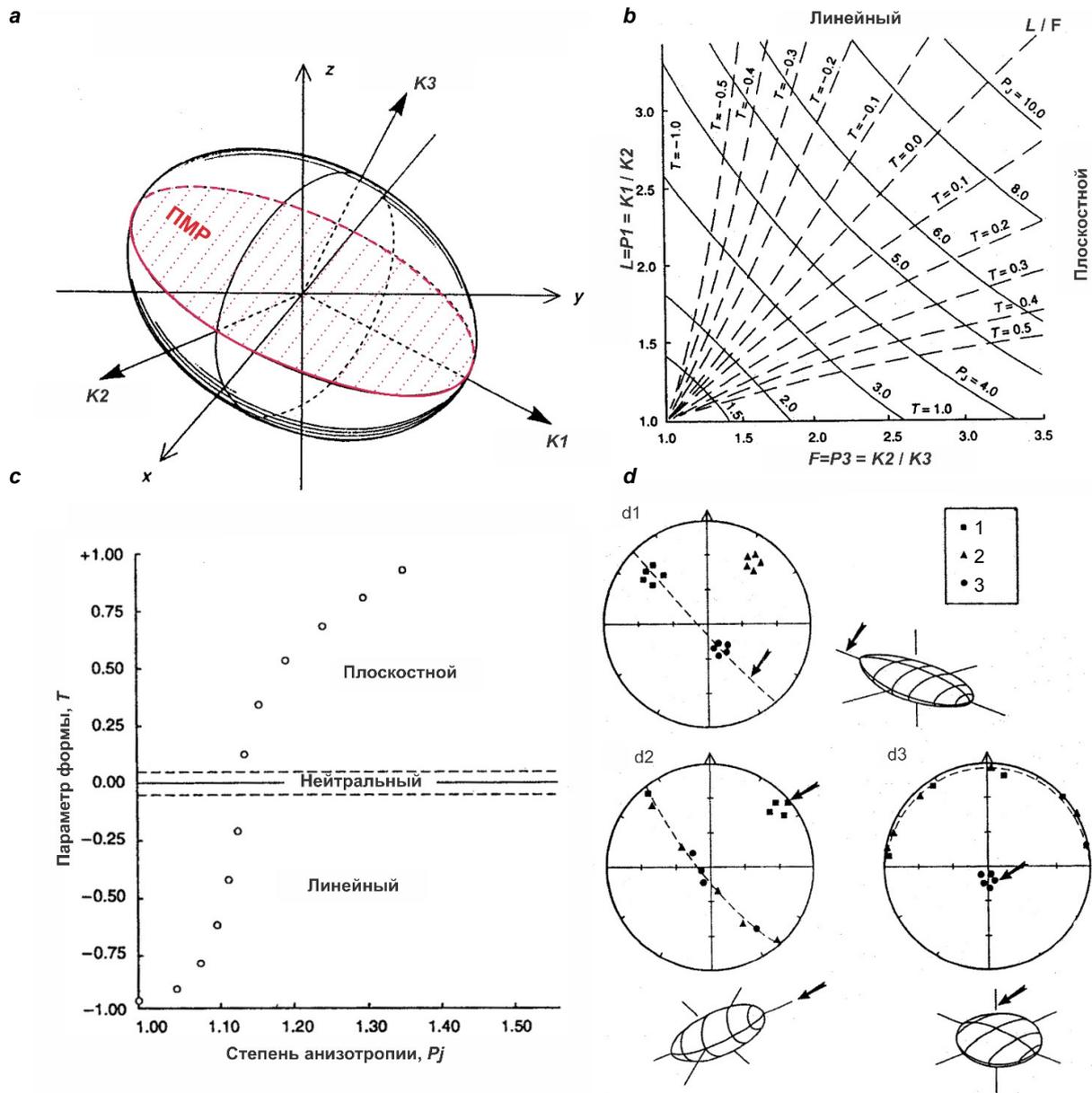
Традиционно используемый параметр величины АМВ представляет собой отношение максимального и минимального значений восприимчивости, именуемое степенью анизотропии:

$$P = P_2 = K_1 / K_3.$$

Эксцентриситет эллипсоида можно выразить несколькими способами, главным образом – через отношение осевых значений или через их разность. В основе ранее введенных параметров лежит отношение. Например, параметр линейности  $P_1$  и плоскости  $P_3$ :

$$P_1 = L = K_1 / K_2;$$

$$P_3 = F = K_2 / K_3.$$



**Рис. 4. Теоретические представления данных по изучению магнитной текстуры горных пород:**

**a** – эллипсоид анизотропии с ортогональными осями, то есть длинной  $K_1$ , средней  $K_2$  и короткой  $K_3$  – тензор, с помощью которого определяется анизотропия магнитной восприимчивости образца;

**b** – график зависимости степени анизотропии  $P_j$  и формы  $T$  от линейности  $L$  и плоскости  $F$ ;

**c** – график зависимости параметра формы  $T$  и степени анизотропии  $P_j$ ;

**d** – стереограммы данных по направлениям эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости образца: для трехмерных эллипсоидов ( $d_1$ ) с одинаковой ориентацией три главные оси образуют ясно различимые группы; для удлинённых эллипсоидов ( $d_2$ ) с одинаковой ориентацией длинные оси сгруппированы, а средние и короткие распределены по цепочке под углом  $90^\circ$  к длинным осям; у сплюснутых эллипсоидов ( $d_3$ ) с одинаковой ориентацией сгруппированы короткие оси, тогда как длинные и средние располагаются по окружности под углом  $90^\circ$  к коротким осям (1 – максимальная ось  $K_1$ ; 2 – средняя ось  $K_2$ ; 3 – минимальная ось  $K_3$ )

ПМП – плоскость магнитного расщепления

**Fig. 4. Theoretical presentation of data on rock magnetic texture study:**

**a** – anisotropy ellipsoid with orthogonal axes (long  $K_1$  axis, medium  $K_2$  axis and short  $K_3$  axis) – a tensor, which is used to determine the anisotropy of the magnetic susceptibility of the sample;

**b** –  $P_j$  anisotropy degree and  $T$  shape vs  $L$  linearity and  $F$  plane graph;

**c** –  $T$  shape parameter vs  $P_j$  anisotropy degree graph;

**d** – data stereograms along the directions of the anisotropy ellipsoid of magnetic susceptibility of the sample: three main axes form clearly distinguishable groups for the three-dimensional ellipsoids ( $d_1$ ) with the similar orientation; the long axes are grouped and the middle and short axes are cascaded at the angle of  $90^\circ$  to the long axes for elongated ellipsoids ( $d_2$ ) with the similar orientation; the short axes are grouped, while the long and medium axes are located around the circumference at the angle of  $90^\circ$  to the short axes for oblate ellipsoids ( $d_3$ ) with the similar orientation (1 –  $K_1$  maximum axis; 2 –  $K_2$  middle axis; 3 –  $K_3$  minimum axis)

ПМП – magnetic separation plane



Для определения параметра формы  $T$  эллипсоида анизотропии используется формула

$$T = \left[ \frac{2 \ln(K_2/K_3)}{\ln(K_1/K_3)} \right] - 1.$$

Эллипсоиды сплюсненной формы имеют положительные значения ( $0 < T \leq 1$ ), тогда как отрицательные значения ( $-1 \leq T < 0$ ) характерны для тел удлиненной формы (см. рис. 4, с). Для нейтральных эллипсоидов, по форме напоминающих так называемые плоскодеформированные эллипсоиды:  $T = 0$ , отсюда  $P_j = P$ .

Большой массив данных анизотропии можно представить в виде специальных графиков. При изучении магнитной анизотропии в особых целях используются графики зависимости линейности ( $L = P_j$  или  $\ln L$ ) от плоскости ( $F = P_3$  или  $\ln F$ ), так как эти графики (см. рис. 4, b) аналогичны графикам деформаций, обычно применяемым в структурной геологии. На графиках данного типа эксцентрические эллипсоиды наиболее удалены от начала координат, тела сплюсненной формы располагаются под прямой единичного градиента, а тела удлиненной формы – над ней. Кроме того, определить величину анизотропии структуры и ее форму наилучшим образом можно через параметры  $P_j$  и  $T$ . Оба параметра сопоставимы на графике (см. рис. 4, с), где  $P_j$  расположен вдоль горизонтальной оси ( $1 < P_j$ ), а  $T$  – вдоль вертикальной ( $-1 < T < 1$ ). Подобные графики позволяют четко различать величину и форму по линейному изменению значений на различных отрезках. По этой же причине график зависимости  $P_j$  от  $T$  рекомендуется использовать в структурных исследованиях, поскольку благодаря своей способности отображать АМВ он в равной степени применим и при изучении деформаций. Несмотря на общий характер применения графиков данного типа, существует мнение, что графики  $P_j$ – $T$  лучше отображают зависимость между формой и степенью анизотропии или деформации, поскольку они дают более четкое представление об эксцентриситете (степени деформации) и симметрии эллипсоида (сплюсненный или удлиненный). Зависимость между  $P_j$  и деформацией различна для разных типов пород, видов деформации и т. п.

Направления главных осей эллипсоида АМВ обычно указываются на равновеликой стереограмме нижнего полушария (см. рис. 4, d). Такие

стереограммы дают возможность быстро различать трехмерные, сплюсненные и удлиненные эллипсоиды, а также позволяют наносить их на график одновременно с другими характерными признаками. К наиболее значимым из них относится плоскость магнитного расслоения, которую образуют большие оси  $K_1$  и  $K_2$  (см. рис. 4, а). По плоскости магнитного расслоения эллипсоида АМВ можно оценить элементы залегания объекта, направление и относительную скорость движения материала. Кроме того, удобно совмещать и анализировать стереограммы векторов намагниченности со стереограммами элементов структурной геологии (простирающие породы, кливаж, трещиноватость и т. п.).

2. Измерения векторов естественной остаточной намагниченности (ЕОН,  $In$ ) ведутся только в лабораторных условиях [13]. Согласно «гипотезе сохранения», приобретенная первичная намагниченность сохраняется до настоящего времени и принципиально может быть выделена из суммарной многокомпонентной ЕОН. Гипотеза предполагает, что вектор  $In$  может содержать ряд остаточных намагниченностей, приобретенных горными породами за все время своего существования (рис. 5). Поэтому при компонентном анализе  $In$  горных пород мы можем столкнуться с несколькими ее разновидностями, которые классифицируются: по генезису – ориентационная  $Ino$ , термоостаточная  $In^t$ , химическая  $In^c$ , вязкая  $In^v$  и др.; по отношению к складчатости – до- $In^a$ , син- $In^s$  или постскладчатая  $In^p$ ; по времени образования – первичная  $In^0$  и метахронная  $In^m$ . Первичная (синхронная) остаточная намагниченность  $In^0$  – начальная остаточная намагниченность, синхронная начальной стадии образования горной породы и полностью или частично сохранившаяся в составе ЕОН к моменту измерения образцов<sup>3</sup>. Метахронная остаточная намагниченность  $In^m$  – хронологически вторичная (наложенная) компонента ЕОН любого происхождения, время образования которой заметно отдалено от времени первичного формирования горной породы<sup>3</sup>. Например,  $In^0$  может быть ориентационной или термоостаточной и одновременно доскладчатой. Вектор  $In^m$  может возникнуть химическим путем или под действием динамических нагрузок (Виллари-эффект) до, в процессе или после складкообразования и т. п.

<sup>3</sup> Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / сост. Д.М. Печерский, Д.Д. Соколов. 123 с.

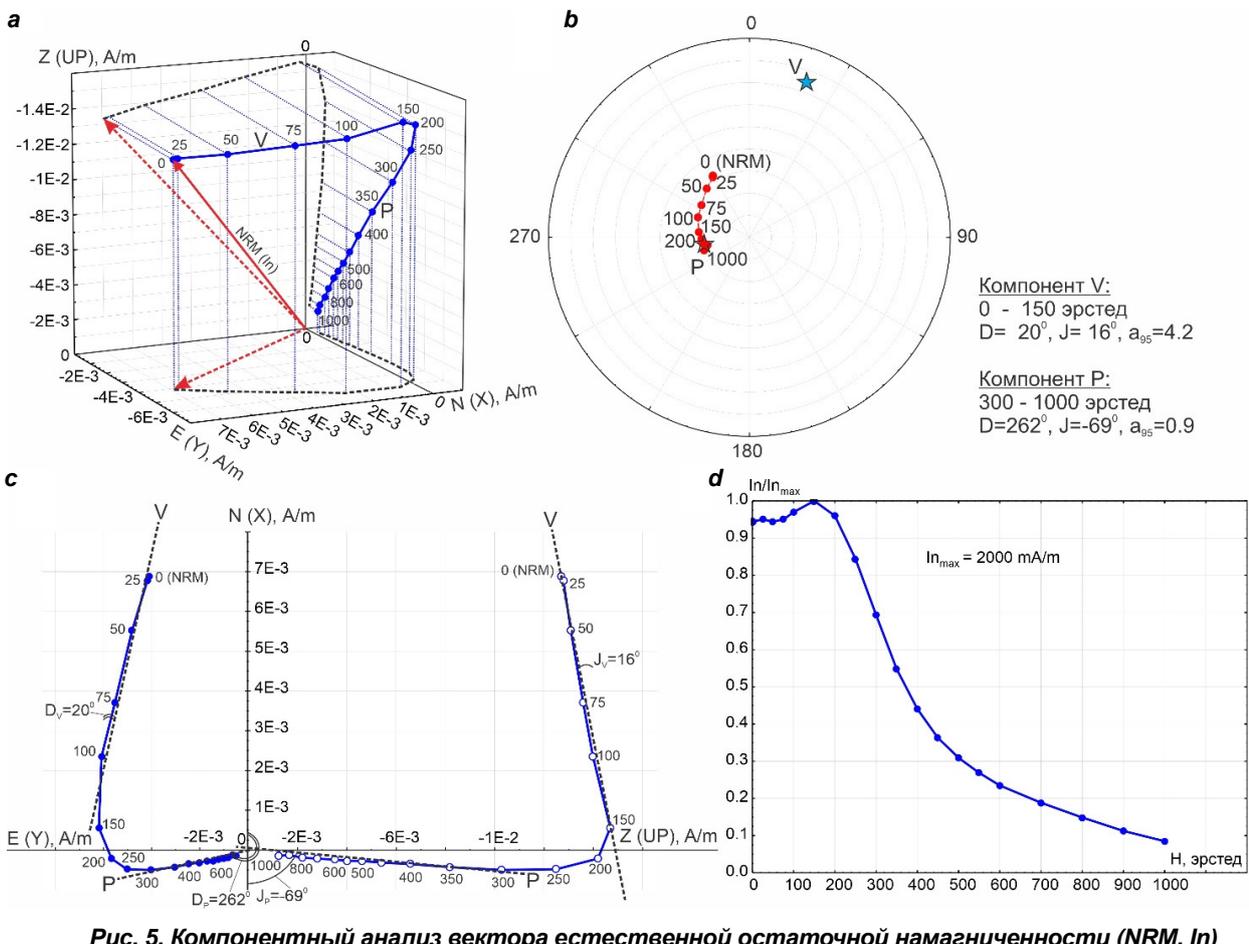


Таким образом, современная магнитная «память» горных пород может одновременно содержать некоторое множество палеомагнитных векторов (компонент) ЕОН:

$$I_n = I_n^0 + I_n^m + \dots + I_n^N,$$

которые в силу «гипотезы фиксации» (горные породы при своем становлении намагничиваются по направлению магнитного поля времени и места их образования) могут нести определенную информацию о сформировавших их геологических процессах. Любая вышеперечисленная компонента может быть выделена

из суммарной многокомпонентной  $I_n$  в ходе лабораторных экспериментов по размагничиванию переменным магнитным полем и температурой. Считается, что  $I_n^0$  является самой магнитожестью (высококоэрцитивной и высокотемпературной) компонентой по отношению к другим ее видам. Но в природе часто магнитная запись горных пород о событиях далекого прошлого может быть замаскирована или полностью стерта другими видами  $I_n$ , связанными с более поздними физико-химическими или геологическими процессами. Компоненты век-



**Рис. 5. Компонентный анализ вектора естественной остаточной намагниченности (NRM,  $I_n$ ) долеритов Алакитского силла по результатам размагничивания переменным магнитным полем:**

**a** – аксонометрическое изображение  $I_n$ ; **b** – стереографическая проекция: красные/синие фигурки – проекции вектора  $I_n$  на отрицательную/положительную полусферу, цифры – величина переменного магнитного поля  $H$ , звездочки – компоненты  $I_n$  низкокоэрцитивная  $V$  (вязкая  $I_n^m$ ) и высококоэрцитивная  $P$  (возможно, первичная  $I_n^0$ ) соответственно; **c** – диаграмма Зийдверельда: залитые и полые кружочки – проекции  $I_n$  на плоскости (эпюры)  $XOY$  и  $XOZ$  соответственно, цифры – величина переменного магнитного поля, пунктирные линии – направления компонент  $V$  и  $P$ ; **d** – график размагничивания  $I_n$  от  $H$ , нормированный по  $I_n$  (max)

**Fig. 5. Component analysis of the natural remanent magnetization vector (NRM,  $I_n$ )**

**of the Alakit sill dolerites based on the results of demagnetization by an alternating magnetic field:**

**a** –  $I_n$  axonometric image; **b** – stereographic projection: red/blue figures –  $I_n$  vector projections on the negative/positive hemisphere, numbers – the magnitude of the  $H$  alternating magnetic field, asterisks –  $I_n$  components: low-coercivity  $V$  (viscous  $I_n^m$ ) and high-coercivity  $P$  (possibly primary  $I_n^0$ ) components respectively; **c** – Zijderveld diagram: solid and open circles are  $I_n$  projections on the  $XOY$  and  $XOZ$  plane (diagrams), respectively, numbers show the magnitude of the alternating magnetic field, dotted lines –  $V$  and  $P$  component directions; **d** –  $I_n$  vs  $H$  demagnetization graph normalized by  $I_n$  (max)



тора  $In$ , которые претендуют на последующее получение палеомагнитного результата (то есть могут оказаться синхронным изучаемому геологическому событию прошлого), принято обозначать как характеристические ( $In^{ch}$ ) [17]. Характеристическая остаточная намагниченность  $In^{ch}$  – наиболее стабильная компонента ЕОН, выделенная в ходе магнитной чистки, на диаграмме Зийдвервельда идущая в нуль. Для датировки и оценки природы характеристической остаточной намагниченности необходим комплекс дополнительных исследований<sup>3</sup>.

Обычно  $In^{ch}$  определяют по прямым, стремящимся в центр диаграммы Зийдвервельда (см. рис. 5, а, с). По результатам компонентного анализа векторов ЕОН определялись устойчивые группировки (кластеры) векторов  $In^{ch}$ : компоненты  $V$  и  $P$  (см. рис. 5, а–с).

Для доказательства природы  $In^{ch}$  необходим комплекс, позволяющий в той или иной мере однозначно определить величину и направление геомагнитного поля в точке исследований, привязанное ко времени некоторого геологического события. Комплекс включает три группы признаков: геологические, физические и геофизические<sup>3</sup>.

В общем, предложенные АМВ и палеомагнитные методы позволяют установить для кимберлитовмещающих пород изменение петроструктуры и относительное время проявления наложенных процессов соответственно.

### Результаты исследования и их обсуждение

В ходе многолетних петрофизических исследований для кимберлитовмещающих образований раннего – среднего палеозоя

Якутской алмазоносной провинции основным минералом-носителем намагниченности является гематит с точками Кюри 650–670 °С (рис. 6).

Для эпигенетически стерильных пород терригенно-карбонатного цоколя характерен «осадочный» геотип АМВ: плоскость магнитного расслоения субгоризонтальная, параметр формы  $T$  стремится к 1, а  $F \gg L$  (рис. 7, а) [19]. Стереограмма и параметры  $P$ ,  $T$ ,  $F$  и  $L$  песчаников, отобранных из керна вертикальных скважин, также имеет «осадочный» тип, но только в этом случае большие оси  $K1$  и  $K2$ , хоть и образуют субгоризонтальную плоскость магнитного расслоения, но не будут зафиксированы по склонению из-за вращения образца в керноприемнике при бурении (рис. 7, б).

На ряде месторождений алмазов кимберлитовмещающие образования приобретают «гибридный» геотип АМВ: «осадочный» плюс «даечный» (рис. 7, с). Характерный «даечный» геотип АМВ (плоскость магнитного расслоения субвертикальная, соответствует формированию дайки), согласно нашим экспериментальным исследованиям [9, 10], в осадочных породах может сформироваться в результате стресса (виллари-эффект, т. е. изменение намагниченности ферромагнетиков под давлением – эффект, обратный явлению магнитострикции) (рис. 7, d).

Таким образом, изменение «осадочного» геотипа АМВ на другие геотипы, не характерные для первичной литологической текстуры, например, «гибридный» геотип, будет означать влияние давления (стресса) со стороны внедрения кимберлитовой трубки.

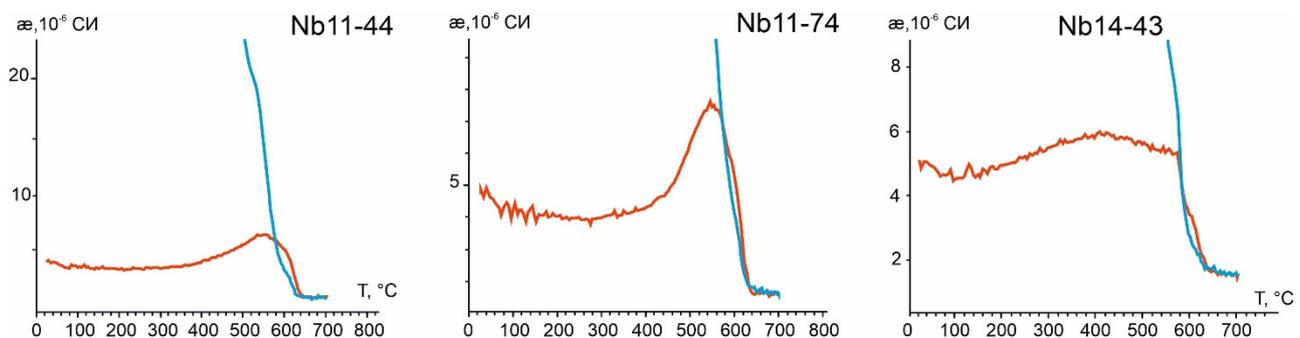
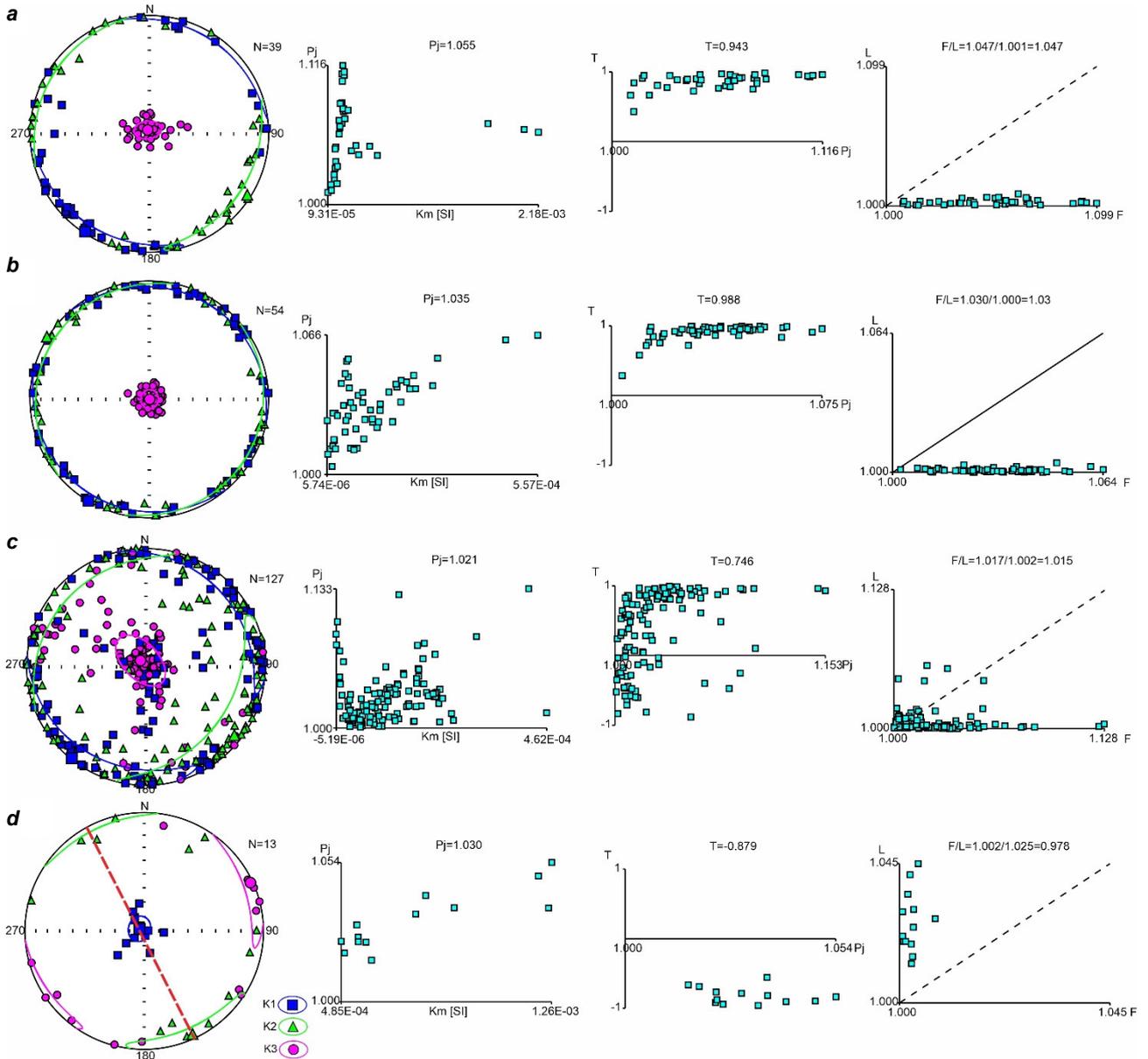


Рис. 6. Термомагнитограммы магнитной восприимчивости терригенно-карбонатных образований кимберлитовой трубки «Нюрбинская» [18]:

Красные/синие кривые – процесс нагрева/охлаждения образца

Fig. 6. Thermomagnetograms of magnetic susceptibility of Nyurbinskaya kimberlite pipe terrigenous-carbonate formations [18]:  
Red/blue curves show heating/cooling process of the sample



**Рис. 7. Анизотропия магнитной восприимчивости терригенно-осадочных горных пород Якутской алмазодержащей провинции [18, 19]:**

*a, d – алевро-песчаники аппайнской свиты р. Ыгыатты (a – обнажение 10-24; d – обнажение 10-26);  
b – терригенно-карбонатные образования, вмещающие кимберлитовую трубку «Заполярная»  
(гидрогеологическая скважина 501Г, месторождение Верхнемунское);  
c – терригенно-карбонатные образования, вмещающие кимберлитовую трубку «Нюрбинская»  
Красная штриховая линия – плоскость магнитного расслоения*

**Fig. 7. Anisotropy of magnetic susceptibility of terrigenous-sedimentary rocks of the Yakutsk diamondiferous province [18, 19]:**

*a, d – silt-sandstones of the Appain formation of the Ygyatty river (a – outcropping 10-24; d – outcropping 10-26);  
b – terrigenous-carbonate formations hosting the Zapolyarnaya kimberlite pipe  
(hydrogeological well 501G, Verkhnemunskoye field);  
c – terrigenous-carbonate formations hosting the Nyurbinskaya kimberlite pipe  
Red dashed line indicates a magnetic separation plane*

Теперь рассмотрим, как изменяется компонентный состав векторов ЕОН на разном удалении от контакта кимберлитовой трубки. Для начала отметим, что для кимберлитов трубки

«Нюрбинская» (образец Nrb14-32t2) характерны пологие отрицательные векторы ЕОН в север-северо-восточном румбах – высокотемпературная (550–570 °С) магнетитовая компо-



нента  $M$  (рис. 8, а) [18]. В то же время векторы ЕОН кимберлитовмещающих пород содержат разные компоненты:

1. В образце Nrb15-125t2, удаленном на более чем 100 м, четко выражен однокомпонентный ( $Hm$ ) состав векторов ЕОН до блокирующих температур до 700–705 °С (рис. 8, b).

2. У образца Nrb11-46t2, расположенного в пределах от 30 до 70 м от контакта трубки, установлен двухкомпонентный состав векторов ЕОН. Выделяются средне- и высокотемпературные векторы ЕОН (рис. 8, c), соответственно, магнетитовая  $M$  (300–500 °С) и гематитовая (575–700 °С). Понятно, что последняя – первичная осадочной природы ( $Hm$ ), а первая – метаксонная ( $M$ ) – определена кимберлитовой природой.

3. В образце Nrb14-10t3, отобранном непосредственно из экзоконтакта трубки, обнаружены две компоненты вектора ЕОН (рис. 8, d) – пирротиновая  $P$  (200–350 °С) и магнетитовая (350–500 °С). Несмотря на то что компонента  $P$  значительно превосходит компоненту  $M$ , их направления совпадают. Пирротиновая компонента  $P$  явно сформировалась за счет инфильтрации и консервации во вмещающие породы кимберлитового расплава.

Палеомагнитные данные по трубке «Нюрбинская» следует рассматривать в качестве геофизического теста «контакта» [13], доказывающего первичную природу и возраст векторов ЕОН кимберлитов. Их следы (компонента  $M$ ) сохранились в кимберлитовмещающих породах и свидетельствуют о существенном влиянии процессов кимберлитовнедрения.

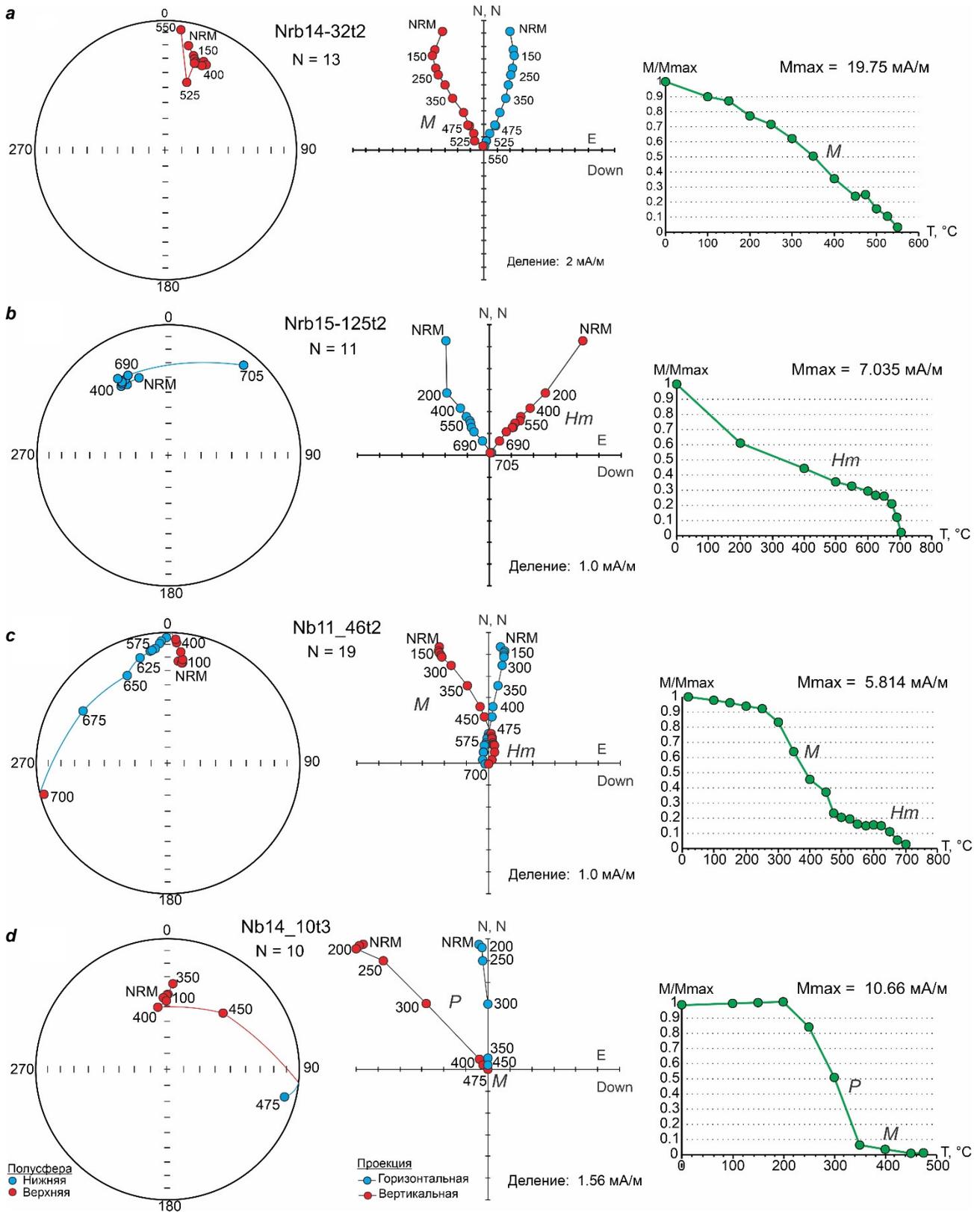
Проведенные исследования установили, что в терригенно-осадочных образованиях вокруг кимберлитовых трубок формируются не только первичные ореолы рассеивания химических элементов и минералов (см. рис. 1), но и «первичные ореолы» изменения петрофизических параметров: петрофизические неоднородности или петрофизические аномалии – это часть геологического пространства (таксон), в котором наблюдаются изменения первоначальных физических (плотностных, магнитных и пр.) характеристик горных пород в результате воздействия различных физико-химических процессов, в том числе связанных с внедрением кимберлитов [8–10, 12]. Поскольку эти изменения происходят на микро- и наноуровнях, то необходимо разра-

ботать надежную методику их регистрации и интерпретации. Например, первичные измерения  $\alpha$  или кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  в силу большой дисперсии значений этих параметров не всегда могут быть однозначными, то применение прецизионных методов исследования (анизотропия различных физических параметров, компонентный анализ ЕОН) по сравнению с ними более информативны.

В ходе специальных петро- и палеомагнитных исследований было наглядно показано влияние давления и температуры на окружающее кимберлитовые трубки терригенно-осадочные образования (см. рис. 7, 8). Смена АМВ с «осадочного» геотипа на «гибридный» или «даечный» как раз и является следствием термоупругих напряжений и связанного с ними сейсмомагнитного (тектономагнитного) эффекта [9, 10]. Термоупругие напряжения, в зависимости от компетентности литологического разреза, могут распространяться на разные расстояния от кимберлитовой трубки. Эти напряжения также будут сопровождаться изменениями магнитной текстуры и структуры, что мы и надежно регистрируем в образцах в отличие от собственно объемной плотности. Петрофизические неоднородности или петрофизические аномалии постепенно исчезают и переходят в «стерильные» («фоновые») образования. Этот количественный переход (зависит от технических возможностей аппаратуры) от «аномальных» к «фоновым» является «петрофизическим барьером», который можно наблюдать на микро- или наноуровнях. Первые, как результат инфильтрации и консервации флюидов во вмещающие породы (см. рис. 1), могут также регистрироваться при литохимических поисках<sup>1</sup> [1]. Вторые характеризуются более тонкими эффектами и поэтому могут распространяться на значительно более существенные расстояния по сравнению с первыми. Таким образом, кимберлитовмещающие образования могут нести информацию, связанную с нахождением поблизости кимберлитовой трубки (рис. 9) [19].

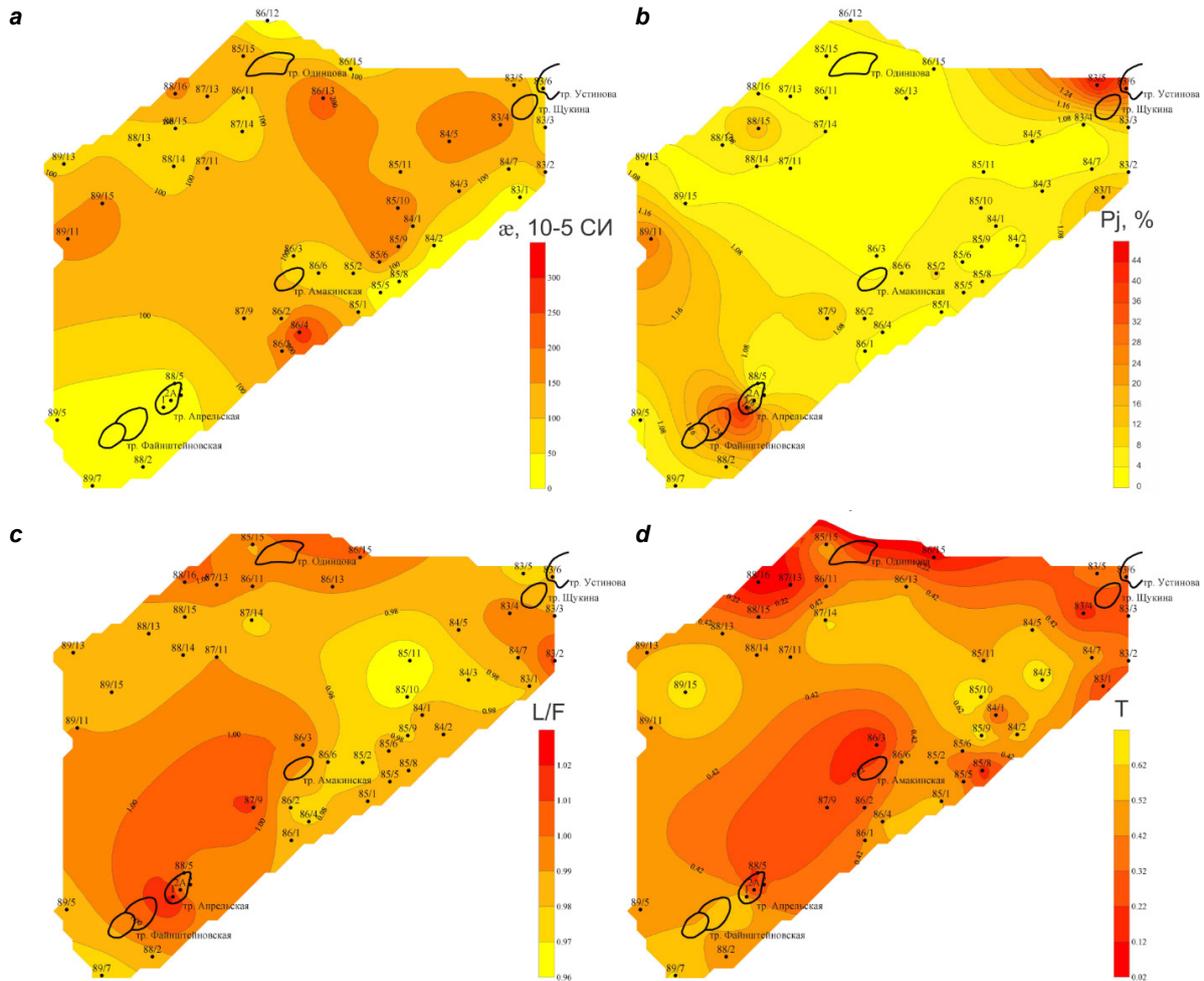
С другой стороны, петрофизические неоднородности или аномалии стресса могут создавать плотностные барьеры во вмещающих породах, на которые чутко реагируют и более молодые магматические образования. Известны многочисленные случаи<sup>4</sup> [20, 21], когда вблизи

<sup>4</sup> Никулин В.И., Лелюх М.И., Фон-дер-Флаасс Г.С. Алмазпрогностика (концепция и методология): метод. пособие. Иркутск: Изд-во НПФ «Алмаз-Прогноз», 2002. 320 с.



**Рис. 8.** Изучение компонентного состава естественной остаточной намагниченности образцов кимберлитов (а) и вмещающих пород (б–д) трубки «Нюрбинская» (гематитовая *Hm* – первичная, магнетитовая *M* и пирротиновая *P* – метакхронные)

**Fig. 8.** Study of the component composition of natural residual magnetization of the samples of kimberlites (a) and host rocks (b–d) of the Nyurbinskaya pipe (hematite *Hm* – primary component, magnetite *M* and pyrrhotite *P* – metachronous component)



**Рис. 9. Планы изотроп параметров анизотропии магнитной восприимчивости пород карбонатного цоколя участка «Полигон» [19]:**

**a – магнитной восприимчивости; b – степени анизотропии; c – отношения линейной анизотропии к плоскостной; d – параметра формы эллипсоида анизотропии**

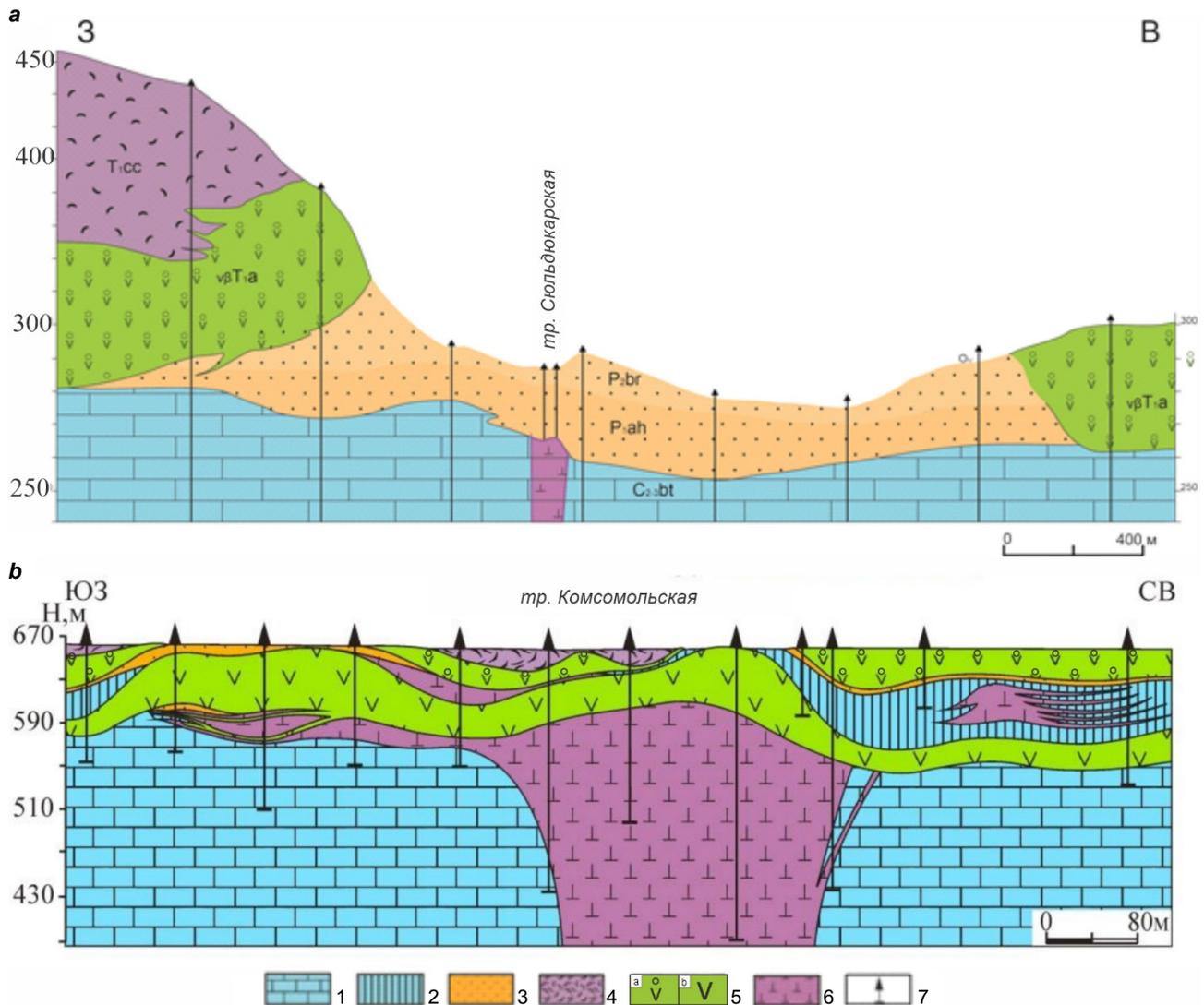
**Fig. 9. Views of isotropic parameters of magnetic susceptibility anisotropy of carbonate basement rocks of the Polygon site [19]:**

**a – magnetic susceptibility; b – degrees of anisotropy; c – ratio of linear anisotropy to planar anisotropy; d – anisotropy ellipsoid shape parameter**

кимберлитов в силах долеритов происходит резкое двух-, трехкратное увеличение их мощности, изменение своего первоначально горизонтального залегания с задирианием вверх, могут сминаться («гормошиться») и щепиться на маломощные «языки», а в особых случаях образуют «трапповые окна» и даже «трапповые коридоры» (рис. 10) [22]. Особенно эти явления характерны для двух последних фаз базитового магматизма восточного фланга Тунгусской синеклизы [23]. Их особенностью является то, что вышезалегающая ранняя фаза была намагничена положительно, а ниже залегающая поздняя фаза – отрицательно [8, 24, 25]. Последняя перемагничивает все

ранние геологические образования (включая кимберлиты и базиты), создавая в них петромагнитные неоднородности или аномалии обжига и стресса [10].

Исходя из опыта геолого-геофизических работ на территориях 4 и 5 алмазопоисковых геотипов поиск кимберлитовых тел по аномалиям «трубчатого» типа малоэффективен<sup>2</sup>. В этом случае решение проблемы может быть получено косвенным путем – по аномалиям «структурного» типа [26]. К этому типу как раз можно отнести гравимагнитные аномалии, создаваемые пермотриасовыми траппами в зоне динамического влияния кимберлитовой трубки<sup>4</sup> [20–22]. Характерные геолого-петро-



**Рис. 10. Схематический геологический разрез поведения траппов [22]:**

- a* – второго петрохимического типа возле кимберлитовой трубки «Сюльдюкарская»;  
*b* – второго и третьего петрохимического типов, бронирующих кимберлитовую трубку «Комсомольская»:  
 1 – нижнепалеозойские терригенно-карбонатные отложения; 2 – перемещенные блоки нижнепалеозойских пород; 3 – пермские терригенные отложения; 4 – триасовые туфовые образования; 5 – траппы (а – II петрохимический тип, b – III петрохимический тип); 6 – кимберлиты; 7 – скважины

**Fig. 10. Schematic geological section of trap behavior [22]:**

- a* – second petrochemical type near the Syuldyukarskaya kimberlite pipe;  
*b* – second and third petrochemical types reserving the Komsomolskaya kimberlite pipe:  
 1 – Lower Paleozoic terrigenous-carbonate deposits; 2 – transported Lower Paleozoic rock blocks;  
 3 – Permian terrigenous deposits; 4 – Triassic tuff formations; 5 – traps (a – II petrochemical type, b – III petrochemical type); 6 – kimberlites; 7 – wells

физические признаки базитов, выклинивающих на флангах кимберлитовых тел (см. рис. 10), должны отражаться и в геофизических (гравимагнитных) полях.

На рис. 11, а, с приведены варианты физико-геологических моделей разных структурных обстановок, которые могут иметь значение для поисков кимберлитов или перспективных на их обнаружение участков в процессе интерпретации данных геофизических съемок. Для их

идентификации необходимо решить прямую задачу геофизики по расчету ожидаемых аномальных эффектов от траппов. При физико-геологическом моделировании и анализе характера поведения траппов и их отражения в гравимагнитных полях использована программа ModelVisionPro-17.5 (Encom Technology, Австралия). Она позволяет строить петрофизические 3D-модели и сравнивать их имитированные характеристики с данными полевых наблюдений.

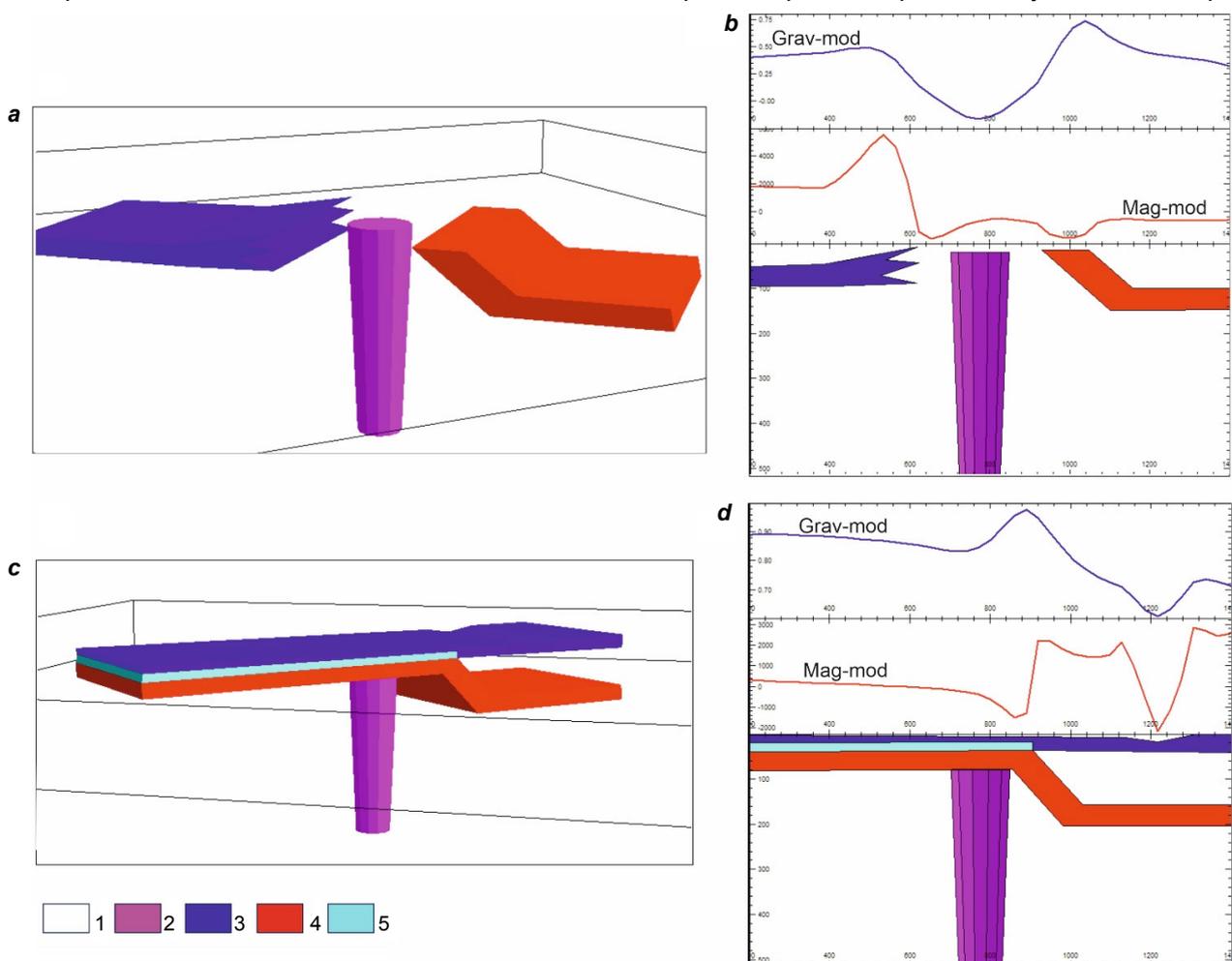


Программа автоматизирует процесс прямого моделирования, что позволяет проверить решение о пригодности той или иной детерминированной физико-геологической модели, а также предсказать некоторые свойства объектов. При построении петрофизических моделей использовались данные о физических свойствах горных пород (таблица) [12, 24, 25, 27]. Поскольку наши усилия сосредоточены на исследовании размещения траппов в верхней части разреза, то в процессе моделирования мы исходили из принципа, что объект поисков (кимберлиты) характеризуется слабо контрастными аномалиями на фоне вмещающих пород, в то время как объекты помех (разнофазные траппы) получили среднестатистические значения объемной

плотности и намагненности (см. таблицу).

В результате физико-геологического моделирования показан характер отражения траппов на флангах кимберлитовых тел. При резком выклинивании (см. рис. 10, а) они могут создавать в потенциальных полях гравитационные «ступени», контролирующиеся, в зависимости от знака намагненности, резкими положительными или отрицательными аномалиями (см. рис. 11, а, b).

В случае развития над кимберлитовой трубкой двух базитовых фаз внедрения (см. рис. 10, b) мы можем наблюдать аномалию «структурного» типа антиподную «трубочно-му» типу. Это объясняется тем, что силл долеритов третьей фазы, почувствовав перед



**Рис. 11. Физико-геологические 3D-модели поведения траппов вблизи кимберлитовых трубок:**

а, с – перспектива; b, d – разрезы

1 – вмещающие породы; 2 – кимберлиты; 3 – долериты второй фазы;

4 – долериты третьей фазы; 5 – петромагнитные неоднородности второго типа (обжига)

Для расчета гравимагнитного эффекта использовались значения из таблицы

**Fig. 11. Physico-geological 3D models of trap behavior near kimberlite pipes:**

a, c – perspective; b, d – sections

1 – host rocks; 2 – kimberlites; 3 – second phase dolerites;

4 – third phase dolerites; 5 – petromagnetic heterogeneities of the second type (burning)

Gravimagnetic effect was calculated on the basis of the table values



**Значения петрофизических параметров, принятых для построения петрофизических моделей на рис. 11**

**Values of petrophysical parameters adopted for petrophysical modeling in Fig. 11**

Номер условного обозначения	Тип пород	$\sigma$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha$ , 10 <sup>-5</sup> СИ	$ln$ , 10 <sup>-3</sup> А/м	$D$ , град.	$J$ , град.	$Q$ , ед.
1	Вмещающие породы	2670	Практически не магнитные				
2	Кимберлиты	2550	100	40	350	70	0,6
3	Долериты второй фазы	2950	1000	2500	50	70	4
4	Долериты третьей фазы	3000	1200	920	270	-70	1,5
5	Петромагнитные неоднородности второго типа (обжига)	2950	1000	500	300	-10	0,8

собой препятствие, стал огибать кимберлитовую трубку. В результате он подошел к подошве силла второй фазы и полностью ее перемагнитил. В результате над трубкой мы наблюдаем положительную гравитационную и резкую отрицательную магнитную аномалии (см. рис. 11, с, d). Первая обусловлена подъемом с нижнего горизонта плотных образований (долериты,  $\approx 3000$  кг/м<sup>3</sup>). С учетом того, что долериты третьей фазы отрицательно намагничены, то они сформировали петромагнитные неоднородности второго типа (обжига) в вышележающих горных породах (долериты и туфы ранней фазы). Это способствовало образованию контрастной отрицательной магнитной аномалии над трубкой. Отрицательная магнитная аномалия может быть связана и с уменьшением мощности силла долеритов (речная долина, линзы туфов). Но в данном случае будет наблюдаться не повышенная, а пониженная гравитационная аномалия.

Необходимо отметить, что амплитуда, характер и размер магнитных аномалий (см. рис. 11, b, d) допускают эффективное обнаружение и картирование перспективных обстановок с помощью детальной магнитной съемки, которую, учитывая современный уровень магниторазведки, наиболее целесообразно проводить в варианте с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в наиболее крупных масштабах – 1:500–1:2000 [28, 29]. К сожалению, на данный момент мы не располагаем аналогичными по производительности технологиями БПЛА-гравиразведки, обеспечивающими необходимую чувствительность, но можно надеяться, что в перспективе ближайших лет станет возможным проводить

и комплексные БПЛА-гравимагнитные съемки, которые позволят решать задачу поисков с максимальной достоверностью.

**Заключение**

Петро- и палеомагнитные исследования ориентированных образцов раннепалеозойских пород карбонатного цоколя, отобранных в зоне динамического влияния кимберлитовой трубки, показали следующее:

1. При формировании кимберлитовых диатрем в кимберлитовмещающей среде возникают поля термоупругих напряжений, характеризующиеся эпигенетическими изменениями и связанными с ними петрофизическими неоднородностями или аномалиями обжига и/или стресса.
2. Петромагнитные неоднородности или аномалии в кимберлитовмещающих породах будут отражаться в изменении характера АМВ (от осадочного до даечного геотипа) и наличием векторов метакронной ЕОН.
3. Размеры петромагнитных неоднородностей или аномалий в плане могут значительно превышать размеры собственно кимберлитовой трубки, что способствует выделению и оконтуриванию наиболее перспективных участков при поисковом бурении.
4. Благодаря магнитоупругому эффекту вблизи кимберлитовых тел образуются зоны, труднопроницаемые для базитовых магм. Это объясняет их выклинивание вдоль петрофизических барьеров: расщепление на маломощные «языки», образование безтрапповых «окон» и «коридоров», торообразных валов с резко возрастающей в интрузивах мощностью и т. п. Обладая относительно повышенными зна-



чениями магнитных и плотностных параметров, такие магматические образования будут отражаться в наблюдаемых геофизических полях характерными аномалиями структурного типа.

5. Наиболее оптимальным способом для поисков таких аномалий с учетом полученных результатов моделирования следует считать

БПЛА-магниторазведку наиболее крупных масштабов.

Таким образом, петромагнитные неоднородности или аномалии целесообразно рассматривать в качестве важного петрофизического поискового критерия обнаружения коренных кимберлитовых тел.

#### Список источников

1. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Геохимические поиски месторождений алмазов в пределах Алаakit-Мархинского кимберлитового поля // Вопросы естествознания. 2018. № 2. С. 44–48. EDN: XZLDML.
2. Игнатов П.А., Новиков К.В., Шмонов А.М., Разумов А.Н., Килижиков О.К. Сравнительный анализ рудовмещающих структур Майского, Мархинского и Озерного кимберлитовых тел Накынского поля Якутии // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2. С. 125–131. <https://doi.org/10.21285/10.7868/S0016777015020033>. EDN: TPWJWR.
3. Игнатов П.А. Методы обнаружения скрытых рудоконтролирующих структур в осадочных толщах на примерах месторождений урана и алмазов // Фундаментальные проблемы геологии месторождений полезных ископаемых и металлогении: материалы XXI Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию акад. В.И. Смирнова. М.: МАКС Пресс, 2010. В 2 т. Т. 1. С. 169–186.
4. Костровицкий С.И. Физические условия, гидравлика и кинематика заполнения кимберлитовых труб / отв. ред. М.М. Одинцов. Новосибирск: Наука, 1976. 96 с.
5. Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.
6. Некрасов И.Я., Горбачёв Н.С. О возможном механизме образования кимберлитов // Доклады Академии наук СССР. 1978. Т. 240. № 1. С. 181–184.
7. Никишов К.Н. Петролого-минералогическая модель кимберлитового процесса / отв. ред. В.В. Ковальский. М.: Наука, 1984. 213 с.
8. Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермо-триасовых траппов Далдыно-Алаakitского алмазоносного района (Западная Якутия) // Литосфера. 2014. № 2. С. 77–98. EDN: SGPOVZ.
9. Константинов К.М., Киргуев А.А., Хороших М.С. Петромагнитные неоднородности стресса: прикладное следствие Виллари-эффекта // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 24. № 2. С. 29–38. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-29-38>. EDN: UZSKPQ.
10. Константинов И.К., Константинов К.М., Хороших М.С., Киргуев А.А., Орлова Г.В. Анизотропия магнитной восприимчивости петромагнитных неоднородностей зон обжига и стресса осадочных и магматических горных пород // Геофизика. 2023. № 4. С. 41–49. <https://doi.org/10.34926/geo.2023.75.92.007>. EDN: LCABXV.
11. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 193 с.
12. Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород. М.: Изд-во ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 695 с.
13. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология / под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.
14. Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л.: Недра, 1977. 183 с.
15. Jelínek V. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility on a slowly spinning specimen – basic theory // Agico Print no. 10. Brno, 1997. P. 1–27.
16. Tarling D.H., Hroudá F. The magnetic anisotropy of rocks. London: Chapman & Hall, 1993. 217 p.
17. Zijdeveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results // Methods in paleomagnetism / eds D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn. Vol. 3. Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.
18. Константинов К.М., Яковлев А.А., Антонова Т.А., Константинов И.К., Ибрагимов Ш.З., Артемова 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>. EDN: YPOZID.
19. 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. EDN: YWMSHU.
20. Зинчук Н.Н. Об основных геологопоисковых обстановках при прогнозировании кимберлитовых труб / Наука



и образование. 2016. № 4. С. 7–15. EDN: XYFZCP.

21. Крючков Л.И., Никулин В.И., Красинец С.С., Лелюх М.И., Любименко В.Ф., Сомов С.В. [и др.]. Условия локализации и особенности строения кимберлитового тела в Айхальском районе // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 61–69.

22. Томшин М.Д., Гоголева С.С. Морфология трапповых силлов вблизи кимберлитов // Литосфера. 2023. Т. 23. № 4. С. 579–588. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-579-588>. EDN: VZFUFH.

23. 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.

24. 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>. EDN: XPEQYO.

25. 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. EDN: FQKOIB.

26. Константинов К.М., Гладков А.С. Динамическая физико-геологическая модель месторождения алмазов кимберлитовой трубки Комсомольская (Алакит-Мархинское поле Западной Якутии) // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 5. С. 0678. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0678>. EDN: IDAGIA.

27. 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 // Геофизика. 2012. № 6. С. 64–72. EDN: RZDIMT.

28. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

29. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geo-Spatial Information Science. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>. EDN: XXHXRZ.

### References

1. Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Geochemical prospecting of diamond deposits within the Alakit-Markha kimberlite field bounds. *Voprosy estestvoznaniya*. 2018;2:44–48. (In Russ.). EDN: XZLDML.

2. Ignatov P.A., Novikov K.V., Shmonov A.M., Razumov A.N., Kilizhekov O.K. Comparative analysis of ore-bearing structures in Maiskoe, Markha, and Ozernoe kimberlite bodies at the Nakyn field, Yakutia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2015;57(2):125–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/10.7868/S0016777015020033>. EDN: TPWJWR.

3. Ignatov P.A. Detection methods of hidden ore-controlling structures in sedimentary strata on the examples of uranium and diamond deposits. In: *Fundamental'nye problemy geologii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh i metallogenii: materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 100-letiyu akad. V.I. Smirnova = Fundamental problems of geology of mineral deposits and metallogeny: proceedings of the 21<sup>st</sup> International scientific conference, dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of Academician V.I. Smirnov*. Moscow: MAKS Press; 2010, vol. 1, p. 169–186. (In Russ.).

4. Kostrovitskii S.I. *Physical conditions, hydraulics and kinematics of kimberlite pipes filling*. Novosibirsk: Nauka; 1976, 96 p. (In Russ.).

5. Milashev V.A. *Explosion tubes*. Leningrad: Nedra; 1984, 268 p. (In Russ.).

6. Nekrasov I.Ya., Gorbachev N.S. Possible kimberlite formation mechanism. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1978;240(1):181–184. (In Russ.).

7. Nikishov K.N. *Petrological and mineralogical model of the kimberlite process*. Moscow: Nauka; 1984, 213 p. (In Russ.).

8. Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Kovalchuk O.E. Petro-magnetic heterogeneities of the Permo-Triassic traps of the Daldyn-Alakit diamond province (Western Yakutia). *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2014;2:77–98. (In Russ.). EDN: SGPOVZ.

9. Konstantinov K.M., Kirguyev A.A., Khoroshikh M.S. Petro-magnetic heterogeneities of stress: applied corollary of Villari effect. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktika = Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2018;24(2):29–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-29-38>. EDN: UZSKPQ.

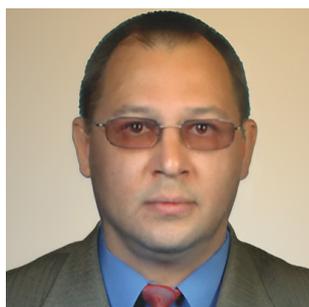
10. Konstantinov I.K., Konstantinov K.M., Khoroshikh M.S., Kirguyev A.A., Orlova G.V. Anisotropy of the magnetic susceptibility petromagnetic heterogeneities of firing and stress zones of sedimentary and igneous rocks. *Geofizika = Geophysics*. 2023;4:41–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.34926/geo.2023.75.92.007>. EDN: LCABXV.

11. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow: Nedra; 1987, 193 p. (In Russ.).



12. Zinchouk N.N., Bondarenko A.T., Garat M.N. *Petrophysics of kimberlites and their host rocks*. Moscow: Nedra-Biznest-sentr; 2002, 695 p. (In Russ.).
13. Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevskii S.A., Pogarskaya I.A., Rzhnevskii Yu.S., et al. *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra; 1982, 312 p. (In Russ.).
14. Sholpo L.E. *Using rock magnetism for solving geologic problems*. Leningrad: Nedra; 1977, 183 p. (In Russ.).
15. Jelínek V. Measuring anisotropy of magnetic susceptibility on a slowly spinning specimen – basic theory. *Agico Print no. 10*. Brno; 1997, p. 1-27.
16. Turling D.H., Hrouda F. *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall; 1993, 217 p.
17. Zijdeveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. In: Collinson D.W., Creer K.M., Runcorn S.K. (eds). *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam: Elsevier; 1967, vol. 3, p. 254-286.
18. Konstantinov K.M., Yakovlev A.A., Antonova T.A., Konstantinov I.K., Ibragimov Sh.Z., Artemova E.V. Petro- and paleo-magnetic characteristics of the structural-material complexes of the diamond mining of the Nyurbinskaya pipe (Middle Markha district, West Yakutia). *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(1):135-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0235>. EDN: YPOZID.
19. Konstantinov K.M., Artemova E.V., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Kirguez A.A. Possibilities of the method of anisotropy of magnetic susceptibility in the solution of geologic-geophysical problems of search radical diamond fields. *Geofizika = Geophysics*. 2018;1:67-77. (In Russ.). EDN: YWMSHU.
20. Zinchuk N.N. Geological structure and petrography of kimberlite pipes. *Nauka i obrazovanie*. 2016;4:7-15. (In Russ.). EDN: XYFZCP.
21. Kryuchkov L.I., Nikulin V.I., Krasinets S.S., Lelyukh M.I., Lyubimenko V.F., Somov S.V., et al. Localization conditions and structure features of the kimberlite body in the Aikhal area. *Geologiya i geofizika*. 1991;5:61-69. (In Russ.).
22. Tomshin M.D., Gogoleva S.S. Morphology of trap sills near kimberlites. *Litosfera = Lithosphere (Russia)*. 2023;23(4):579-588. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-579-588>. EDN: VZFUFH.
23. Tomshin M.D., Lelyukh M.I., Mishenin S.G., Suntsova S.P., Kopylova A.G., Ubinin S.G. Development scheme of trap magmatism of the eastern side of the Tunguska syncline. *Otechestvennaya Geologiya = National Geology*. 2001;5:19-24. (In Russ.).
24. Kirguez A.A., Konstantinov K.M., Vasilyeva A.E. Basite petromagnetic legend of the Tungus syncline eastern board. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktika = Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(1):18-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-18-32>. EDN: XPEQYO.
25. Kirguez A.A., Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Makarov A.A., Vasilyeva A.E. Petromagnetic classification of mafic rocks on the eastern side of the Tunguska syncline. *Geofizika = Geophysics*. 2020;3:45-61. (In Russ.). EDN: FQKOIB.
26. Konstantinov K.M., Gladkov A.S. Dynamic physical-geological model of the field of diamonds from the Komsomolskaya kimberlite pipe (Alakit-Markha field of Western Yakutia). *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2022;13(5):0678. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0678>. EDN: IDAGIA.
27. Konstantinov K.M., Novopashin A.V., Evstratov A.A., Konstantinov I.K. Modeling of gravimagnetic fields of primary diamond deposits in areas of Permian-Triassic traps. *Geofizika = Geophysics*. 2012;6:64-72. (In Russ.). EDN: RZDIMIT.
28. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural-geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
29. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>. EDN: XXHXRZ.

#### Информация об авторах / Information about the authors



**Константинов Константин Михайлович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
руководитель департамента геофизики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
старший научный сотрудник лаборатории геологии месторождений,  
Институт земной коры СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [konstantinovkm@ex.istu.edu](mailto:konstantinovkm@ex.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>

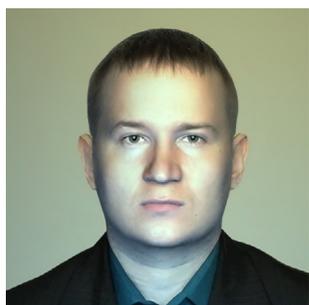


**Konstantin M. Konstantinov,**  
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Head of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
Senior Researcher of the Mining Geology Laboratory,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Irkutsk, Russia,  
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>



**Томшин Михаил Дмитриевич,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник, заведующий  
лабораторией «Геологический музей»,  
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,  
г. Якутск, Россия,  
tmd@diamond.ysn.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>

**Mikhail D. Tomshin,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Senior Researcher, Head  
of the Geological Museum Laboratory,  
Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS,  
Yakutsk, Russia,  
tmd@diamond.ysn.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>



**Хороших Максим Сергеевич,**  
аспирант,  
Институт земной коры СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
khoroshix1991@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0688-2249>

**Maksim S. Khoroshikh,**  
Postgraduate Student,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Irkutsk, Russia,  
khoroshix1991@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0688-2249>

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
The authors contributed equally to this article.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 04.10.2023; принята к публикации 20.11.2023.

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 04.10.2023; accepted for publication 20.11.2023.