

УДК 550.380; 553.078.2

ПЕТРОМАГНИТНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ БАЗИТОВ ВОСТОЧНОГО БОРТА ТУНГУССКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

А.А. Киргуев¹, К.М. Константинов^{1, 2}, Д.М. Кузина³, А.А. Макаров^{1, 2}, А.Е. Васильева⁴

¹ Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО). 678174, Россия, г. Мирный, Чернышевское шоссе, д. 16; e-mail: KirguevAA@alrosa.ru

² Институт земной коры СО РАН. 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128; e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru

³ ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» Институт геологии и нефтегазовых технологий. 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5; e-mail: di.kuzina@gmail.com

⁴ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. 677980, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, д. 39; e-mail: lexy_v@rambler.ru

Аннотация. В процессе своего становления базиты восточного борта Тунгусской синеклизы, в силу физико-геологических законов формирования, образовали внутри тел (силлы, дайки и т. п.) петромагнитные таксоны (ПМТ), которые характеризуются определенными статистическими значениями плотностных и магнитных параметров. По характеру их распределения ПМТ подразделяются на петромагнитные группы (ПМГ) и петромагнитные неоднородности (ПМН). В свою очередь ПМТ составляют петромагнитные комплексы (ПМК), соответствующие магматическим комплексам (фазам) внедрения базитов. ПМТ позволяют более надежно районировать закрытые траппами территории Якутской алмазоносной провинции с целью разработки методики поисков коренных месторождений алмазов, а также выделять аномалии структурного и трубочного типов над кимберлитовыми трубками на основе интерпретации материалов грави-магниторазведки.

Ключевые слова. Сибирская платформа, Тунгусская синеклиза, Якутская алмазоносная провинция, пермотриасовые траллы, кимберлиты, петромагнитная легенда, петромагнитные таксоны, группы и неоднородности, физико-геологическое моделирование.

PETROMAGNETIC KLAFFIFICATION OF THE BASIS OF THE EASTERN BOARD OF THE TUNGUS SYNEKLS

А.А. Kirguev¹, К.М. Konstantinov^{1, 2}, Д.М. Kuzina³, А.А. Makarov^{1, 2}, А.Е. Vasilyeva⁴

¹ Geological Research Enterprise of «ALROSA» PJSC. 678174, Mirny, 16 Chernyshevskoe highway, Russia; e-mail: KirguevAA @alrosa.ru

² Institute of the Earth Crust, SB RAS. 664033, Irkutsk, 128 Lermontov street, Russia; e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru

³ Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies. 420008, Kazan, Kremlyovskaya street 4/5, Tatarstan Republic, Russia; e-mail: di.gilmanova@gmail.com

⁴ Institute of Diamond and Precious Metals Geology SB RAS. Yakutsk, pr. Lenina, 39, Republic of Sakha (Yakutia), Russia; e-mail: lexy_v@rambler.ru

Abstract. During its formation, Tungus syneclyse basits, according to the physical-geological laws of formation, generated in bodies (sills, dikes, etc.) petromagnetic taxa (PMT) which are characterized by the certain statistical values of density and magnetic parameters. According to the nature of their distribution, PMT are subdivided on petromagnetic groups (PMG) and petromagnetic heterogeneities (PMHs). In its turn, PMT is composed of petromagnetic complexes (PMC), conforming to the magmatic phases of the basits intrusion. PMT allows more securely zoning of the Yakut diamondiferous province closed by the trap areas in order to develop a methodology of prospecting for primary diamond deposits, as well as isolating structural and tubular types of anomalies over kimberlite pipes based on gravity-magnetic exploration materials.

Key words. Siberian platform, Tungus syneclyse, Yakut diamondiferous province, Permo-Triassic traps, kimberlites, petromagnetic legend, petromagnetic taxa, groups and heterogeneities, physical-geological modeling.

ВВЕДЕНИЕ. Магниторазведка является одним из основных геофизических методов поисков коренных месторождений алмаза на территории Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). Именно этот метод в модификации аэромагнитной съемки за рекомендовал себя как наиболее эффективный для площадей 1 и 2 геотипов – территории преимущественного развития раннепалеозойских пород карбонатного цоколя. На их фоне даже слабомагнитные кимберлитовые тела обнаруживались достаточно надежно по аномалиям трубочного типа. Начиная с середины 70 годов прошлого века алмазопоисковые работы проводятся в пределах восточного борта Тунгусской синеклизы на площадях 4 и 5 геотипов – территории преимущественного развития пород трапповой формации (рис. 1). В связи с тем, что плотностные и магнитные характеристики базитов

варьируют в значительных пределах, эффективность магниторазведки заметно снизилась.

С целью повышения качества интерпретации данных магниторазведки перед геофизиками стала задача по разработке петромагнитной классификации (легенды) пермотриасовых базитов. Решение этой задачи оказалось достаточно сложным, поскольку намагниченность базитов зависит от многообразия форм проявления (дайки, силлы и др.), значительных вариаций минералогического, химического и петрографического составов и др. факторов. В результате петромагнитные характеристики траппов пермотриаса сильно дифференцированы как по величинам, так и по направлениям и, как следствие, генерируют аномалии разной интенсивности. Поэтому, для того чтобы описать как можно больше признаков намагниченности траппов, многие исследо-

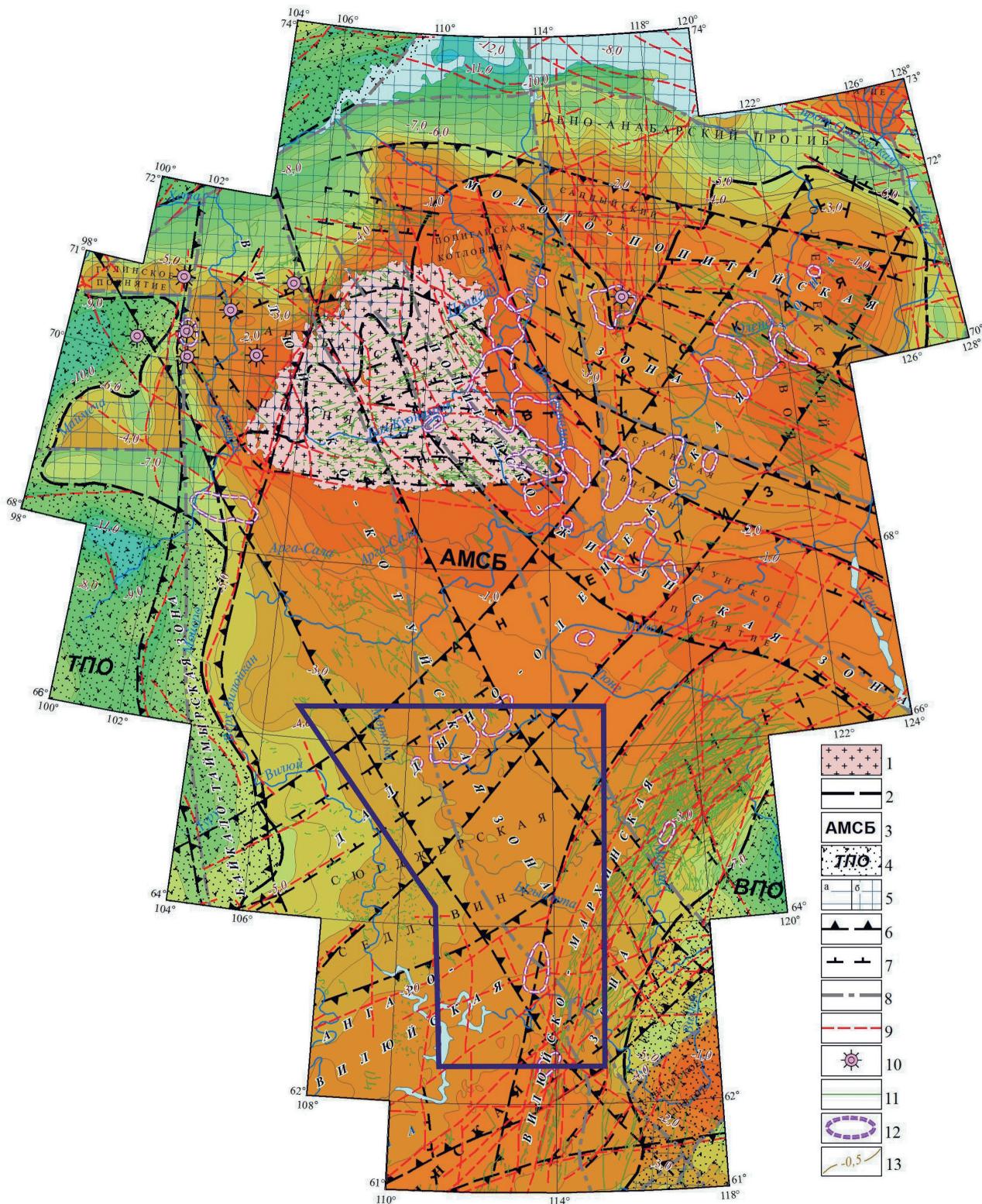


Рис. 1

Положение участка работ (многоугольник) на схеме тектонического районирования ЯП по [2].

- 1 – Анабарский кристаллический массив;
- 2 – граница между разнотипными тектоническими структурами;
- 3 – Анабаро-Мирнинский стабильный блок (АМСБ);
- 4 – подвижные области: Тунгусская (ТПО), Вилюйская (ВПО);
- 5 – структуры переходного типа (а – складчато-надвиговые (шарьяжные) зоны, б – протерозойские авлакогены); алмазоносные зоны: 6 – зоны краевых дислокаций, 7 – секущие (рифтотоподобные) структуры;
- разломы: 8 – глубинные, 9 – основные;
- 10 – массивы ультраосновных–щелочных пород и карбонатитов;
- 11 – дайки основного состава;
- 12 – контуры кимберлитовых полей;
- 13 – изогипсы кровли кристаллического фундамента

Таблица 1

Схема развития траппов восточного борта Тунгусской синеклизы по [13]

№	Фаза	Фация	Петрографический состав
1	Инtrузивная, $\gamma\beta P_2$ (бронирует водоразделы)	Пластовых и секущих интрузий	Долериты, оливиновые долериты, в зонах контакта толеитовые долериты, микродолериты, в шлирах габбро-долериты, ферро-габбро, гранофиры
2	$\beta_0\gamma\beta P_2-T_1$ (интрудирует P_2-C_1 отложения)	Туфовая	Туфы, ксенотуфы, пизолитовые туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты
		Туффизитовая	Туфы, ксенотуфы, эруптивные брекчии переходных зон
		Бескорневых вулканов (жерловая)	Микродолериты, атаксиевые 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	Инtrузивная, $\gamma\beta T_1$ (интрудирует породы PZ_1 цоколя)	Пластовых и секущих интрузий	Долериты, микродолериты (эндоконтакт), габбро-долериты трахитоидного облика

дователи в основу своих легенд закладывали петромагнитные группы (ПМГ) [10]. Их суть сводилась к установлению общих связей между геологическими (петрографический, минералогический, геохимический составы и др.) и петрофизическими (объемная плотность σ , магнитная восприимчивость α и вектор естественной остаточной намагниченности (ЕОН, In) и др.) параметрами, характеризующихся, как правило, статистически однородными (одномодальными) выборками. Однако попытки объяснить все разнообразие магнитных свойств траппов с помощью сформированных таким образом ПМГ не привели к ожидаемым результатам. Проблема заключалась в том, что среди ПМГ траппов все еще оставался достаточно широкий ряд объектов, для которых так или иначе не удалось установить закономерности распределения магнитных параметров на основе элементарного статистического анализа. Это, в свою очередь, порождало необходимость увеличения количества ПМГ и, как следствие, трудность восприятия интерпретаторами петромагнитных легенд и схем. Таким образом, возникла необходимость в разработке современной петромагнитной легенды (ПМЛ), отражающей реальную геолого-геофизическую обстановку. Для разработки петромагнитной легенды базитов важно знать:

1. Геологическое развитие и строение;
2. Петрофизические, в широком спектре исследований, свойства.

Априорная геологическая информация

Вулканогенные образования в пределах восточного борта Тунгусской синеклизы пользуются преимущественным развитием в бассейнах рр. Морокки, Мархи, Вилуйканы, Верхней Томбы, Йгыатты, Вилюя и др. Их размещение контролировалось северо-западной частью Ахтарандинского разлома, имеющего северо-западное простижение на отрезке от среднего течения р. Ахтаранда до междуречья рек Оленек и Мойеро на протяжении 500–600 км,

а также Морокинским и Восточно-Морокинским разломами (рис. 1). Заложение разломов относится к верхнему протерозою, с последующей активизацией в позднепалеозойское – раннемезозойское время в связи с формированием Тунгусской синеклизы. Упомянутые разломы составляли в пермо-триасовое время единую Вилуйско-Котуйскую систему нарушений, обрамляющую с северо-востока формирующуюся Тунгусскую синеклизу [9].

Как известно, идеальная модель формирования интрузивных тел траппов представляет собой сложный многостадийный процесс от внедрения расплава до полного затвердевания центральной части интрузии [4]. На каждой стадии этого процесса расплав может претерпевать изменения, в физико-химическом отношении кардинально отличающие его от первичной или исходной магмы. Расплав, проникая пластикообразно или же по трещинам в толще осадочных пород, поднимая и прогибая пластины кровли и подошвы создает и заполняет магматические камеры. Движение и застывание интрузии сопровождается как внутренними явлениями фракционирования и дифференциации магмы, так и внешним взаимодействием с вмещающими породами (контаминация). Естественно, такие изменения исходного расплава в процессе охлаждения отражаются в значениях физических свойств внутри образованного интрузивного тела, в результате чего и формируются ПМГ.

В ходе изучения базитов восточного фланга Тунгусской синеклизы установлено, что в пределах пермомиасового тектономагматического цикла выделяются три самостоятельные фазы внедрения¹ (табл. 1), которые четко различаются по геологическим (взаимное пересечение), петрографическим и геохимическим параметрам [13]. Такое геологическое строение траппов значительно усложняет решение задачи по разработке ПМЛ, поскольку требует расширение комплекса аналитических методов.

¹ Первая, вторая и третья фазы соответствуют оленек-велингнинскому, катангскому и кузьмовскому интрузивным комплексам Вилуйской серии листов [14].

Методика полевых и лабораторных петрофизических исследований

В геологическом строении верхней части разреза (ВЧР) рассматриваемой территории более чем 50% площади занимают трапповые образования (рис. 2). Отбор образцов проведен на 3 участках: Северный, Восточный и Южный из коренных обнажений. На первом из них изучены базиты трех фаз внедрения, бронирующие месторождения алмазов (трубки Айхал, Заря, Комсомольская, Краснопресненская, Сытыканская и Юбилейная), а также базиты из структурно-картировочных скважин (керн ориентирован по вертикальной оси без указателя стрелки «устье-забой»). С особой детальностью отбирались образцы из приконтактовых зон базитов разных фаз внедрения и разновидностей – долериты, туфы и др. (рис. 3). Всего отобрано около 3000 штуков, каждый из которых распиливался на 2–3 кубика с ребром 20 мм.

Лабораторные петрофизические, магнито-минералогические и палеомагнитные исследования выполнены в лабораториях Научно-исследовательского геологического предприятия АК «АЛРОСА» (ПАО), Института земной коры СО РАН и Казанского федерального университета на современной аппаратуре и оборудовании. Все полученные результаты измерений внесены в петрофизическую БД RSEARCH и обработаны с помощью пакета компьютерных программ, что позволяет оперативно проводить расчеты и интерпретацию полученных петрофизических материалов [5]. С целью составления образов ПМТ базитов по ним получены и обобщены аналитические (петрография, минералогия, геохимия и пр.) и петрофизические (объемная плотность (σ), магнитная восприимчивость (α), векторы естественной остаточной (In) и суммарной (I) намагниченности и коэффициент Кёнигсбергера (фактор Q)) материалы, которые сведены для статистической обработки в промежуточную таблицу.

Петромагнитная классификация базитов Тунгусской синеклизы строится на общих закономерностях становления магматических комплексов [11]. Однако в силу многостадийности развития траппового магматизма Тунгусской синеклизы во времени и в пространстве (см. табл. 1), такая идеальная модель строения магматических тел из ПМГ является достаточно абстрактной и ее использование для разработки ПМЛ требует гибкого (диалектического) подхода. Поэтому, в отличие от ранее предложенных методик, для выделения ПМТ базитов восточного борта Тунгусской синеклизы необходимо опираться на результаты комплекса методов, включающих:

1. Первичные измерения петрофизических параметров – отражают современное физическое состояние горных пород ВЧР (рис. 4). Например, по объемной плотности σ базиты резко различаются на два таксона – туфы и долериты, в то же время по значениям α и In выделяется четыре таксона. Од-

нако расчеты фактора Q позволяют выделить пять таксонов. То есть мы не сможем разделить туфы и микродолериты по магнитным свойствам, но по Q это возможно. Задача упрощается, если образцы будут ориентированы (для керна достаточно по вертикали).

2. Палеомагнитные исследования по изучению компонентного состава векторов ЕОН – характеризуют намагниченность базитов на момент их становления [12]. Для этой цели отбирались ориентированные образцы (рис. 2, 3). Для определения магнитной полярности траппов из керна скважин используется экспресс-метод. Он основан на анализе термомагнитограмм и диаграмм Зийдервельда. Суть его заключается в установлении вязкой ЕОН (In^v)², которая ориентируется по геомагнитному полю. Графики снимаются с помощью термомагнитометра (рис. 5, а), производительность которого благодаря автоматической записи данных во много раз выше размагничивания по стандартной методике. У базитов обратной полярности в отличие от прямо намагниченных на графике интегральной кривой будет наблюдаться «горб», за счет сложения антипараллельных векторов первичной In^0 и вязкой In^v природы (рис. 5, б).

3. Магнито-минералогические исследования определяют особенности носителей намагниченности [12]. Они включают изучение магнитной текстуры (анизотропия магнитной восприимчивости (AMB)) [15], магнитной структуры (гистерезисные параметры) и компонентного химического состава (термомагнитный анализ (ТМА)) [1]. Независимо от фаз внедрения минералы носители намагниченности относятся к титаномагнетитовой серии (рис. 6, а) и псевдооднодоменному (PSD) ансамблю магнитных частиц (рис. 7, б) [6]. Возможно, по этой причине, их трудно классифицировать по графикам ТМА на фазы внедрения. Несмотря на это, значения их гистерезисных параметров заметно различаются – повышенные значения характерны для долеритов 3 фазы внедрения (рис. 7, в, г).

Результаты работ

В работах [6, 7] были открыты закономерности в характере распределения современной намагниченности пермитриасовых траппов. Так, коллекции образцов базитов при однородных химических, петрографических и т. п. параметрах, но разным характером распределения намагниченности, предлагается называть не ПМГ, а петромагнитными таксонами (ПМТ). Именно они являются основными элементами в терминологии ПМЛ [3]. Таким образом, в зависимости от закона распределения магнитных параметров In – α – Q и природы намагничения (первичной, метахронной и т. п.), ПМТ могут относиться либо к ПМГ или петромагнитным неоднородностям (ПМН). Для ПМГ (например, трубка Айхал, рис. 8) характерны:

¹ Вязкая остаточная намагниченность – часть намагниченности, образующаяся при изотермическом воздействии постоянного магнитного поля во времени. В постоянном поле In растет пропорционально логарифму времени. Она присутствует всегда в горных породах благодаря продолжительному воздействию на них геомагнитного поля. Стабильность In возрастает со временем... [12].

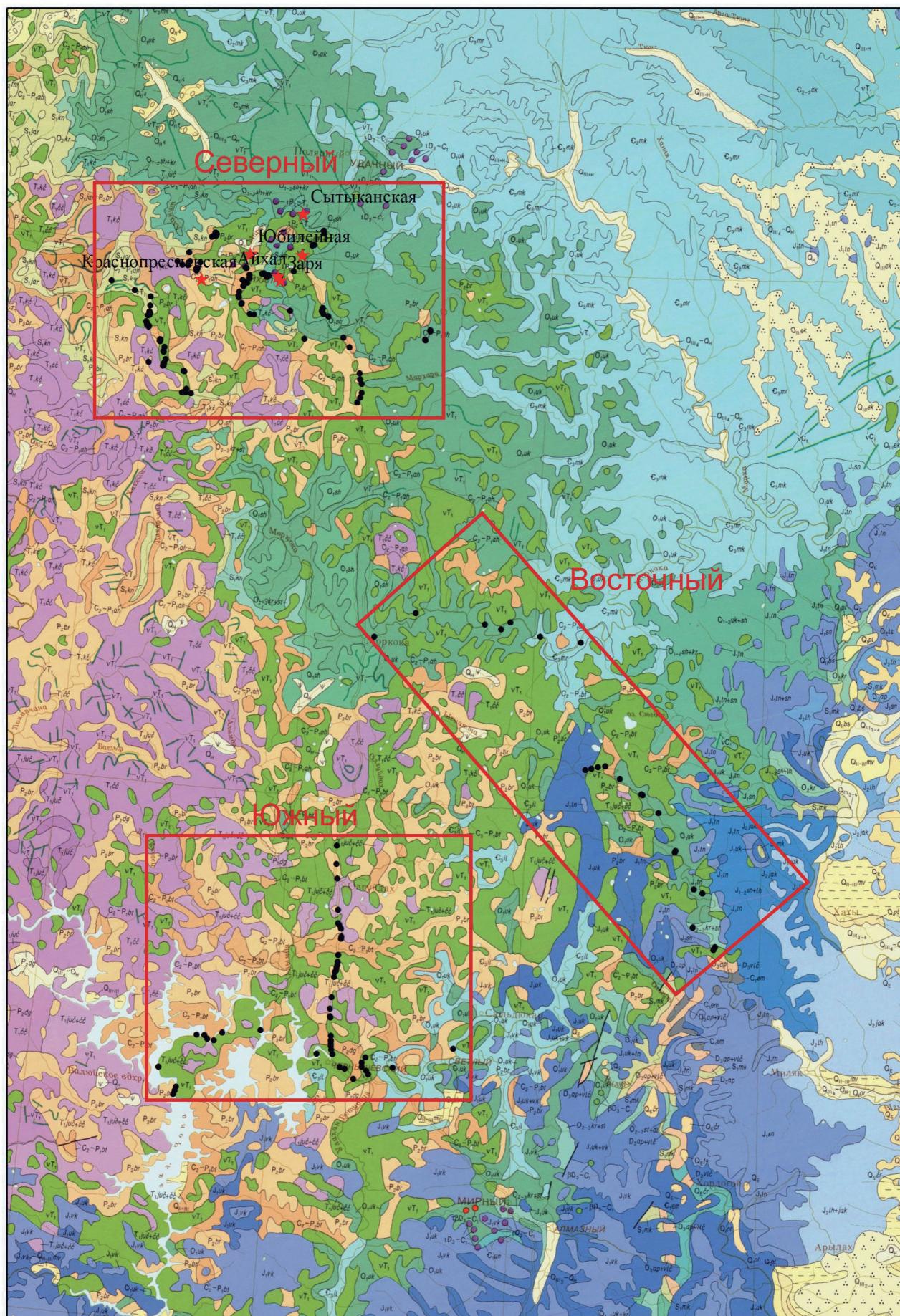


Рис. 2
Участки петрофизических работ

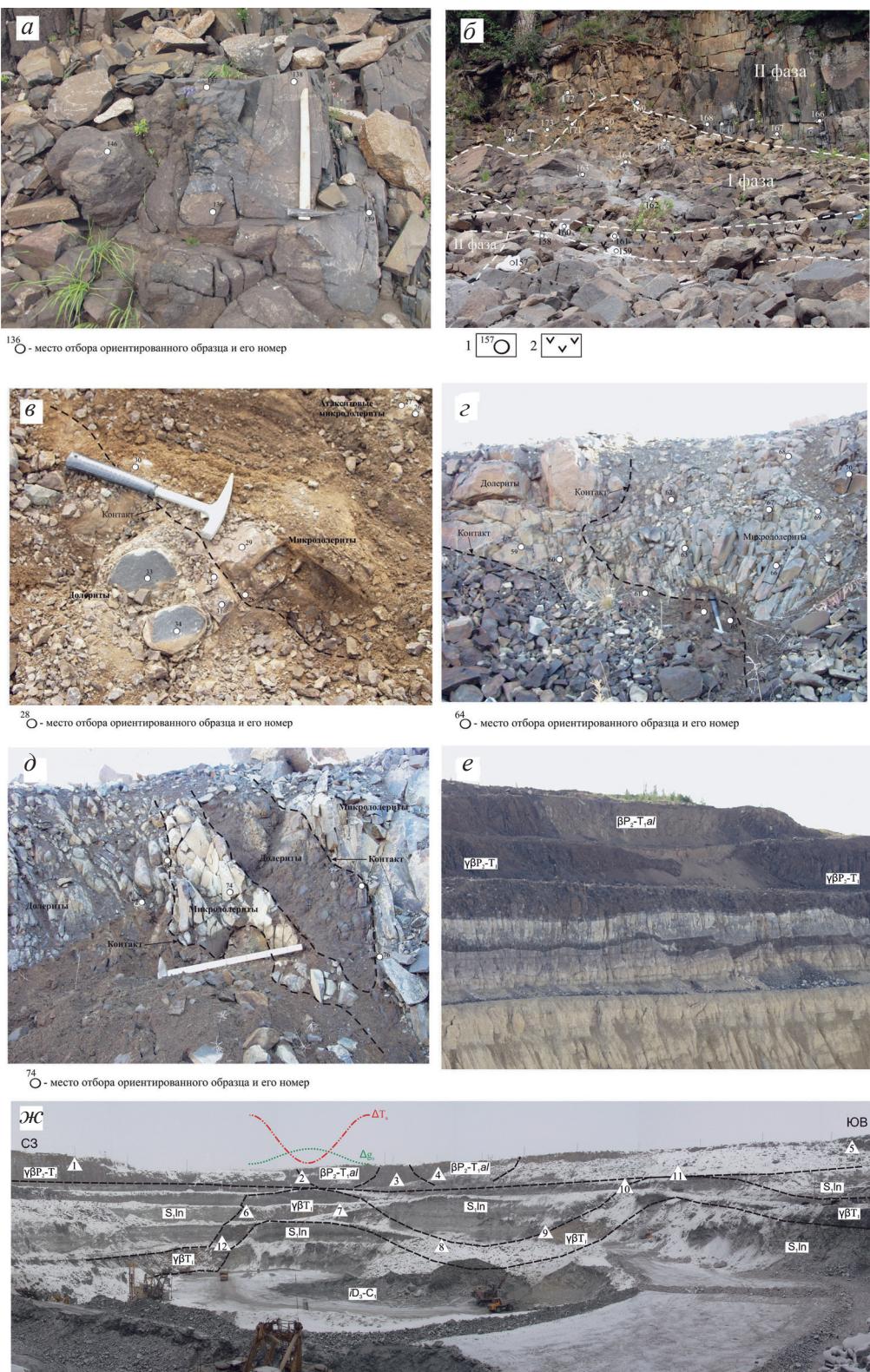


Рис. 3
Объекты петрофизических исследований.

- а – контакт 2-х интрузивных тел (1-я и 2-я фаза внедрения) оленёк-велингинского комплекса (уч. Моркока, обн. 61);
- б – характер взаимоотношения интрузий 1-ой и 2-ой фазы внедрения оленёк-велингинского комплекса с дайкой кузьмовского комплекса (уч. Моркока, обн. 61);
- в – контакт интрузии долеритов с телом микродолеритов (оленёк-велингинский комплекс, уч. Трасса, обн. 2);
- г, д – контакт интрузий долеритов нормального ряда с телом микродолеритов (катаангский комплекс, уч. Водораздельный, обн. 2), обр. 59, 60 – габбро-долериты гранофировые, 61 – габбро-пегматит, 64, 65 – габбро гранофировые;
- е – туфы алакитской свиты и силлы долеритов катаангского комплекса перекрывающие трубку Айхал;
- жс – контакт катаангского и кузьмовского интрузивных комплексов на месторождении Комсомольская (треугольники – сайты отбора образцов; зеленая/красная кривые – аномалии гравитационного/магнитного поля).
- 1 – место отбора ориентированного образца и его номер; 2 – дайка кузьмовского комплекса

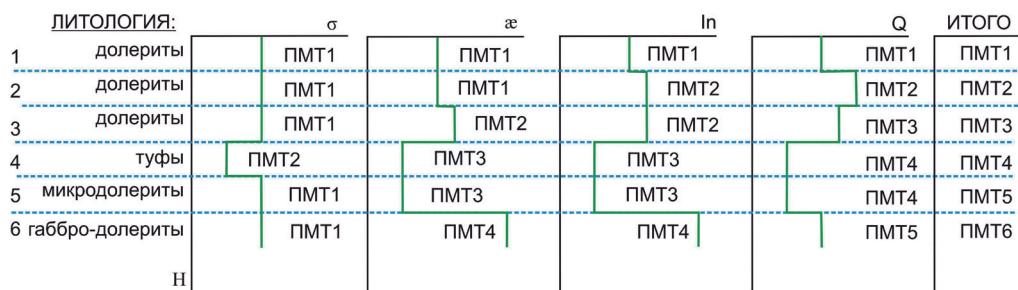


Рис. 4
Принципиальная схема выделения ПМТ базитов (значения параметров даны в у.е.)

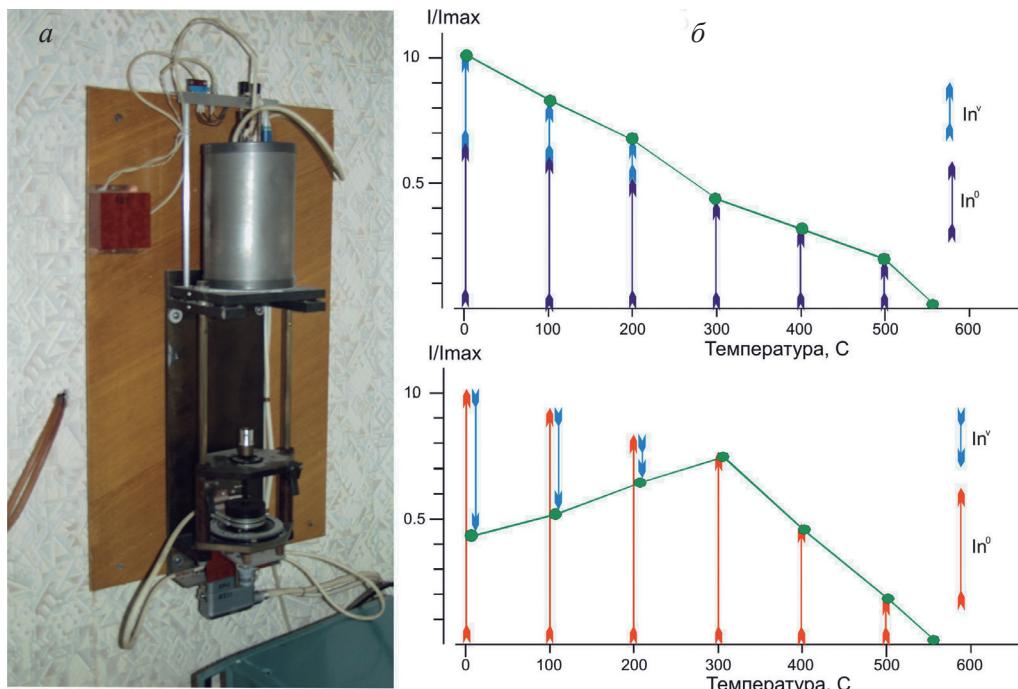


Рис. 5

Экспресс-метод определения полярности долеритов.

а – термомагнитометр (ИФЗ РАН, г. Борок); б – принципиальная схема сложения векторов In^0 и In^y в первоначально положительно (верхний) и отрицательно (нижний) намагниченных образцах. Зеленым цветом показана интегральная кривая $In = f(t)$

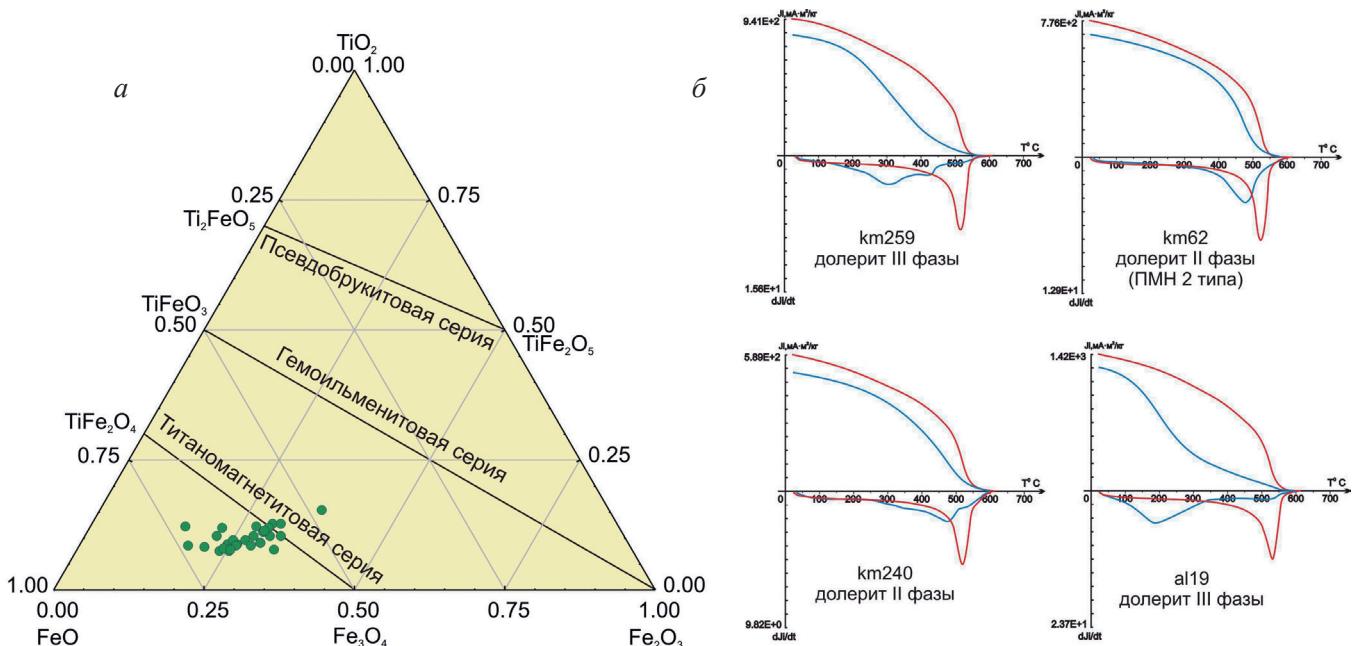


Рис. 6
Титаномагнетиты долеритов восточного борта Тунгусской синеклизы по [6].
а – химический состав и б – термомагнитограммы ТМА

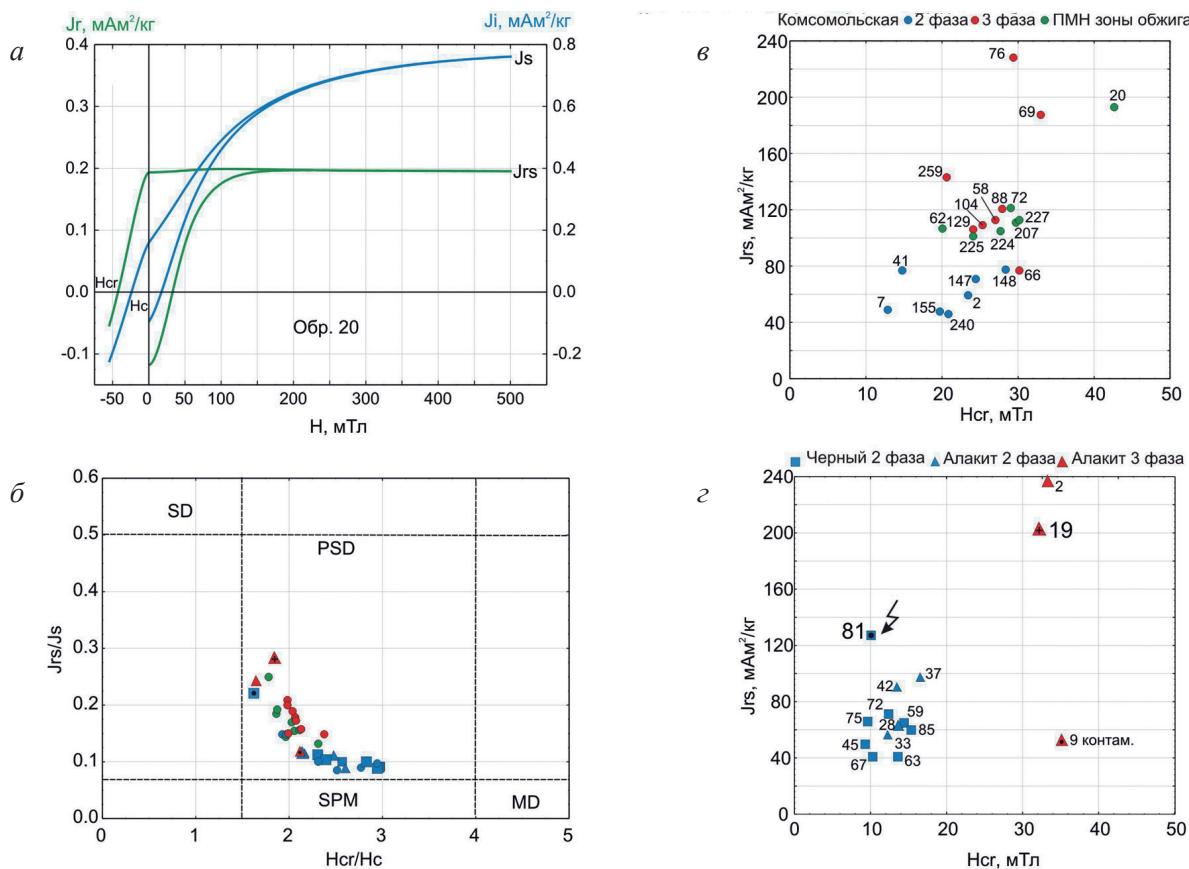


Рис. 7

Магнито-структурный анализ долеритов по [Константинов, 2014].

а – магнитный гистерезис долеритов месторождения Комсомольская (J_s – намагниченность насыщения, J_{rs} – намагниченность насыщения ЕОН, H_s – коэрцитивная сила, H_{cr} – коэрцитивная сила ЕОН).
б – диаграмма Дея (доменная структура частиц: SD – однодоменная, PSD – псевдооднодоменная, MD мульти(много)доменная и SPM – суперпарамагнитная).
в и г – графики зависимости гистерезисных параметров разнофазных траппов, перекрывающих кимберлитовую трубку Комсомольская (в) и участков Алакит и Черный (г). Цифры – номера штуфов

1. Однородный петрографический и петрохимический состав;

2. Одномодальное распределение скалярных параметров: α , In и Q ;

3. Кучные группировки векторов In и I (СН).

Магнитные характеристики ПМГ могут изменяться в пространстве по величинам α , In и Q , но не по направлениям векторов ЕОН. Векторы вязкой In^v практически отсутствуют (рис. 9, д). Для ПМГ базитов характерен, в основном, осадочный тип АМВ (рис. 10, а, в) [15].

К ПМН относятся ПМТ траппов, магнитные характеристики которых изменяются не только в пространстве, но и во времени. На сегодняшний день в пермо-триасовых базитах установлены ПМН четырех генетических типов:

ПМН 1 типа сформировался за счёт их перемагничивания геомагнитным полем (например, сил долеритов 3 фазы трубы Сытыканская, рис. 8). В таких долеритах присутствует вязкая In^v (рис. 9, а). Причём зависимость между фактором Q и величиной In^v обратно пропорциональная, о чём свидетельствуют стереограмма векторов I и график $J = f(\log Q)$. Для ПМН 1 типа так же характерен осадочный тип АМВ (рис. 10, в).

ПМН 2 типа – за счёт обжига базитов ранних (первой и второй) фаз внедрения поздней (третьей) интрузивной фазой (например, подошва силла долеритов 2 фазы трубы Комсомольская, рис. 8). В таких ПМН возникает метахронная In^m , которая, в зависимости от расстояния от контакта, может полностью (рис. 9, б) или частично (рис. 9, в, г) стереть In^0 . Одновременно с этим характер АМВ меняется с осадочного на дайковый (рис. 10, б), а значения гистерезисных параметров увеличивается (рис. 7, в).

ПМН 3 типа – в результате эффекта самообращения векторов ЕОН в титаномагнетитах. Встречаются достаточно редко и выделяются на фоне изученных образцов векторами ЕОН противоположного знака (рис. 11). При этом все остальные магнитные характеристики не меняются.

ПМН 4 типа – вследствие ударов грозовых разрядов. В результате значения намагниченности насыщения ЕОН J_{rs} возрастают (рис. 7, г), а собственное поведение векторов на сфере – хаотичное.

ПМН характеризуются более сложным распределением спектра магнитных параметров и имеют аморфное строение: формы их неопределенные (размытые) и могут не совпадать с морфологией тел и геологическими (петроплотностными) грани-

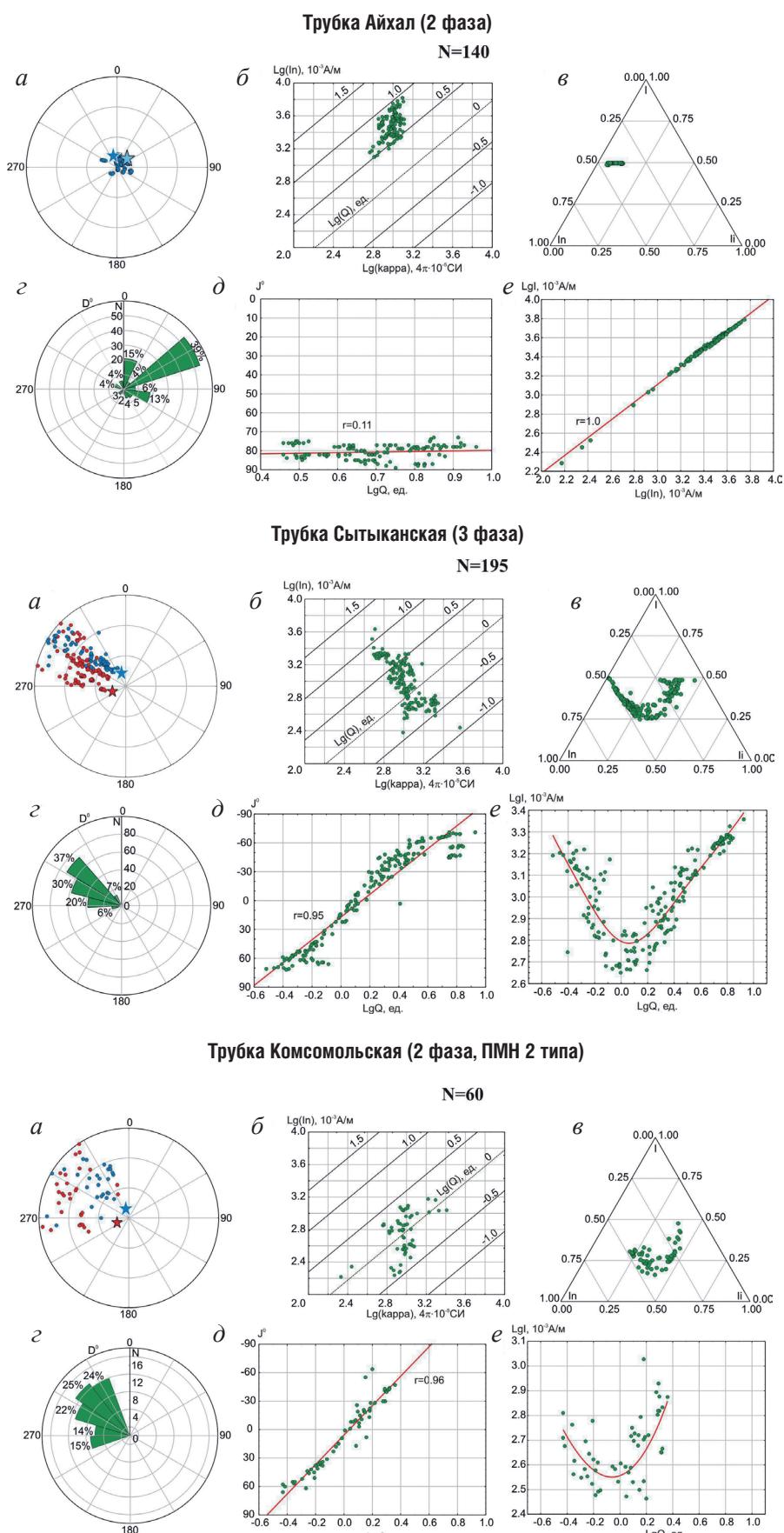


Рис. 8

а – стереограмма векторов суммарной намагниченности I; синие (красные) кружочки – проекции I на положительную (отрицательную) полусферу; звездочки – древнее Нр (голубая/красная) на момент формирования траппов (прямая/обратная полярность) и современное Н (синяя) направления магнитного поля. *б* – график зависимости $\ln\text{--}Q$. *в* – тернарный график $\ln\text{--}Ii\text{--}Ic$.

г – гистограмма склонений D векторов I. *д* – график зависимости наклонений J векторов I от фактора Q.

е – график зависимости величины I от фактора Q

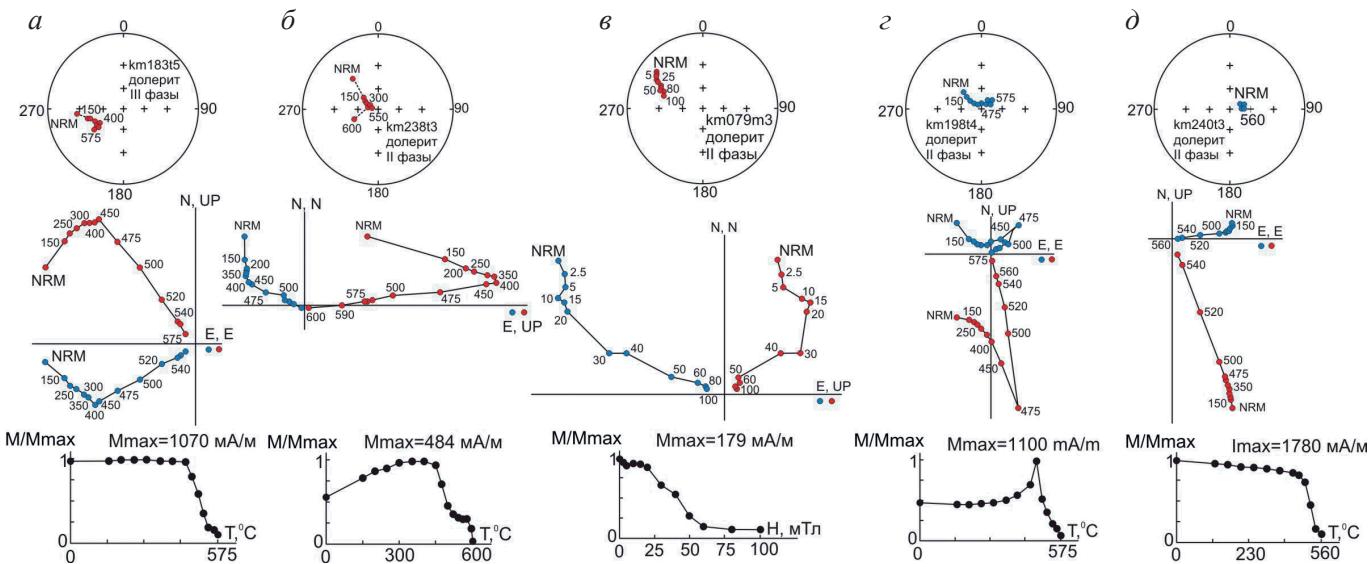


Рис. 9

Результаты лабораторных экспериментов по размагничиванию переменным магнитным полем и температурой долеритов из карьера кимберлитовой трубы Комсомольская (см. рис. 3, жс).

Стереограмма: синие (красные) кружочки – проекция векторов In на положительную (отрицательную) полусферу.

Диаграмма Зийдервельда: синие (красные) кружочки – проекции вектора In на горизонтальную (вертикальную) плоскость.

Цифры – величина физического воздействия (переменное магнитное поле или температура), разрушающая исходную намагниченность NRM (ЕОН) образца

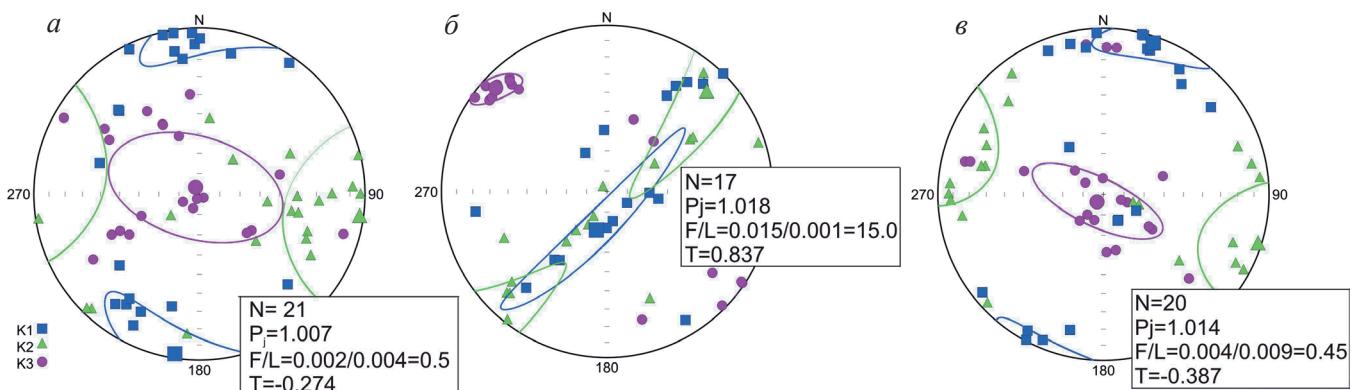


Рис. 10

Магнито-текстурный анализ долеритов в карьере трубы Комсомольская (см. рис. 3, жс).

а – долериты второй фазы (гор. +650, ю-в);

б – ПМН зон обжига долеритов второй фазы (гор. +650, с-в);

в – долериты третьей фазы (гор. +610, с-в).

Квадратики, треугольники и кружочки – средние направления длинной K1, средней K2 и короткой K3 осей эллипса АМВ и соответствующие им овалы со сплошной, пунктирной и точечной линиями – эллипсы доверия с вероятностью 95 %.

Обозначения «+650, с-в» и т. п. указывают на абсолютную отметку изученного обнажения и его положение в бортах карьера, относительно стран света. N, F/L и T – соответственно, количество образцов, плоскостная/линейная анизотропия и параметр формы

цами! Игнорирование ПМН как структурных элементов физико-геологической модели может отрицательно сказаться на решении научных и прикладных геологических задач. ПМН полностью и проще объясняют наличие в той или иной фазе базитового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы векторов ЕОН противоположного знака, чем ранее выдвинутые гипотезы [6].

Естественно, что по объективным причинам (главным образом отсутствие естественных коренных обнажений) нам не удалось изучить все многообразие базитов восточного борта Тунгусской синеклизы. В общей сложности вся совокупность полученных данных была объединена в 34 ПМТ (табл.

2). Достаточно представительную информацию удалось получить по долеритовой субфации всех трех фаз базитов. Особенно важные данные получены по их контаминатам и эндоконтактовым зонам, необходимые для установления природы намагниченности. Менее изучены жерловая и туфовая фации. Тем не менее даже на их основе была составлена Схема «Петромагнитных таксонов базитов верхнеалакитской вулкано-интрузивной ассоциации», в которой строкам соответствуют петромагнитные комплексы (фазы), а столбцам – фации и субфации. В зависимости от фазы и фациальной принадлежности, каждому ПМТ были присвоено конкретное «условное обозначение». Например, номер OV1D обозначает,

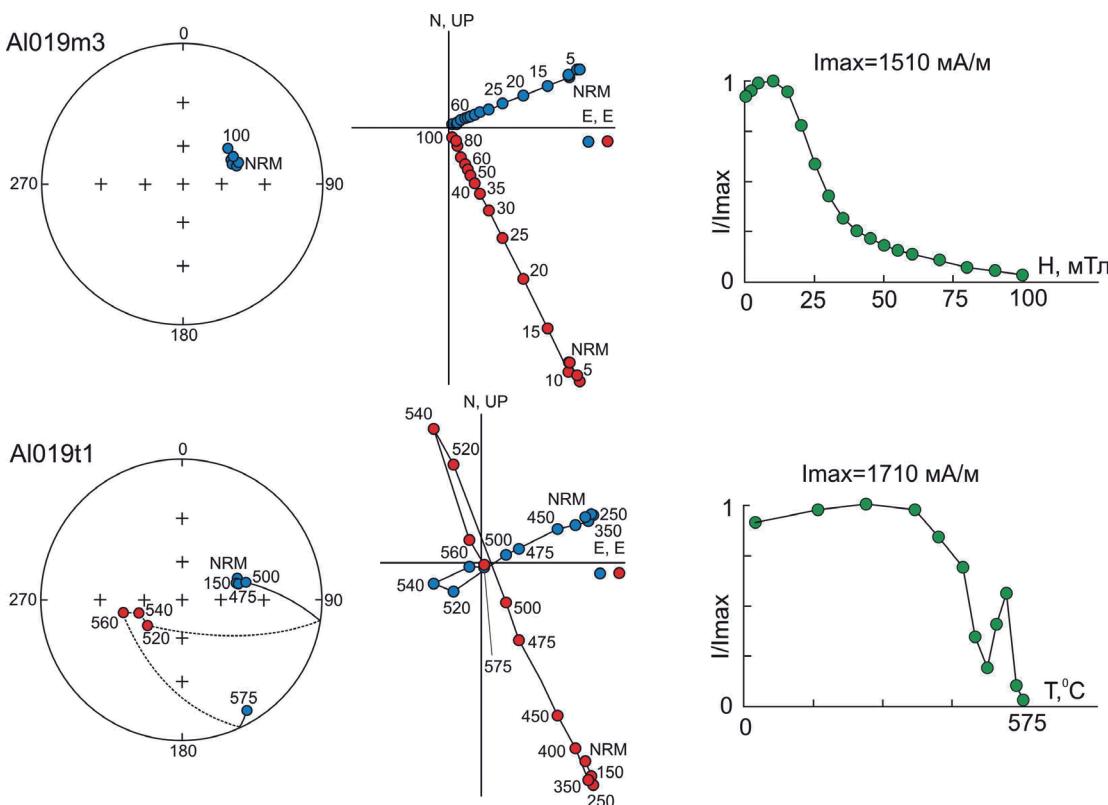


Рис. 11

Результаты лабораторных экспериментов по размагничиванию переменным магнитным полем и температурой обр. 19 из обратно намагниченных долеритов Алакитского сillsа третьей фазы. Другие пояснения см. на рис. 9

что ПМТ относится к долеритовой субфации олек-велингнинского интрузивного комплекса первой подфазы; КТ2МД – относится к катангскому интрузивному комплексу второй подфазы жерловой (микродолеритовой) субфации; КТ2ЗТ – ПМТ относится к катангскому интрузивному комплексу второй подфазы и представляет зону обжига (ПМН 2 типа) и т. д. Ячейки серого цвета обозначают ПМТ, существование которых в природе невозможно, не-заполненные – ПМТ, данные по которым ожидается получить в перспективе (как новые трансуранные химические элементы в таблице Д.И. Менделеева).

Вынесенные на график $In-\alpha-Q$ фигуративные точки ПМТ образовали достаточно обособленные области распределения магнитных параметров (табл. 3, рис. 12), которые целесообразно использовать для идентификации ПМТ базитов по результатам первичных измерений [3]. Базиты туфовой фации относятся к практически немагнитным образованиям: $\alpha < 50 \cdot 10^{-5}$ СИ, $In < 10 \cdot 10^{-3}$ А/м, $Q < 0,5$ ед.; жерловой – к слабомагнитным: $50 < \alpha < 100 \cdot 10^{-5}$ СИ, $In < 200 \cdot 10^{-3}$ А/м, $Q < 1,0$ ед. К магнитным, относятся базиты контактиков и приконтактовой субфации, соответственно: $100 < \alpha < 500 \cdot 10^{-5}$ СИ, $100 < In < 500 \cdot 10^{-3}$ А/м, $1,2 < Q < 2,5$ ед.; $500 < \alpha < 1500 \cdot 10^{-5}$ СИ, $1000 < In < 2500 \cdot 10^{-3}$ А/м, $2,0 < Q < 4,0$ ед. Поскольку эти породы принадлежат к олек-велингнинскому (1 фаза) и катангскому (2 фаза) интрузивным комплексам, то полярность векторов ЕОН будет положительная, за исключением зон обжига со стороны базитов кузьмовского (3 фаза) интрузивного комплекса.

Базиты долеритовой фации следует относить к сильномагнитным образованиям. Неизмененные долериты 1 и 2 фаз внедрения, характеризуются прямой полярностью векторов ЕОН и параметрами, соответственно: $1500 < \alpha < 2500 \cdot 10^{-5}$ СИ, $2000 < In < 5000 \cdot 10^{-3}$ А/м, $3,0 < Q < 6,0$ ед.; $900 < \alpha < 2000 \cdot 10^{-5}$ СИ, $2300 < In < 6500 \cdot 10^{-3}$ А/м, $4,0 < Q < 10,0$ ед. У долеритов 2 фазы α несколько ниже, чем у долеритов 1 фазы, что корреспондирует с объемной плотностью, которая зависит от процентного содержания магнитных минералов (титаномагнетиты).

Долериты зоны обжига (ПМН 2 типа) будут характеризоваться пониженными значениями $300 < In < 2000 \cdot 10^{-3}$ А/м и $0,5 < Q < 3,0$ ед., что является следствием сложения векторов ЕОН разной полярности. Кроме того, у ПМН 2 типа будут наблюдаться:

- метахронная компонента ЕОН;
- повышенные, относительно неизмененных базитов, значения гистерезисных параметров;
- дайковый тип АМВ.

Долериты 3 фазы характеризуются относительно повышенными значениями σ от 2900 до 3100 кг/м³ и $1500 < \alpha < 2000 \cdot 10^{-5}$ СИ и в то же время пониженными, $1000 < In < 2000 \cdot 10^{-3}$ А/м и $1,0 < Q < 2,5$ ед., что является следствием размагничивающего фактора со стороны геомагнитного поля. Между наклонением J вектора первичной ЕОН долеритов 3 фазы установлена прямая зависимость – чем выше фактор Q , тем больше угол (рис. 8). В зависимости от значения фактора Q , в них будет присутствовать вязкая компонента ЕОН. Поэтому долериты будут

Таблица 2

Петромагнитные таксоны базитов верхнеалакитской вулкано-интрузивной ассоциации

№ пп	Фация	Субфация	Петромагнитный комплекс									Стратифицированные образования (алакитская свита Р ₂ -Т ₁ al)	
			Оленек-велингинский				Катангский			Кузьмовский			
			1	2	3	4	1	2	3	1	2		
1	Фация пластовых и скучных интрузий	Долеритовая	OV1D	OV2D	OV3D	OV4D	KT1D	KT2D	KT3D	KZ1D	KZ1D		
2		Габбро-долеритовая					KT1GD	KT2GD					
3		Гибридных пород – контаминатов (полная ассимиляция)						KT2K					
4		Приконтактовая (контакт с нижнепалеозойским карбонатным комплексом)									KZ2PZ1		
5		Приконтактовая (контакт спородами Р-С)	OV1PC	OV2PC				KT2PC			KZ2PC		
6		Приконтактовая (контакт с туфами алакитской свиты)						KT2AL					
7		Эзоконтактовая-1 (контакт с 2-ой фазой Оленек-велингинского комплекса)	OV1-2										
8		Эзоконтактовая-2 (контакт с 3-ей фазой Кузьмовского комплекса)	OV1ZT				KT1ZT	KT2ZT					
9		Эндоконтактовая (контакт с интрузией 1-ой фазы Оленёк-велингинского комплекса)		OV2-1									
10		Эндоконтактовая (контакт с микродолеритами жерловой фации)		OV2VF									
11		Эндоконтактовая (контакт с 1-ой фазой оленёк-велингинского комплекса)									KZ2F1		
12		Эндоконтактовая (контакт с 2-ой фазой оленёк-велингинского комплекса)								KZ1F2		KT2T	
13	Фация безкорневых вулканов (жерловой)	Микродолеритовая		OV2MD			KT1MD	KT2MD					
14		Атакситовых микродолеритов						KT2AMD					
15		Атакситовых микродолеритов		OV2AMD				KT2AMD					
	Туфовая	Туфовая, туффитовая										KT1T	

Примечание. Серые площадки – нереальные ПМТ.

Таблица 3

Пределы изменения петрофизических параметров базитов восточного борта Тунгусской синеклизы

№ пп	Субфация	$\sigma, \text{ кг/м}^3$		$\alpha, 10^{-5} \text{ СИ}$		$In, 10^{-3} \text{ А/м}$		Q, ед.		Полярность
		от	до	от	до	от	до	от	до	
1	Туфовая	2000	2700		50		10		0,5	N
2	Жерловая	2700	2900	50	100		200		1,0	N
3	Контаминаты	2600	2900	100	500	100	500	1,2	2,5	N
4	Приконтактовая	2900	3000	500	1500	1000	2500	2,0	4,0	N
5	Долеритовая 1 фаза	2900	3000	1500	2500	2000	5000	3,0	6,0	N
6	Долеритовая 2 фаза	2850	3000	900	2000	2300	6500	4,0	10,0	N
7	Долеритовая ПМН 2 типа (зона обжига)	2850	3000	700	1600	300	2000	0,5	3,0	N/R
8	Долеритовая 3 фаза (ПМН 1 типа)	2900	3100	1500	2000	1000	2000	1,0	2,5	N/R

характеризоваться переменной полярностью векторов ЕОН и относиться к ПМН 1 типа [6]. Для долеритов третьей фазы характерны повышенные значения гистерезиса.

При детальной интерпретации и моделировании потенциальных полей на траппонасыщенных участках использование полученных данных существен-

но повышает достоверность результатов и сокращает время на их получение. Это позволяет надеяться, что результаты выполненной работы найдут применение в практике алмазоискательных геологоразведочных работ, ведущихся на территориях площадного развития траппов востока и северо-востока Тунгусской синеклизы.

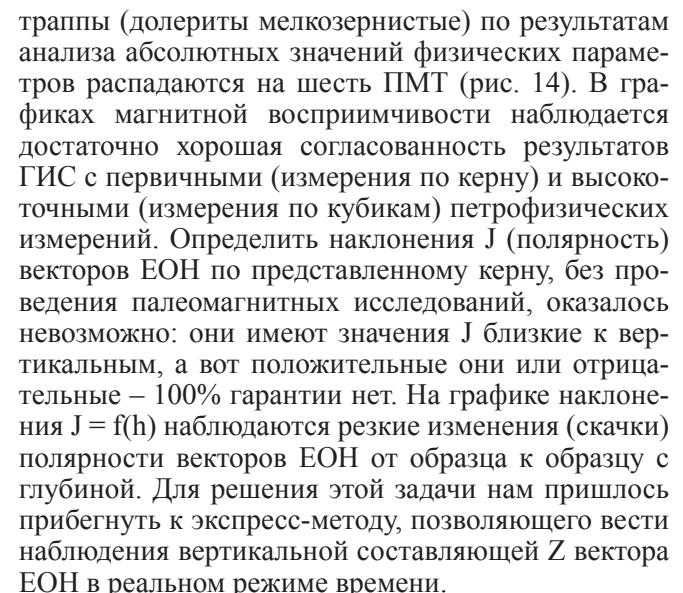
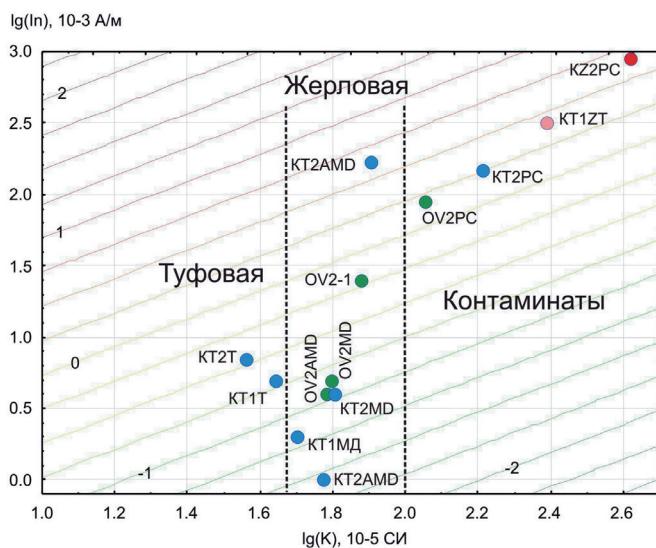
Обсуждение результатов

Предлагаемая ПМЛ развития базового магматизма Тунгусской синеклизы найдет применение для решения широкого ряда научных и прикладных геологических задач, например, формирования ФГМ с целью интерпретации геофизических полей территорий 4–5 алмазопоисковых геотипов, геофизическом районировании территории с целью составления петромагнитных карт и оконтуривания участков благоприятных для постановки магниторазведки и пр. [8].

Одной из важных задач физико-геологического моделирования в поисках коренных месторождений алмаза на территориях 4–5 геотипов является разделение потенциальных полей на «полезный сигнал-помеха». Для метода «вычитания» необходимо знать физические свойства базитов ВЧР и, в первую очередь, векторные параметры: ЕОН и СН. Однако при отсутствии ориентированного керна мы можем получить только скалярные величины и наклонение J вектора ЕОН. Полярность, в данном случае, неизвестна.

В основе определения полярности **In** траппов из керна вертикальных скважин лежит экспресс-метод, основанный на удалении вязкой компоненты **In^v** (см. выше). Как было показано на математической модели (рис. 5) и подтверждено на экспериментах (рис. 9, б) [6], в обратно намагниченных трапах с низкими значениями фактора Q (менее 2 ед.) в плоскости XOZ диаграммы Зийдервельда образуется вязкая **In^v** компонента, противоположная характеристической (возможно первичной) ЕОН, а на графиках размагничивания – «горб», как результат сложения противоположных векторов.

На петрофизические исследования поступили образцы трапповых тел, некоторые из которых имели мощность до 300 м. Разбор полученных материалов рассмотрим на примере структурно-картировочных скважин, пробуренных на полигоне Моркокинский (рис. 13). Например, в скв. 5777, пробуренной в западной части полигона, изученные



Результаты экспресс-анализа по скв. 5777 проведены по интегральной термомагнитограмме и диаграмме Зийдервельда (рис. 15). Блокирующие температуры для разных ПМТ близки к 500 °С, но характер поведения кривых ДТМА разный, особенно для ПМТ-6. Согласно нашим представлениям о сложении векторов In^0 и In^v (рис. 5, б) для четырех верхних ПМТ устанавливается положительная полярность, а для двух нижних ПМТ мы принимаем отрицательную полярность ЕОН. В скважине вскрывается верхний (1 фаза) и нижний (3 фаза) массив траппов в интервалах глубин, соответственно, 0–163 и 180–240 м. Для верхних долеритов можно выделить четыре ПМТ, а в нижней – два ПМТ, из которых один (ПМТ 5, глубина 184 м) характеризует верхнюю эндоконтактную зону (рис. 14).

Аналогичные операции проделаны по остальным 27 скважинам, пробуренным на Моркокинской площади. Кроме того, использованы данные по реперным обнажениям р. Моркока. В итоге проведенных петрофизических исследований построены карты (рис. 13, б) и блок-схема геологического строения главных СВК (рис. 13, в), которые могут

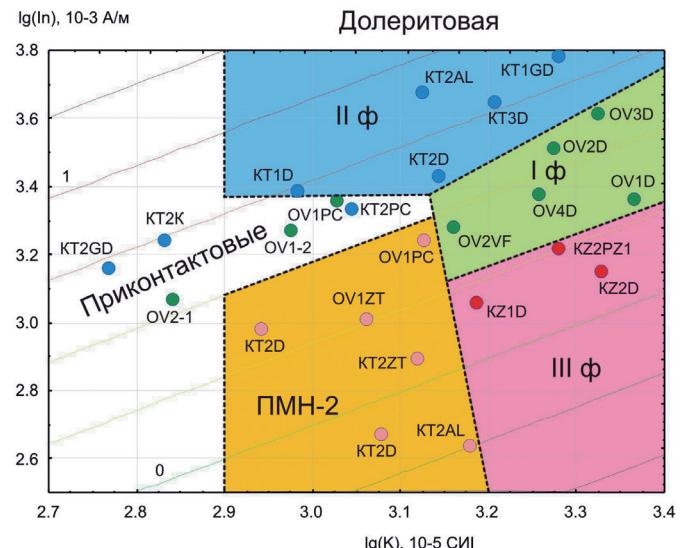
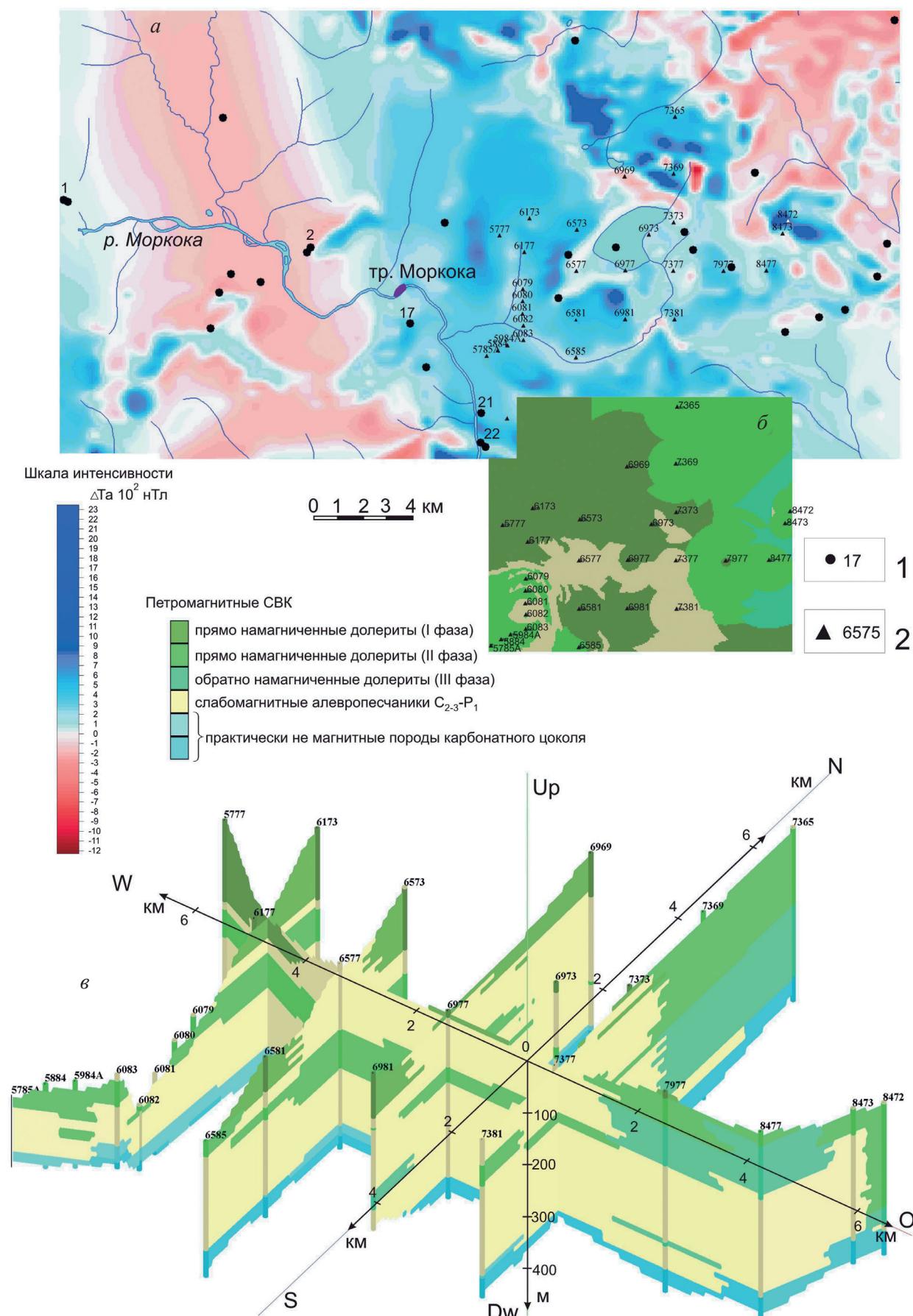


Рис. 12

Области распределения фигуративных точек ПМТ по фациям базитов восточного борта Тунгусской синеклизы на графике In-æ-Q



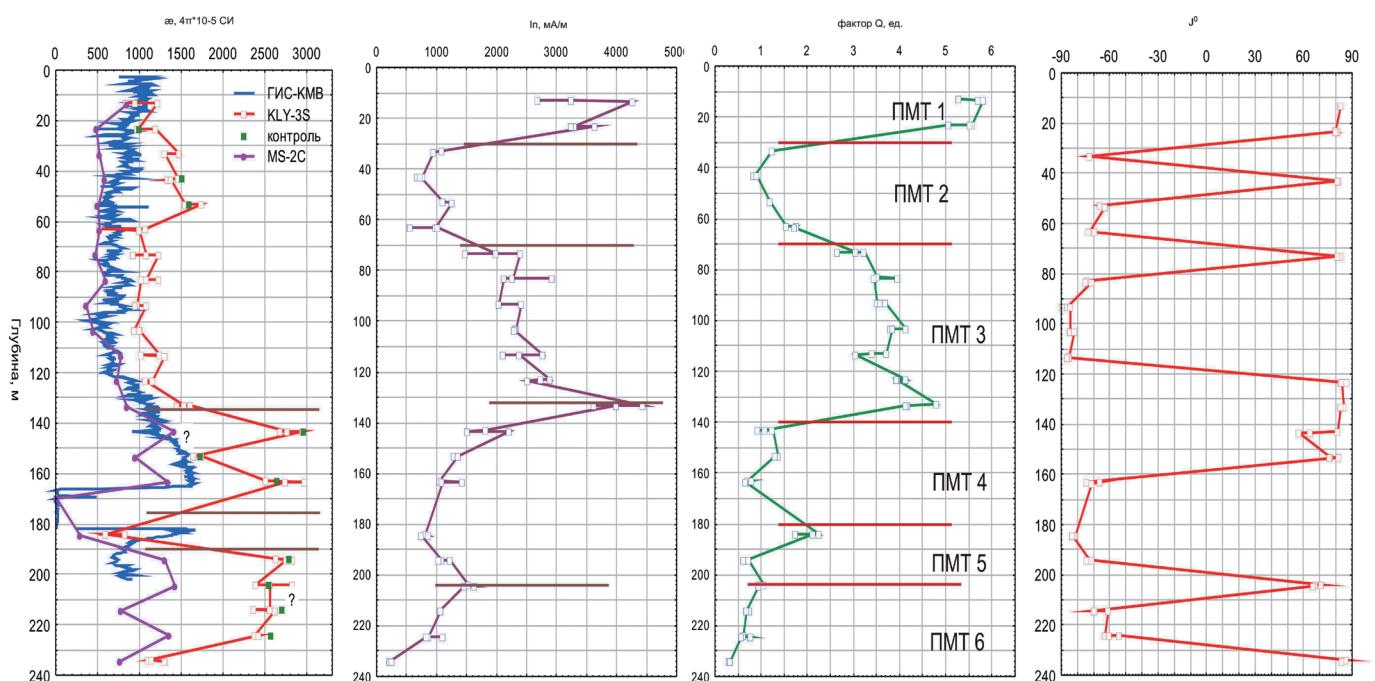


Рис. 14
Петромагнитный разрез скв. 5777

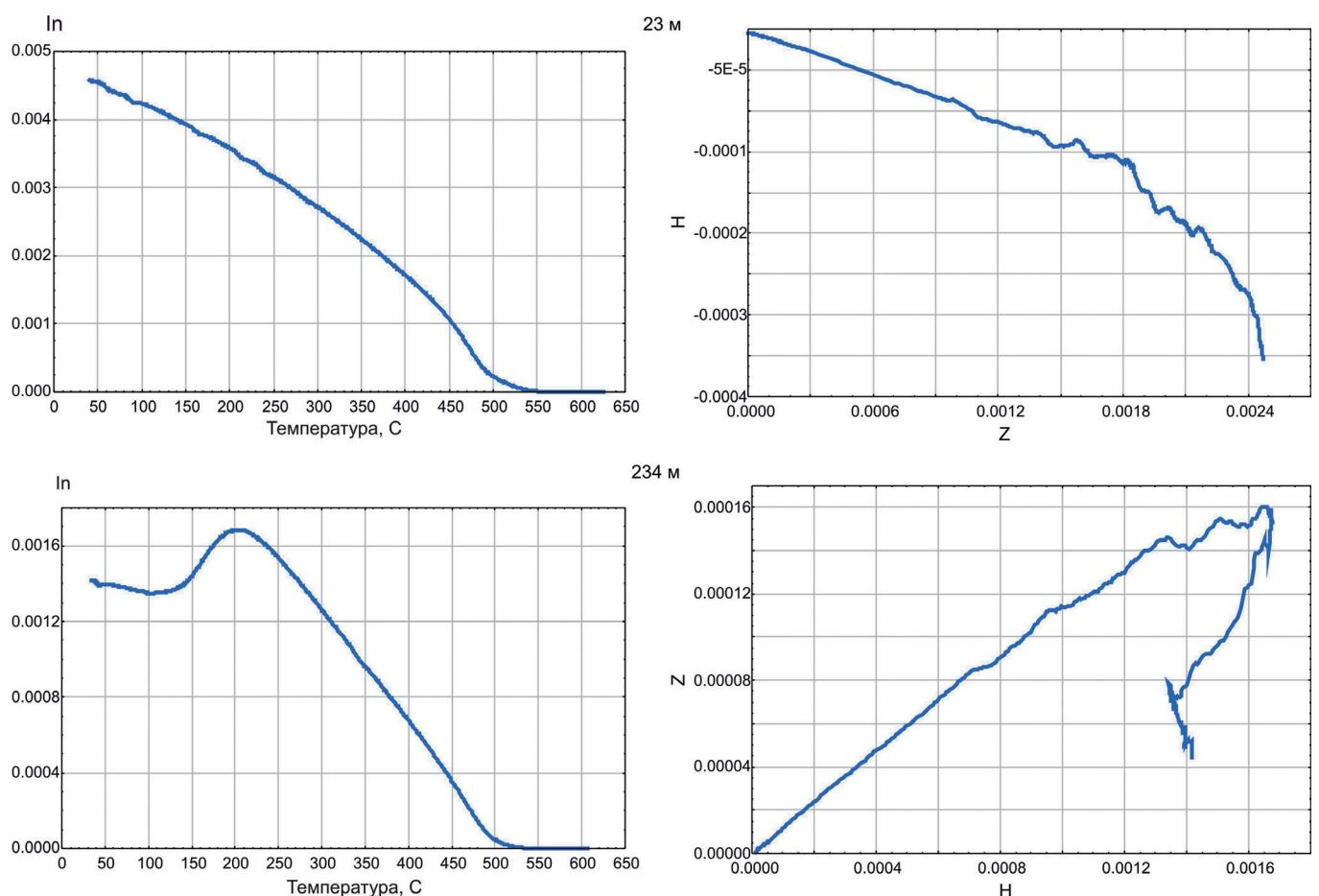


Рис. 15
Пример размагничивания экспресс-методом керна долеритов по вертикальной структурно-картировочной скважине 5777:
ПМТ 1 (23 м) и ПМТ 6 (234 м). H/Z – оси, образующие горизонтальную/вертикальную плоскость проекции диаграммы Зийдервельда

быть использованы для интерпретации магнитного поля (рис. 13, *a*) полигона Моркокинский. Но несмотря на ряд объективных и субъективных причин (редкая сеть опорных скважин 2 × 2 км, ошибки при отборе проб, грубой точности RockWorks2004) на ее основе можно проследить некоторые детали геологического строения ВЧР. Полученный в ходе выполнения работ опыт пригодится при выполнении петрофизических исследований на других поисковых объектах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная ПМЛ позволяет классифицировать базиты восточного борта Тунгус-

ской синеклизы по фазам и фациям внедрения с достаточно высокой степенью вероятности. Она не такая громоздкая, наиболее читаемая и понятная для геологов и геофизиков, чем предлагаемые ранее легенды. С помощью ПМТ базитов можно более корректно формировать физико-геологические модели коренных месторождений алмазов на территориях 4 и 5 геотипов, что положительно сказывается на их поисках геофизическими методами. Предложенная ПМЛ предсказывает также существование и других ПМТ, которые могут обнаружиться в ходе геологической съемки. Ее можно распространить и на другие территории Сибирской платформы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во Казанского университета, 1979. 231 с.
2. Горев Н.И., Герасимчук А.В. Специализированные тектонические карты при прогнозировании коренных месторождений алмазов на Сибирской платформе: методика составления и анализа. Руды и металлы. 2017. № 4. С. 25–41.
3. Киргев А.А., Константинов К.М., Васильева А.Е. Петромагнитная легенда базитов восточного борта Тунгусской синеклизы. Природные ресурсы Арктики и Субарктики, Т. 24. № 1, 2019. ISSN 2618–9712.
4. Кокс К.Г., Белл Дж.Д., Панкхерст Р.Дж. Интерпретация изверженных горных пород. М.: Недра, 1982. 414 с.
5. Константинов К.М., Забелин А.В., Зайцевский Ф.К., Константинов И.К., Киргев А.А., Хороших М.С. Структура и функции петромагнитной базы данных «RSEARCH» Якутской кимберлитовой провинции / Геоинформатика, 2018. С. 15–24.
6. Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермогриасовых траппов Далдыно-Алакитского алмазоносного района (Западная Якутия) // Литосфера. 2014. № 2. С. 77–98.
7. Константинов К.М., Мишенин С.Г., Убинин С.Г., Сунцова С.П. Распределение векторов естественной намагниченности пермогриасовых траппов Далдыно-Алакитского алмазоносного района. Геофизика, 2004. № 1. С. 49–53.
8. Константинов К.М., Новопашин А.В., Евстратов А.А., Константинов И.К. Физико-геологическое моделирование грави-магнитных полей коренных месторождений алмазов в условиях развития пермогриасовых траппов (Далдыно-Алакитский алмазоносный район). Геофизика 2012, № 6. С. 64–72.
9. Мокшанцев К.Б., Горнштейн Д.К. и др. Тектоника Якутии. Новосибирск. Наука, 1975.
10. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга вторая. Техника и методика исследований / Под ред. А.А. Молчанова, Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 256 с.: ил.
11. Печерский Д.М., Багин В.Н., Бродская С.Ю., Шаронова З.В. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород. М.: Наука, 1975. 288 с.
12. Печерский Д.М., Соколов Д.Д. Палеомагнитология, петромагнитология и геология. Словарь-справочник для соседей по специальности. М.: ИФЗ РАН, 2010. Ссылка на <http://paleomag.ifz.ru>.
13. 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 № 5, 2001. С. 19–24.
14. Салихов Р.Ф., Салихова В.В., Иванюшин Н.В., Охлопков В.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000, Верхневилюйская серия (издание второе). Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал). Объяснительная записка. С.-Пб.: 2005. 284 с.
15. Tarling D.H., Hrouda F., 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman & Hall, London, 217 p.

REFERENCES

1. Burov B.V., Jasonov P.G. Vvedenie v differencial'nyj termomagnitnyj analiz gornyh porod [Introduction to differential thermomagnetic analysis of rocks]. Kazan: Kazan State University publishing house, 1979. 231 p. (in Russian).
2. Gorev N.I., Gerasimchuk A.V. Specializirovannye tectonicheskie karty pri prognozirovaniyu korennnyh mestorozhdenij almazov na Sibirskoj platforme: metodika sostavlenija i analiza [Specialized tectonic maps for predicting indigenous diamond deposits on the Siberian platform: methods of compilation and analysis]. Rudy i metally [Ores and metals], 2017; (4): 25–41 (in Russian).
3. Kirghev A.A., Konstantinov K.M., Vasil'eva A.E. Petromagnitnaja legenda bazitov vostochnogo borta Tunguskoj sineklyzy [Petromagnetic legend of basites on the Eastern side of the Tunguska syneclyse]. Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural resources of the Arctic and subarctic], 2019, vol. 24, №1. ISSN 2618-9712 (in Russian).
4. Koks K.G., Bell Dzh.D., Pankherst R.Dzh. Interpretacija izverzhennyh gornyh porod [Interpretation of igneous rocks]. Moscow, Nedra, 1982. 414 p.
5. Konstantinov K.M., Zabelin A.V., Zajcevskij F.K., Konstantinov I.K., Kirghev A.A., Horoshih M.S. Struktura i funkciyu petromagnitnoj bazy dannyh «RSEARCH» Jakutskoj kimberlitovoj provincii [Structure and functions of the rsearch petromagnetic database of the Yakut kimberlite province]. Geoinformatika [Geoinformatics], 2018. 15–24 pp. (in Russian).
6. Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Koval'chuk O.E. Petromagnitnye neodnorodnosti permotriassovyh trappov Daldyno-Alakitskogo almazonosnogo rajona (Zapadnaja Jakutija) [Petromagnetic heterogeneities permotriassic traps Daldyno-Alakit diamondiferous district (Western Yakutia)]. Litosfera [The Lithosphere], 2014; (2): 77–98 (in Russian).
7. Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Ubinin S.G., Suncova S.P. Raspredelenie vektorov estestvennoj namagnichennosti permotriassovyh trappov Daldyno-Alakitskogo almazonosnogo rajona [Distribution of magnetization vectors of natural permotriassic traps Daldyno-Alakit diamondiferous district]. Geofizika [Geophysics]. 2004; (1): 49–53 pp (in Russian).

8. Konstantinov K.M., Novopashin A.V., Evstratov A.A., Konstantinov I.K. Fiziko-geologicheskoe modelirovaniye gravi-magnitnyh polej korennyh mestorozhdenij almazov v uslovijah razvitiya permotriasovyh trappov (Daldyno-Alakitskij alamazonosnyj rajon) [Physical and geological modeling of gravimagnetic fields of indigenous diamond deposits in the conditions of Permian Trapp development (Daldyn-Alakitsky diamond-bearing region)]. *Geofizika* [Geophysics]. 2012; (6): 64–72 (in Russian).

9. Mokshancev K.B., Gornshein D.K. et al. *Tektonika Jakutii* [Tectonics of Yakutia]. Novosibirsk. Nauka [The science], 1975. (in Russian).

10. Molchanova A.A., Dortsman N.B. (ed. by) *Petrofizika: Spravochnik* (v treh knigah) [Petrophysics: Guide (in three books)]. Vol. 2: *Tekhnika i metodika issledovanij* [Technique and methods of research]. Moscow, Nedra, 1992. 256 p. (in Russian).

11. Pecherskij D.M., Bagin V.N., Brodskaja S.Ju., Sharonova Z.V. *Magnitizm i uslovija obrazovanija izverzhennyh gornyh porod* [Magnetism and conditions of formation of igneous rocks]. Moscow: Nauka [The science], 1975. 288 p. (in Russian).

12. Pecherskij D.M., Sokolov D.D. *Paleomagnitologija, petromagnitologija i geologija. Slovar'-spravochnik dlja sosedej*

po special'nosti [Paleopalynology, pyramidology and Geology. Dictionary-reference for neighbors in the specialty]. Moscow: IFZ RAS, 2010. Link to <http://paleomag.ifz.ru>. (in Russian).

13. Tomshin M.D., Leljuk M.I., Mishenin S.G., Suncova S.P., Kopylova A.G., Ubinin S.G. *Shema razvitiya trappovogo magmatizma vostochnogo borta Tunguskoj sineklyzy* [Scheme of development of trap magmatism of the Eastern side of the Tunguska synclise] / *Otechestvennaja geologija* [Russian Geology]. 2001; (5): 19–24 (in Russian).

14. Salihov R.F., Salihova V.V., Ivanjushin N.V., Ohlopov V.I. *Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossiijskoj Federacii* mashtaba 1:200 000, Verhneviljujskaja serija (izdanie vtoroe). List Q-49-XXI, XXII (Ajhal) [State geological map of the Russian Federation scale 1:200 000, Verhneviluykskaya series (second edition). Sheet Q-49-XXI, XXII (Aykhali)]. Objasnitel'naja zapiska [Explanatory note]. Saint Petersburg, 2005. 284 p. (in Russian).

15. Tarling D.H., Hrouda F., 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall, London, 217 p.

Положительная рецензия 00.00.2020

ОБ АВТОРАХ



Научный сотрудник НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО). Окончил геологоразведочный факультет Воронежского государственного университета в 2012 г. Научные интересы – петрофизика, физико-геологическое моделирование, петромагнитное картирование, палеомагнетизм. Имеет 10 публикаций.

КИРГУЕВ

Александр Альбертович



КОНСТАНТИНОВ Константин Михайлович

Ведущий научный сотрудник Лаборатории петрологии и петрофизики Научно-исследовательского геологического предприятия АК «АЛРОСА» (ПАО), старший научный сотрудник Лаборатории палеогеодинамики Института земной коры СО РАН, доктор геолого-минералогических наук. Окончил Геологоразведочный факультет Иркутского политехнического института в 1986 г. Научные интересы – петрофизика, палеомагнетизм, магнитная минералогия, физико-геологическое и математическое моделирование, геодинамика. Имеет более 210 публикаций.



КУЗИНА Дилжара Мтыгулловна

Старший научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых технологий, КФУ, кандидат геолого-минералогических наук. Окончила ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий в 2011 году.

Научные интересы – петромагнетизм, палеомагнетизм, магнитные свойства внеземного вещества. Имеет более 30 публикаций.



МАКАРОВ Алексей Алексеевич

Ведущий геофизик Амакинской комплексной геофизической партии Вилюйской геологоразведочной экспедиции АК «АЛРОСА» (ПАО). Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 2006 г. Аспирант ИЗК СО РАН. Научные интересы: комплексная интерпретация геофизических данных. Имеет 5 публикаций.



ВАСИЛЬЕВА Александра Ефимовна

Младший научный сотрудник Лаборатории «Геологический музей» Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН). Окончила Геологоразведочный факультет Якутского государственного университета в 2003 г. Научные интересы – петрология магматических пород, трappовый магматизм восточной части Сибирской платформы. Имеет более 35 публикаций.