

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ПЕРМО-ТРИАСОВЫХ ТРАППОВЫХ ИНТРУЗИВНЫХ ТЕЛ ДОЛИНЫ Р. КУЛЮМБЭ (СЕВЕРО-ЗАПАД СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

© 2021 г. А. В. Латышев^{1,2,*}, А. А. Лапковский³, Р. В. Веселовский^{1,2},
А. М. Фетисова^{1,2}, Н. А. Криволицкая⁴

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН, г. Москва, Россия

³ООО “Норильскгеология”, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: anton.latyshev@gmail.com

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 03.12.2020 г.

Район р. Кулюмбэ занимает переходное положение в структуре Сибирской трапповой провинции, поскольку располагается в зоне сочленения структур Норильского района и Тунгусской синеклизы. В долине р. Кулюмбэ распространены магматические образования, характерные для обоих районов, при этом вопросы о последовательности формирования интрузивных комплексов и их корреляции с вулканитами до сих пор не решены. В настоящей работе представлены новые палеомагнитные данные по интрузивным телам долины р. Кулюмбэ. Показано, что интрузивный магматизм в рассматриваемом районе продолжался в течение длительного времени, охватывающего по меньшей мере по одному интервалу обратной и прямой полярности. На основании сравнения виртуальных геомагнитных полюсов Силурийская интрузия (норильский комплекс), содержащая сульфидную минерализацию, может быть сопоставлена с мокулаевской–хараелахской свитами и близка по времени формирования к рудоносным интрузиям Норильского района. Формирование Кулюмбинской интрузии (курейский комплекс), а также некоторых других тел курейского и кузьмовского комплексов, скорее всего, отвечает моронговско-мокулаевскому времени и также близко по времени становления к рудоносным интрузиям. Интрузивные тела обратной полярности долины р. Кулюмбэ формировались после завершения основной фазы вулканизма и примерно синхронны далдыканскому комплексу в Норильском районе. Образование интрузий катангского комплекса, как и в центральной части Тунгусской синеклизы, охватывает широкий интервал времени и не может быть сопоставлено ни с одной конкретной свитой. Наконец, на основании детального анализа палеомагнитных данных мы предполагаем, что большая часть интрузий долины р. Кулюмбэ (за исключением части обратно намагниченных тел) сформировалась до окончания основных региональных деформаций, которое примерно совпадает с завершением траппового магматизма.

Ключевые слова: палеомагнетизм, Сибирская трапповая провинция, интрузии, Пермь, триас.

DOI: 10.31857/S000233372103008X

ВВЕДЕНИЕ

Сибирская трапповая провинция считается эталонным примером Крупной Магматической провинции (КМП, Large Igneous Province) и представляет собой одну из крупнейших областей проявления внутриплитного базальтового магматизма в фанерозое. Вулканические толщи мощностью до 3.5 км [Fedorenko et al., 1996] и связанные с ними интрузивные тела заполняют Тунгусскую синеклизу на Сибирской платформе и распространяются за ее пределы. Поскольку Си-

бирские траппы, в отличие от многих других подобных провинций, слабо затронуты последующими деформациями и не разделены на части вследствие раскола континентальных блоков, они представляют собой перспективный объект для исследования крупных магматических провинций, эволюции магматизма в их пределах и тестирования гипотез формирования гигантских областей внутриплитного вулканизма, включая наиболее распространенную концепцию мантийных плюмов [Добрецов и др., 2010; Sobolev et al., 2011; Ernst, 2014]. Кроме того, научный интерес к



Рис. 1. (а) – Положение района исследований на Сибирской платформе (цифрами показаны районы трапповой провинции: 1 – Маймеча-Котуйский; 2 – Путоранский; 3 – Норильский; 4 – Нижнетунгусский; 5 – Ангаро-Тасеевская впадина); (б) – упрощенная геологическая схема района исследований. На карте показаны только опробованные интрузивные тела без разделения на комплексы. Для сайтов отбора цветом показана полярность: черный – прямая, белый – обратная.

Сибирским траппам связан с наличием уникальных Cu–Ni-платиноидных месторождений Норильского района, приуроченных к трапповым интрузиям, и широко обсуждаемой гипотезой о возможной причинно-следственной связи между катастрофическим магматизмом и глобальным биотическим кризисом на рубеже перми и триаса [Wignall, 2001; Courtillot, Renne, 2003].

На Сибирской платформе в пределах провинции выделяются несколько районов, обладающих различными чертами состава и мощности продуктов магматизма, тектонической структурой и металлогенической специализацией (рис. 1а): Норильский, Маймеча-Котуйский, Путоранский, Нижнетунгусский районы, Ангаро-Тасеевская впадина (например, [Золотухин и др., 1986; Fedorenko, Czamanske, 1997; Ivanov et al., 2013]). Наиболее детально изучен Норильский район, благодаря своему исключительному экономическому значению. В течение последних трех десятилетий по вулканитам и интрузивным телам этого региона был получен значительный объем надежной петрологической и геохимической информации [Lightfoot et al., 1993; Wooden et al., 1993; Рябов и др., 2001; Криволюцкая, 2013]. Также достаточно масштабные исследования проводились в Маймеча-Котуйском районе в связи со специфическим составом магматитов, а именно преобладанием щелочных и ультраосновных пород над толеитовыми базальтами [Fedorenko, Czamanske, 1997; Fedorenko et al., 2003]. По остальным районам Сибирских траппов до сих пор имеется лишь фрагментарная информация.

В настоящей работе рассматривается район р. Кулюмбэ, который крайне интересен для реконструкции Сибирского траппового магматизма благодаря своему узловому положению в структу-

ре провинции. С одной стороны, долина р. Кулюмбэ лежит на западной окраине Тунгусской синеклизы, где распространены наиболее типичные вулканогенные и интрузивные образования “платформенной” стадии магматизма [Альмухамедов и др., 2004]. С другой стороны, по геофизическим данным, Кулюмбинский район наложен на ответвление погребенной Норильско-Игарской палеорифтовой системы протерозойского возраста [Долгаль, 2012; Krivolutskaia et al., 2019], к которой приурочены все известные массивы Норильского района с промышленным оруденением. Такая ключевая позиция района р. Кулюмбэ находит свое отражение и в составе продуктов магматизма: среди интрузивных образований здесь описываются комплексы, характерные как для центральной части Тунгусской синеклизы (катангский, кузьмовский), так и для Норильского района (ергалахский, норильский, далдыканский), а также локально распространенный курейский комплекс [Павлов и др., 1988]. К югу от долины р. Кулюмбэ расположен Джалтульский рудоносный массив. Что касается стратифицированных вулканогенных образований, то разрез туфо-лаваовой толщи сложен свитами, типичными для Норильского района – от сыверминской до надеждинской (нижняя часть разреза). Детальная вещественная характеристика интрузивных тел и вулканитов Кулюмбинского района была недавно дана в работах [Krivolutskaia et al., 2020a; 2020b].

Учитывая положение Кулюмбинского района на стыке двух основных регионов трапповой провинции, а также наличие на его территории объектов, перспективных на медно-никелевое и платиноидное оруденение, необходимо составить надежную схему развития магматизма в регионе и

провести корреляцию магматических событий с вулканогенными образованиями и интрузивами соседних регионов. На сегодняшний день обобщенные данные о последовательности формирования интрузивных комплексов и продолжительности магматических событий отсутствуют.

В последние годы в ходе детальных исследований была показана эффективность палеомагнитного метода при изучении крупных магматических провинций, в частности, для выделения основных эпизодов магматизма, оценки их продолжительности и корреляции между собой. Такие данные были получены как для Сибирских траппов [Gurevitch et al., 2004; Heunemann et al., 2004; Павлов и др., 2011; Михальцов и др., 2012; Латышев и др., 2013; Latyshev et al., 2018; Pavlov et al., 2019], так и для других крупных магматических провинций мира [Chenet et al., 2008; 2009; Moulin et al., 2012; Xu et al., 2018]. На Сибирской платформе с использованием палеомагнитных методов были получены следующие важнейшие результаты: 1) на основании анализа вековых геомагнитных вариаций показано, что формирование наиболее мощных вулканогенных разрезов в Норильском и Маймеч-Котуйском районах реализовалось в виде серии кратких интенсивных эпизодов магматизма (“вулканических пульсов”) [Павлов и др., 2011; Pavlov et al., 2019]; 2) рассчитан новый палеомагнитный полюс NМК для рубежа перми–триаса Сибирской платформы [Pavlov et al., 2019]; 3) на основании сравнения палеомагнитных направлений показано, что все основные рудоносные интрузии Норильского района и их сателлиты сформировались в течение относительного узкого временного интервала, синхронно моронговской–мокулаевской свитам Норильского района [Latyshev et al., 2020a].

По Кулюмбинскому району на данный момент имеются относительно немногочисленные и разрозненные палеомагнитные данные [Pavlov et al., 2007; Latyshev et al., 2017]. Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы дать детальную палеомагнитную характеристику интрузивных образований Кулюмбинского района и использовать полученные данные для возрастного расчленения интрузивных комплексов, корреляции основных магматических событий с соседними районами Сибирской трапповой провинции и оценки продолжительности магматизма.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Район исследования охватывает среднее и нижнее течение р. Кулюмбэ, к востоку от Хантайского водохранилища (Красноярский край). В геологическом отношении Кулюмбинский район приурочен к зоне сочленения западного

борта Тунгусской синеклизы и Хантайско-Рыбинского вала (рис. 16). Разрез стратифицированных образований включает терригенно-карбонатные толщи кембрия–девона, угленосные терригенные отложения тунгусской серии (средний карбон–пермь) и вулканогенные образования нижней части туфо-лавовой толщи (от сыверминской до надеждинской свиты), как правило, относимые к нижнему триасу (например, [Fedorenko et al., 1996]). Осадочные толщи этого (10–15°) моноклинально погружаются на восток, как и перекрывающие их вулканиты, которые слагают борт Нирунгдинской мульды. Пермо-триасовые интрузивные тела, как правило, представляют собой силлоподобные интрузии долеритов и габбро-долеритов мощностью от 5–6 до 50 м, конформно залегающие среди палеозойских осадочных толщ и, редко, прорывающие низы сыверминской свиты. Релевантные датировки изотопного возраста опробованных интрузивных тел авторам неизвестны, однако, по общепринятому мнению, все интрузии в данном районе отвечают пермо-триасовому трапповому магматизму (например, [Pavlov et al., 2007; Krivolutskaya et al., 2020b]). Тектоническая структура региона осложнена региональной Имангдино-Летнинской зоной разрывных нарушений, которая простирается на северо-восток, ограничивая Хантайско-Рыбинское поднятие.

В настоящей работе используются палеомагнитные результаты по 36 сайтам, представляющим трапповые интрузивные тела, включая новые данные и опубликованные ранее в работах [Pavlov et al., 2007; Latyshev et al., 2017]. По географическому положению опробованные интрузии можно разделить на 5 локаций (районов), краткое описание которых приведено ниже. Принадлежность интрузивных тел к тому или иному комплексу или типу определялась по полевым данным, геологической карте [Павлов и др., 1988] или на основании геохимических характеристик, опубликованных в работах [Krivolutskaya et al., 2020a; 2020b].

1. В 2–3 км выше устья р. Халиль были опробованы 5 близко расположенных сайтов (KUL-14, KUL-16, K1, K2, K4) в локации, известной как “Кулюмбинская интрузия”. Полевые данные не позволяют судить о том, действительно ли изученные обнажения относятся к единому интрузивному телу; тем не менее, судя по геологической карте [Павлов и др., 1988], в районе отбора присутствуют интрузии, представляющие не менее чем три комплекса: ергалахский, курейский и катангский. Более того, на основании геохимических признаков в этом же районе в близлежащих обнажениях авторы статьи [Krivolutskaya et al., 2020b] предложили выделить еще один, новый кулюмбинский комплекс. Таким образом, “Кулюмбинская интрузия”, скорее всего, представ-

ляет собой несколько пространственно близких, но петрографически и геохимически контрастных тел. Все отобранные интрузии внедрены в тунгусскую серию и имеют силлоподобную морфологию.

2. В районе устья р. Халиль были опробованы 12 сайтов, представляющих интрузивные тела катангского комплекса (табл. 1), и еще одно тело, отнесенное к курейскому комплексу, — KUL-40. Силлы локализованы в девонских отложениях и конформно им полого падают на восток.

3. В долине р. Халиль были отобраны образцы из Халильской интрузии в трех сайтах (X-7, X-35, K3). Халильская интрузия по геохимическим данным отнесена к курейскому комплексу [Krivolutskaya et al., 2020a] и субконформно залегает в лавах сыверминской свиты.

4. Ниже устья р. Турука в долине Кулюмбэ опробованию подверглись интрузии Силурийская (K7, норильский тип норильского комплекса), Ильтыкская (K8, круглогорский тип норильского комплекса), а также безымянные силлы далдыканского (K5, K6, KX, K9, K10), катангского (KV7) и кузьмовского (K11) комплексов в общей сложности в 15 сайтах. Интрузивные тела локализованы в силурийских отложениях и полого падают на восток.

5. В нижнем течении р. Кулюмбэ, в отложениях кембрия—ордовика, были опробованы мало мощные интрузивные тела далдыканского комплекса в 6 сайтах: KV8—KV13. Палеомагнитные результаты по этим интрузиям ранее публиковались в работе [Pavlov et al., 2007].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор палеомагнитных образцов производился вручную или с помощью механического пробоотборника Romago Ltd, их ориентировка в пространстве — с помощью магнитного компаса, с постоянным контролем возможного влияния сильно магнитных пород на стрелку компаса. Из каждого сайта было отобрано от 10 до 25 ориентированных образцов. Величина местного магнитного склонения рассчитывалась по модели IGRF. Лабораторные палеомагнитные исследования и обработка результатов магнитных чисток выполнялись в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН. Все образцы были подвергнуты ступенчатой температурной чистке до полного размагничивания (10–16 шагов), которое достигалось в большинстве случаев при температурах 520–600°C. Для размагничивания образцов использовались немагнитные печи “ММТД-80” с величиной нескомпенсированного поля не более 5–10 мТл. Остаточная намагниченность образцов измерялась при помощи спин-магнитометра JR-6 AGICO и криогенного

магнитометра 2G Enterprise. Для части образцов, помимо терморазмагничивания, на дублях была проведена также чистка переменным магнитным полем с помощью размагничивающей установки, встроенной в криогенный магнитометр. Чистка переменным полем проводилась до 130 мТл. Обработка измерений остаточной намагниченности выполнялась при помощи пакета программ Enkin [Enkin, 1994], с использованием при выделении компонент намагниченности метода PCA [Kirschvink, 1980]. Анализ полученных данных производился с использованием статистики Фишера [Fisher, 1953].

Температурные кривые намагниченности насыщения $J_s(T)$ снимались при нагреве до 700°C и последующем охлаждении до комнатной температуры на вибромагнитометре РМС MicroMag 3900 в поле 0.4 Тл. Зависимость магнитной восприимчивости от температуры $\chi(T)$ измерялась на каппа-метре МФК-1FA с приставкой для высокотемпературных измерений CS-3 в том же температурном диапазоне. Петли гистерезиса снимались на вибромагнитометре РМС MicroMag 3900 при комнатной температуре с величиной поля насыщения 1 Тл. Доменная структура ферромагнитных зерен оценивалась по диаграмме Дэй—Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002].

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

Исследованные интрузии долины р. Кулюмбэ по составу минералов-носителей намагниченности можно поделить на 3 группы. Образцы группы 1 по температурным кривым намагниченности насыщения и магнитной восприимчивости демонстрируют преобладание магнетита с точками Кюри 580–590°C (рис. 2а). По термокривым магнитной восприимчивости также фиксируется присутствие гематита с $T_c \sim 675^\circ\text{C}$ или парамагнитной составляющей (рис. 2б). Большинство образцов этой группы после нагревов демонстрируют исключительно стабильное поведение. Примерами этой группы являются образцы интрузий норильского комплекса: Ильтыкской (сайт K8) и Силурийской (сайт K7), а также интрузии в сайте K11, отнесенной к кузьмовскому комплексу. Устойчивость образцов этой группы к нагревам указывает на вероятное формирование гематита в процессе гетерофазного высокотемпературного окисления при остывании магматического тела и является косвенным свидетельством в пользу первичности остаточной намагниченности.

Группа 2 отличается от группы 1 отсутствием следов гематита по данным термокаппаметрии и несколько более низкими температурами Кюри основной фазы — магнетита или низкотитанистого титаномагнетита ($T_c = 560\text{--}580^\circ\text{C}$) (рис. 2в–2г). Образцы этой группы также устойчивы к нагревам; в некоторых образцах после нагрева при

Таблица 1. Палеомагнитные направления и виртуальные геомагнитные полюсы, рассчитанные по опробованным интрузиям. *N* – число образцов (сайтов), *Dg(s)/Ig(s)* – склонение/наклонение в географической (стратиграфической) системе координат; *K* – кучность, $\alpha 95$ – угол доверия; *Plat(g(s))/Plong(g(s))* – широта/долгота виртуального геомагнитного полюса в географической (стратиграфической) системе координат

Сайт	Комплекс/тип	<i>N</i>	<i>Dg</i> , °	<i>Ig</i> , °	<i>Ds</i> , °	<i>Is</i> , °	<i>K</i>	$\alpha 95$	<i>Plong(g)</i> °	<i>Plat(g)</i> °	<i>Plong(s)</i> °	<i>Plat(s)</i> °	<i>A95</i>
Кулюмбинская интрузия													
KUL-14	Каганский	8	338.5	81.3	58	83.3	34.5	9.6	44	81.3	127	71.4	18.6
KUL-16	Курейский	13	337.8	75.8	21.8	80.8	23.2	8.8	342.1	79.7	141	81.6	16.7
K1	Курейский	6	19.4	75.5	55.6	73.6	144.5	5.6	203.8	80.4	171.7	65.0	9.5
K2	Курейский	17	81.5	85.7	106.4	76.3	193.3	2.6	112.3	67.7	132.5	51.9	4.6
K4	Ергалахский	26	30.4	80.4	74.4	75.8	72.7	3.3	148.1	79.1	152.4	60.8	5.8
Среднее направление и полюс для Кулюмбинской интрузии		5	7.0	81.1	66.7	79.2	126.9	6.8	112.3	84.5	145.3	67.0	12.7
Район устья р. Халиль													
KUL-2	Каганский	10	148.8	65.3	133.9	59.0	32.7	8.6	112.7	27.7	126.4	23.2	11.1
KUL-6	Каганский	14	106.7	75.2	96.7	50.6	30.8	7.3	133.9	50.3	160.7	26.4	8.1
KUL-17	Каганский	13	39.2	67.9	53.6	60.6	9.2	14.5	201.5	64.5	194.5	51.4	19.3
KUL-21	Каганский	14	119.2	45.6	115.2	36.7	20.2	9.1	143.0	10.0	148.8	10.0	8.1
KUL-28	Каганский	8	57.0	66.0	65.9	57.2	31.8	10.0	185.1	55.9	184.9	43.6	12.5
KUL-32	Каганский	6	48.4	56.9	56.5	48.9	52.0	9.4	203.1	49.6	199.0	39.8	10.1
KUL-38	Каганский	13	100.4	71.9	96.9	62.0	146.3	3.4	142.4	47.7	154.4	37	4.6
KUL-40	Курейский	11	21.6	88.7	83.4	79.5	11.7	13.9	92.3	70.4	137.1	62.2	25.9
KUL-44	Каганский	14	120.0	65.8	112	56.8	92.4	4.2	133.9	34.4	145.1	26.8	5.2
Среднее направление и полюс для прямой полярности <i>in situ</i>		8	84.5	74.0			24.5	11.4	148.1	55.7			19.4
Среднее направление и полюс для прямой полярности (стратиграфическая система координат)		8			86.8	62.1	22.8	11.9			161.6	41.5	17.4
KUL-24	Каганский	6	139.8	-70.1	168.5	-74.6	14.2	18.4	342.9	66.8	310.5	81.6	31.9
KUL-25	Каганский	7	298	-65.3	290.6	-56.2	45.7	9.0	135.7	34.3	146.5	26.7	11.0
KUL-1	Каганский	8	314.9	-68.5	301.8	-60.6	18.5	13.2	121.5	34.4	135.4	27.9	17.6
KUL-46	Каганский	8	274.8	-64.1	273.6	-54.1	15.9	14.3	154.5	40.0	161.8	30.5	16.8

Таблица 1. Продолжение

Сайт	Комплекс/тип	N	Dg, °	Ig, °	Ds, °	Is, °	K	$\alpha 95^\circ$	Plong(g)°	Plat(g)°	Plong(s)°	Plat(s)°	A95°
	Среднее направление и полюс для обратной полярности	3	294.8	-66.8	287.9	-57.5	93.8	12.8	136.8	37.0	147.8	28.8	18.1
Халильская интрузия													
X-7	Курейский	8	289.9	-52.4	291.1	-42.5	21.0	12.4	148.8	23.5	151.1	15.3	12.0
X-35	Курейский	6	29.2	66.5	50.6	64.2	34.2	11.6	217.3	66.1	194.1	56.3	16.6
K3	Курейский	27	113.3	75.5	114.8	65.5	64.1	3.5	129.6	49.1	138.1	35.4	5.1
Район устья р. Турука													
KV7	Катангский	6	31.2	88.3	112.9	70.8	63.0	8.5	94.5	70.8	134.8	42.7	13.8
K7	Норильский	37	52.6	79.7	89.3	71.6	88.9	2.5	148.6	71.6	150.2	50.8	4.1
K8	Круглогорский	31	135.6	82.8	124.2	74.1	88.5	2.8	107.2	56.4	124.2	44.5	4.8
K11	Кузьмовский	19	37.1	80.3	75.0	77.1	154.9	2.7	148.5	76.9	148.2	62.0	4.9
	Среднее направление и полюс для прямой полярности	4	62.7	84.4	101.7	74.2	153.3	4	119.8	70.5	138.1	50.5	13.4
K5	Далдыканский?	56	283.2	-83.2	294.6	-74.7	201.9	1.3	117.7	61.9	129.4	47.6	2.3
KX	Далдыканский?	17	266.9	-84.5	288.9	-75.1	132.5	3.1	116.9	66.1	132.4	49.6	5.4
K6	Далдыканский?	35	266.1	-73.6	287.7	-57	111.9	2.3	149.2	54.3	148.2	28.4	2.9
K9	Далдыканский	39	270.7	-75.3	284.1	-65.3	144.2	1.9	143.1	55.0	146.0	38.4	2.8
K10	Далдыканский	19	311.8	-84.0	304.6	-72.1	102.3	3.3	106.4	58.9	125.7	41.6	5.5
	Среднее направление и полюс для обратной полярности <i>in situ</i>	5	275.2	-80.4			188.3	5.6	128.2	60.3			10.2
	Среднее направление и полюс для обратной полярности (стратиграфическая система координат)	5			290.9	-69.0	98.2	7.8			137.1	41.5	10.9
Нижнее течение р. Кулумбэз (из работы (Pavlov et al., 2007))													
KV8	Далдыканский	10	299.5	-82.1	306.6	-65.2	85	5.3	114.7	57.6	129.0	32.0	7.7
KV9	Далдыканский	7	329.7	-81.2	323.6	-61.2	307	3.6	103.0	52.2	117.5	23.6	4.8
KV10	Далдыканский	7	334.2	-80.5	313	-62.5	96	6.2	101.4	50.6	125.2	27.3	8.6
KV11	Далдыканский	20	319.5	-82.3	308.1	-67.3	78	3.7	106.0	55.2	126.4	34.3	5.6

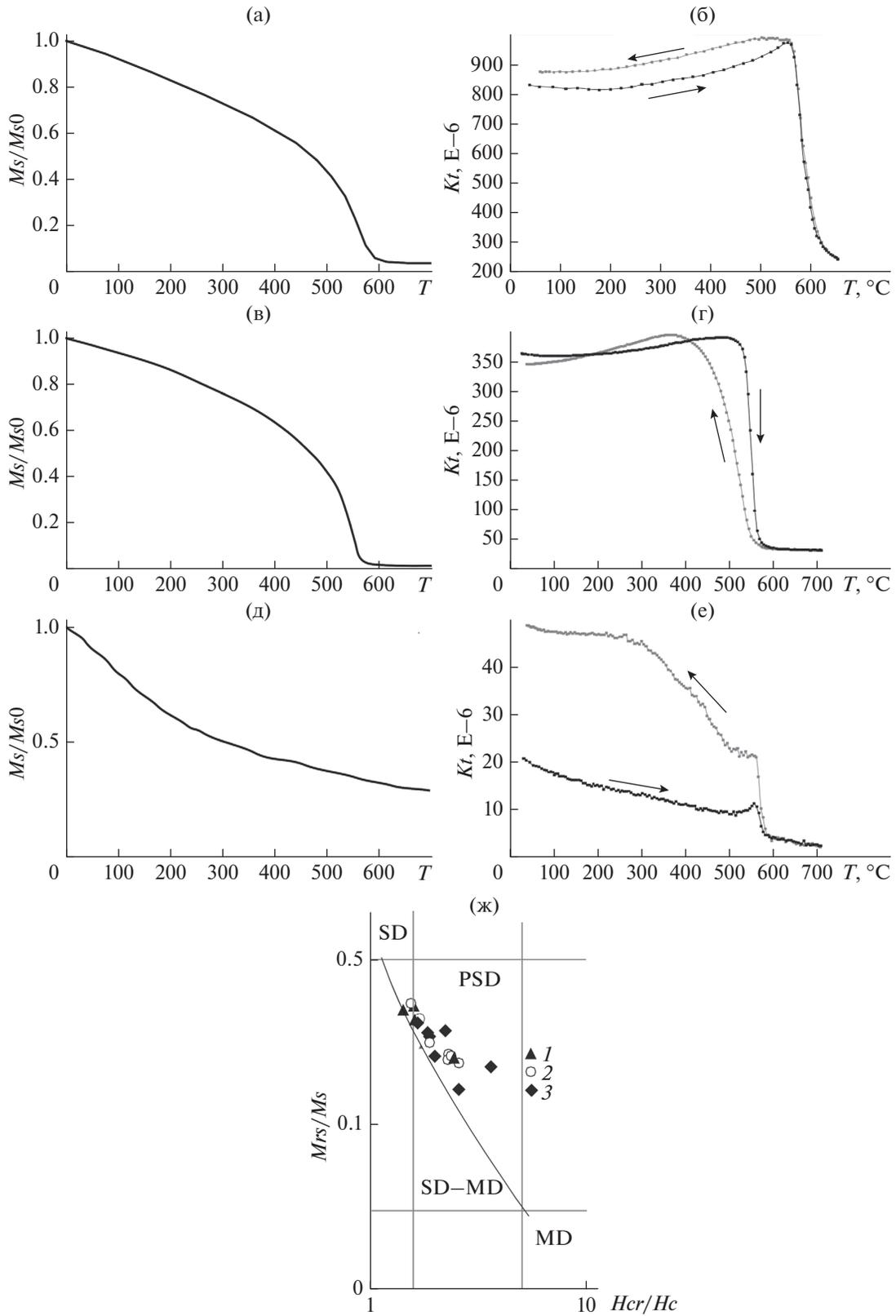
Таблица 1. Окончание

Сайт	Комплекс/тип	N	Dg, °	Ig, °	Ds, °	Is, °	K	$\alpha 95^\circ$	Plong(g)°	Plat(g)°	Plong(s)°	Plat(s)°	A95°
KV12	Далдыканский	9	317.1	-77.6	306.2	-64.2	372	2.7	112.7	47.6	129.5	30.9	3.9
KV13	Далдыканский	17	306.7	-74.7	309.1	-65.1	96	3.7	121.6	44.9	126.8	31.2	5.4
	Среднее направление и полюс <i>in situ</i>	6	317.0	-79.9			468.2	3.1	110.1	51.6			5.7
	Среднее направление и полюс (стратиграфическая система координат)	6			311.4	-64.4	491.2	3.0			125.6	29.9	4.5
	Среднее направление и полюс <i>in situ</i> по интрузиям обратной полярности в устье р. Турука и нижнем течении р. Кулюмбэ	11	298.7	-80.8			191.9	3.3	117.3	55.9			6.2
	Среднее направление и по интрузиям обратной полярности в устье р. Турука и нижнем течении р. Кулюмбэ (стратиграфическая система координат)	11			303.1	-66.8	115.8	4.3			130.4	35.3	6.4
	Среднее направление и полюс <i>in situ</i> по всем сайтам обратной полярности	14	297.1	-77.8			90.9	4.2	122.7	52.2			7.3
	Среднее направление и полюс по всем сайтам обратной полярности (стратиграфическая система координат)	14			299.0	-65.0	83.4	4.4			134.3	34.1	6.4
	Среднее направление и полюс <i>in situ</i> по всем сайтам прямой полярности	19	65.0	79.7			33.8	5.9	141.6	68.4			11.5
	Среднее направление и полюс по всем сайтам прямой полярности (стратиграфическая система координат)	19			85.8	70.2	30.4	6.2					13.5
	Среднее направление и полюс для сайтов каганского комплекса прямой полярности (<i>in situ</i>)	5	120.4	74.5			48.5	11.1	126.3	47.1			19.5
	Среднее направление и полюс для сайтов каганского комплекса прямой полярности (стратиграфическая система координат)	5			109.8	60.6	56.9	10.2			144.3	31.8	14.0

Средний полюс для всех сайтов, рассчитанный в географической системе координат: $N = 33$, $Plong = 130.9^\circ$, $Plat = 61.6^\circ$, $A95 = 7.1^\circ$

Средний полюс для всех сайтов, рассчитанный в стратиграфической системе координат: $N = 33$, $Plong = 143.7^\circ$, $Plat = 44.4^\circ$, $A95 = 6.9^\circ$

Средний полюс, рассчитанный для в географической системе координат для сайтов обратной полярности в районе устья р. Турука и в стратиграфической — для всех остальных сайтов: $N = 33$, $Plong = 143.1^\circ$, $Plat = 47.4^\circ$, $A95 = 7.1^\circ$



← **Рис. 2.** Магнитная минералогия исследованных интрузивных тел: (а), (в), (д) — кривые температурной зависимости намагниченности насыщения (T — температура ($^{\circ}\text{C}$), M_s — намагниченность насыщения; M_{s0} — намагниченность насыщения при комнатной температуре): (а) — обр. К136, сайт К7, Силурийская интрузия (норильский тип); (в) — обр. К110, сайт К6, далдыканский комплекс; (д) — обр. К1, сайт К1, Кулюмбинская интрузия (курейский комплекс); (б), (г), (е) — кривые температурной зависимости магнитной восприимчивости (K — магнитная восприимчивость; T — температура. Стрелками показаны нагрев/охлаждение): (б) — обр. К136, сайт К7, Силурийская интрузия (норильский тип); (г) — обр. К110, сайт К6, далдыканский комплекс; (е) — обр. К1, сайт К1, Кулюмбинская интрузия (курейский комплекс); (ж) — диаграмма Дяэ–Данлопа. M_s — намагниченность насыщения; M_{rs} — остаточная намагниченность насыщения; H_c — коэрцитивная сила; H_{cr} — остаточная коэрцитивная сила; SD — область однодоменных частиц; PSD — область псевдооднодоменных частиц; MD — область многодоменных частиц; SD–MD — линия смешения одно- и многодоменных зерен [Dunlop, 2002]; 1 — норильский и кузьмовский комплексы; 2 — далдыканский комплекс; 3 — курейский комплекс.

охлаждении на терموкривых $\alpha(T)$ фиксируется снижение точки Кюри до $500\text{--}550^{\circ}\text{C}$, что может быть связано с гомогенизацией распавшегося титаномагнетита. Эта группа включает образцы интрузий, отнесенных к далдыканскому комплексу, а также Халильской интрузии (К3) и Кулюмбинской интрузии (К2), принадлежащих к курейскому комплексу. Образцы групп 1 и 2, по данным магнитной чистки, в большинстве образцов содержат палеомагнитный сигнал высокого качества.

Группа 3 объединяет образцы из сайтов К1, К4, также представляющих Кулюмбинскую интрузию. На температурных кривых намагниченности насыщения образцы этой группы характеризуются вогнутыми графиками, типичными для парамагнетиков (рис. 2д). По данным термокаппапараметрии, несмотря на невысокую величину магнитной восприимчивости в образцах, обнаруживается небольшое количество магнетита с температурами Кюри $580\text{--}600^{\circ}\text{C}$. При охлаждении после нагрева происходит резкий рост магнитной восприимчивости, связанный с новообразованием магнетита (рис. 2е). Описанные магнитные свойства образцов группы 3 объясняют относительно низкое качество палеомагнитной записи в сайте К1 (см. ниже).

Несмотря на различие термомагнитных свойств, значения гистерезисных параметров для всех трех групп довольно близки, попадают в псевдооднодоменную область на диаграмме Дяэ–Данлопа и варьируют в диапазонах: $M_{rs}/M_s = 0.08\text{--}0.27$, $H_{cr}/H_c = 1.4\text{--}3.6$ (рис. 2ж). При этом поле образцов групп 1 и 2 вытянуто вдоль линии смешения однодоменных и многодоменных зерен [Dunlop, 2002], в то время как образцы группы 3 характеризуются более высокими отношениями H_{cr}/H_c и указывают на возможное наличие суперпарамагнитных частиц. Вариации доменного состава образцов, характерные для групп 1 и 2, являются типичными для трапповых интрузий Сибирской платформы (например, [Latyshev et al., 2020a]).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Все образцы были подвергнуты стандартному ступенчатому терморазмагничиванию до температур $540\text{--}600^{\circ}\text{C}$, в редких случаях — до 620°C . Во многих сайтах (К1–К11, табл. 1) было проведено также массовое размагничивание образцов переменным магнитным полем. В некоторых сайтах (KUL-2, KUL-6, KUL-38, KUL-44) производилась выборочная чистка переменным полем для тех образцов, которые показали неудовлетворительные результаты термочистки. В случаях, когда результаты размагничивания переменным полем оказывались более качественными, для этих сайтов средние палеомагнитные направления, приведенные в работе [Latyshev et al., 2017], были пересчитаны с учетом новых данных. В общей сложности в настоящей работе обсуждаются результаты по 24 сайтам с новыми или пересчитанными данными, 5 сайтам, приведенным в статье [Latyshev et al., 2017], и 7 сайтам, приведенным в работе [Pavlov et al., 2007] (табл. 1).

Несмотря на то, что качество палеомагнитной записи в исследованных интрузиях варьирует от отличного до практически неинтерпретируемого, средние палеомагнитные направления были рассчитаны по всем сайтам. Для большинства объектов рассчитанные палеомагнитные направления близки к ожидаемым для пермо-триасовых траппов Сибирской платформы (например, [Pavlov et al., 2019]), отдельные исключения будут обсуждаться ниже. Поскольку опробованные интрузивные тела находятся в пределах области, приуроченной к Имангдино–Летнинской региональной зоне разрывных нарушений, и могут находиться внутри блоков с разным временем дислокаций относительно внедрения интрузий, в первом приближении мы рассматриваем палеомагнитные результаты по каждому из исследованных районов.

В габбро–долеритах “Кулюмбинской интрузии” качество палеомагнитного сигнала варьирует от сайта к сайту. Как правило, в образцах изолируются две компоненты естественной остаточной намагниченности. Низкотемпературная и низкокоэрцитивная компонента разблокируется к $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ и $5\text{--}10$ мТл, а ее направления ха-

отичны. Высокотемпературная компонента прямой полярности размагничивается в основном в температурном интервале 400–580°C (рис. 3а), на диаграммах Зийдервельда [Zijderveld, 1967], приходя в начало координат. При чистке переменным полем выделяется та же компонента с медианным разрушающим полем 15–40 мТл (рис. 3б). При этом в ряде образцов в сайтах KUL-16, KUL-14 эта компонента демонстрирует направления, нехарактерные для трапповых, с аномально низкими наклонениями, а в сайте K1 часто не выделяется из-за шумного сигнала. Скорее всего, это объясняется особенностями магнитной минералогии пород в соответствующих сайтах (см. раздел “Магнитные свойства”). Несмотря на это, средние палеомагнитные направления были рассчитаны для всех опробованных сайтов Кулюмбинской интрузии, и они расположены достаточно близко друг к другу (рис. 4а). Поэтому, несмотря на то, что опробованные сайты были отнесены к разным интрузивным комплексам, можно предположить, что формирование остаточной намагниченности в них происходило в достаточно близкое время.

Габбро-долериты *Халильской интрузии* в целом обладают ясным палеомагнитным сигналом. Помимо низкотемпературной компоненты, которая размагничивается к 250–300°C и характеризуется значительным разбросом, в большинстве образцов выделяется единственная стабильная компонента, разблокируемая в температурном интервале 450–580°C (рис. 3в). В ряде образцов на наиболее высоких температурах (580–600°C) палеомагнитный сигнал становится хаотичным из-за новообразования магнитных минералов. При чистке переменным полем образцов сайта K3 были выделены те же компоненты; медианное разрушающее поле составляет в среднем 15 мТл.

Необходимо отметить, что в сайте X-7 высокотемпературная компонента имеет обратную полярность, а в остальных двух — прямую. При этом сайт X-7 находится практически в экзоконтактовой зоне более молодой интрузии, отнесенной к катангскому комплексу, поэтому следует учитывать возможность перемагничивания пород этого сайта за счет термальной или химической переработки при внедрении позднейшего тела. Что касается средних направлений по сайтам X-35 и K3 прямой полярности, то они значительно удалены друг от друга как в географической, так и в стратиграфической системах координат (рис. 4а, 4б). Для объяснения этого феномена мы должны предположить либо различное время формирования намагниченности в опробованных сайтах *Халильской интрузии*, либо наличие неучтенных тектонических дислокаций. Среднее направление по сайту X-35 рассчитано всего по 6 образцам и характеризуется большим доверительным интервалом ($\alpha_{95} = 11.6^\circ$); кроме того, качество па-

леомагнитного сигнала в образцах сайта X-35 в среднем значительно хуже, чем в сайте K3. В связи с этим при дальнейших расчетах были использованы только данные по сайту K3.

В интрузивных телах *окрестностей устья р. Халиль* качество палеомагнитного сигнала изменяется в разных сайтах от хорошего до крайне шумного. Низкотемпературная компонента выделяется во всех сайтах, разрушаясь к температурам 250–350°C. Направления этой компоненты характеризуются значительным разбросом, но во многих случаях близки к современному полю в районе отбора, поэтому, скорее всего, природа низкотемпературной компоненты вязкая. Высокотемпературная компонента изолируется в большинстве образцов в температурном интервале 500–600°C. В 9 сайтах эта компонента имеет прямую полярность, в 4 — обратную (рис. 3г, 3д). Также во многих сайтах в ряде образцов присутствует среднетемпературная компонента, точный расчет направлений которой часто затруднен из-за перекрытия ее деблокирующих спектров с низко- и высокотемпературной компонентами. Тем не менее, какой-либо закономерности в распределении среднетемпературной компоненты выделить не удалось. Выборочная чистка переменным полем показала, что выделяемая этим способом высококоэрцитивная компонента по направлениям близка к высокотемпературной.

Средние палеомагнитные направления по высокотемпературной компоненте были рассчитаны по всем 13 сайтам. Несмотря на довольно большой внутрисайтовый разброс ($\alpha_{95} > 10^\circ$ в 6 сайтах), направления в основном близки к ожидаемым трапповым (рис. 4в, 4г). Исключения представляют сайты KUL-21 с аномально низким для Сибирских траппов наклонением ($I = 45.6^\circ$ в географической системе координат и 36.7° в стратиграфической) и KUL-24, который характеризуется обратной полярностью и юго-восточными склонениями, что также нетипично для пермо-триасовых траппов. Учитывая значительный радиус круга доверия для последнего сайта ($\alpha_{95} = 18.4^\circ$), мы считаем результаты, полученные по нему, ненадежными и не используем это направление при дальнейших расчетах. Что касается сайта KUL-21, то низкое наклонение может указывать на его формирование во время инверсии или экскурса геомагнитного поля, что фиксировалось ранее для лавовых потоков Норильского района [Neupenann et al., 2004; Павлов и др., 2011], однако на текущий момент других подтверждений этого у нас нет.

Интрузивные тела *района устья р. Турука*, как правило, содержат ясный и хорошо интерпретируемый палеомагнитный сигнал. Низкотемпературная и низкокоэрцитивная компонента присутствует во всех сайтах, разрушается к 250–

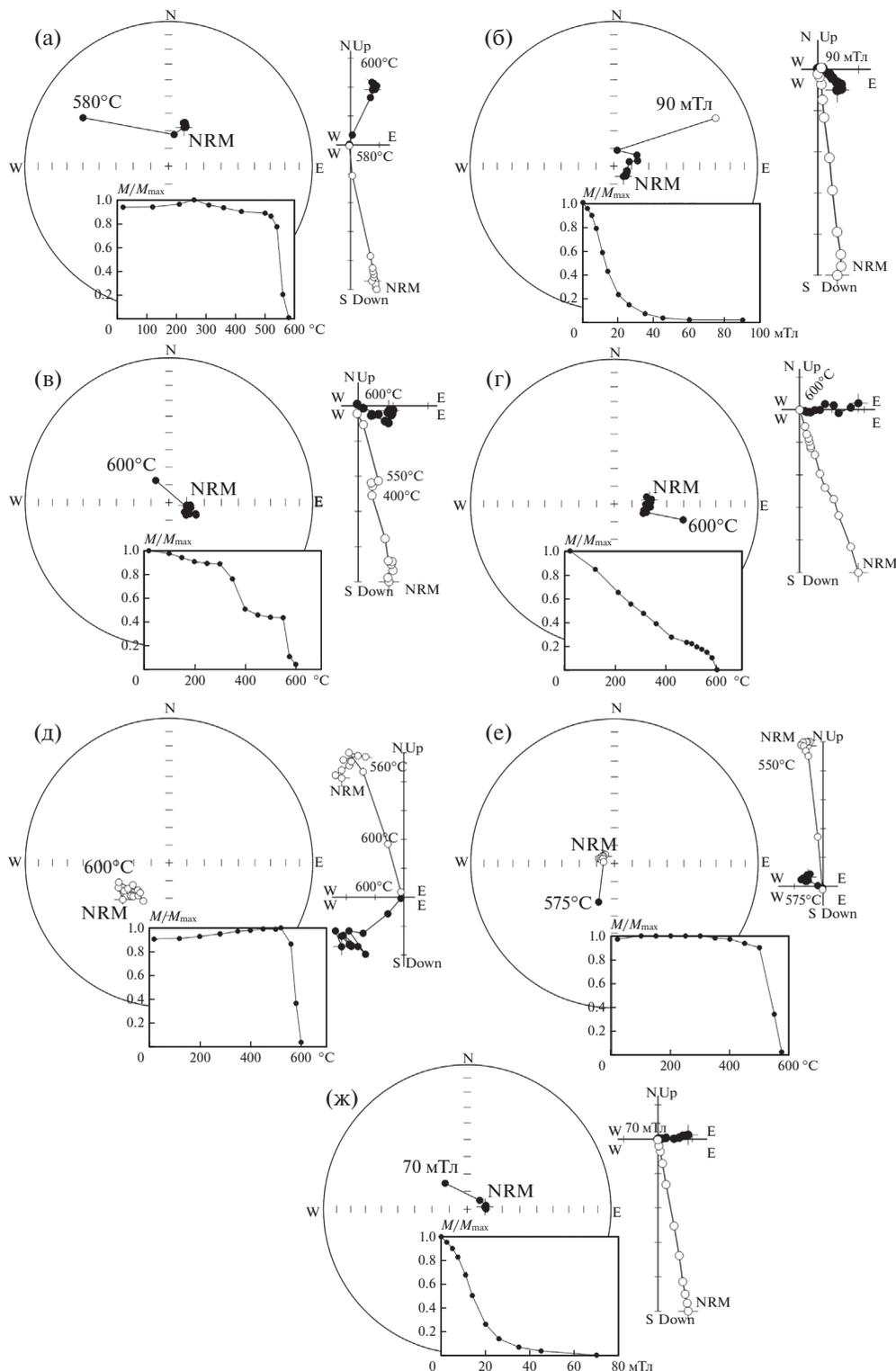


Рис. 3. Результаты магнитной чистки: (а) — обр. 68, сайт KUL-14, Кулюмбинская интрузия, термочистка; (б) — обр. K18, сайт K2, Кулюмбинская интрузия (курейский комплекс), чистка переменным полем; (в) — обр. 33, сайт K3, Халильская интрузия (курейский комплекс), термочистка; (г) — обр. 95, сайт KUL-17, катангский комплекс, термочистка; (д) — обр. 244, сайт KUL-46, катангский комплекс, термочистка; (е) — обр. K89, сайт K5, далдыканский комплекс, термочистка; (ж) — обр. 130, сайт K7, Силурийская интрузия (норильский тип), чистка переменным полем.

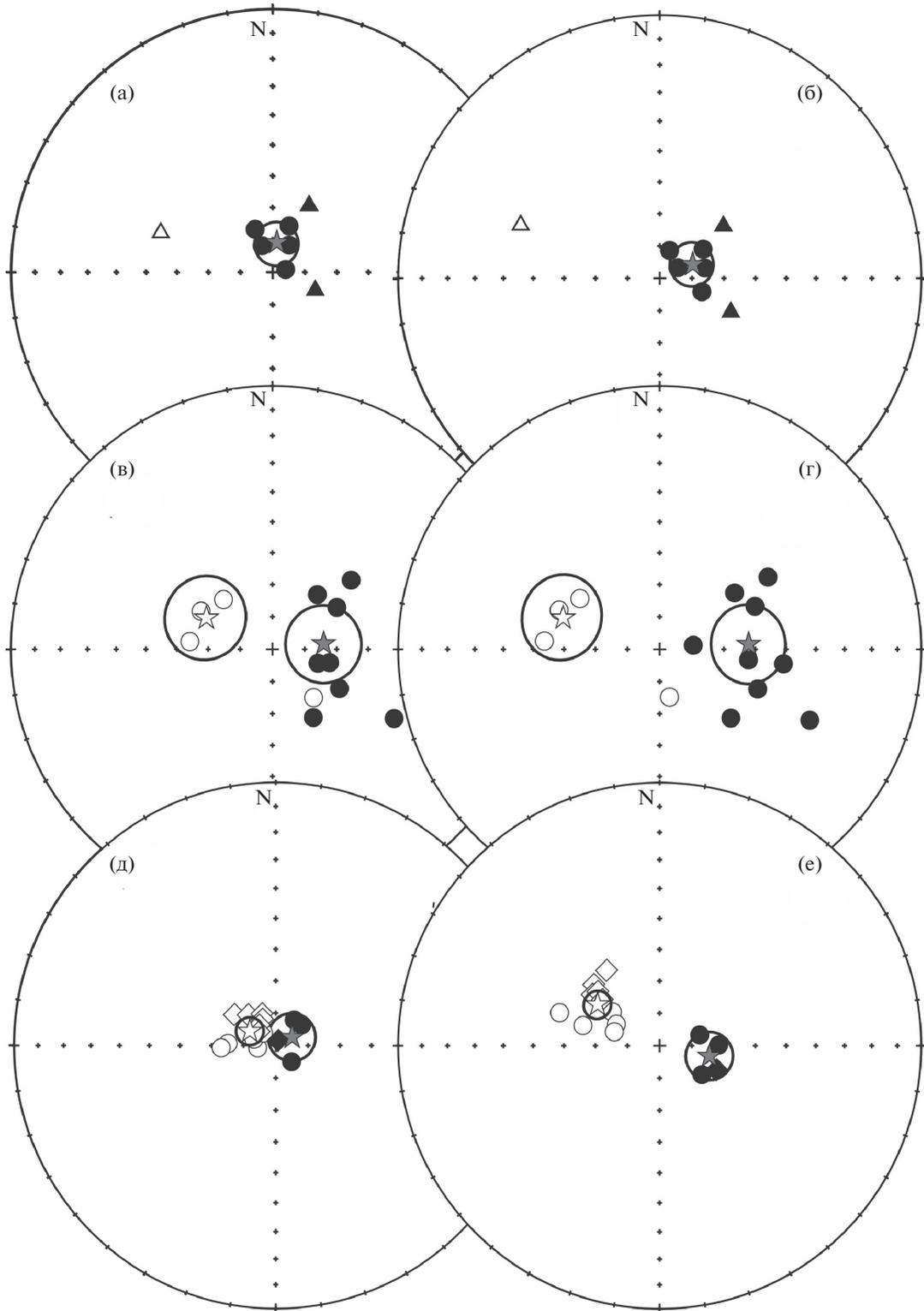


Рис. 4. Распределение средних по сайтам палеомагнитных направлений: (а)–(б) – Стереографическая проекция. Заполненные фигуры – нижняя полусфера; полые – верхняя. Средние направления показаны звездами с доверительным интервалом. Палеомагнитные направления Кулюмбинской и Халильской интрузий в географической (а) и стратиграфической (б) системах координат. Сайты Кулюмбинской интрузии – круги; Халильской интрузии – треугольники. Звезда с доверительным интервалом – среднее для Кулюмбинской интрузии; (в)–(г) – палеомагнитные направления интрузий района устья р. Халиль в географической (в) и стратиграфической (г) системах координат; (д)–(е) – палеомагнитные направления интрузий нижнего течения р. Кулюмбэ и района устья р. Турука в географической (д) и стратиграфической (е) системах координат. Ромбы – сайты из работы [Pavlov et al., 2007]; круги – данная работа.

300°C (редко до 400°C) или 5–10 мТл. Направление этой компоненты часто близко к современным, а ее происхождение, скорее всего, вязкое. Наиболее стабильная компонента намагниченности в 5 сайтах, представляющих интрузии далдыканского комплекса, характеризуется обратной полярностью, в остальных сайтах этого района имеет прямую полярность.

В силлах, отнесенных к далдыканскому комплексу, стабильная компонента выделяется при температурной чистке в интервале 450–600°C, а при чистке переменным полем полностью разблокируется к 50–90 мТл (рис. 3е). Медианное разрушающее поле составляет 15–25 мТл. Направление высокотемпературной высококоэрцитивной компоненты тесно сгруппированы внутри сайта, а среднесайтовые направления находятся в области, ожидаемой для траппов обратной полярности, хотя и значимо отличаются от направлений сайтов нижнего течения р. Кулюмбэ (см. далее) (рис. 4д, 4е).

Высокотемпературная компонента прямой полярности была изолирована в сайтах К7 (Силурийская интрузия, норильский тип норильского комплекса), К8 (Ильтыкская интрузия, круглогорский тип норильского комплекса), К11 (интрузия кузьмовского комплекса), а также пространственно близком к ним сайте KV7 из работы [Pavlov et al., 2007]. Во всех указанных сайтах температурный интервал этой компоненты находится в диапазоне 450–600°C. АF-чистка позволяет выделить эту же компоненту намагниченности в полях 10–70 мТл, в некоторых случаях – до 100 мТл (рис. 3ж). В сайте К11 при термочистке в диапазоне 150–500°C также изолируется среднетемпературная компонента, которая, возможно, является результатом перемагничивания при внедрении близлежащих интрузий обратной полярности. Средние по сайтам направления наиболее стабильной компоненты рассчитываются с высокой кучностью, демонстрируют высокие наклонения и восточные либо северо-восточные склонения, что типично для трапповых направлений (рис. 4д, 4е).

Результаты палеомагнитных исследований интрузий нижнего течения р. Кулюмбэ приведены в работе [Pavlov et al., 2007]. Вкратце, во всех 5 сайтах, а также обожженных экзоконтактовых зонах силлов уверенно выделяется стабильная компонента обратной полярности. Средние направления по сайтам образуют на стереограмме тесный кластер и близки к другим трапповым направлениям обратной полярности (рис. 4д, 4е).

Таким образом, для каждого из опробованных районов в ряде случаев были получены достаточно надежные палеомагнитные направления. Первичность остаточной намагниченности в исследованных интрузивных телах подтверждается:

1) близостью основной массы рассчитанных направлений к ожидаемым для траппов (например, [Павлов и др., 2011]);

2) положительным тестом контакта: вмещающие раннепалеозойские отложения в некоторых сайтах, опробованных ранее, сохраняют первичную дотрапповую компоненту [Pavlov, Gallet, 1998; Pavlov et al., 2008];

3) наличием направлений прямой и обратной полярности в близко расположенных сайтах (районы устьев рр. Халиль, Турука), что свидетельствует об отсутствии регионального посттраппового перемагничивания;

4) стабильностью магнитных свойств и отсутствием магнитоминералогических изменений при нагревах для большинства образцов.

При этом нужно подчеркнуть, что на основании имеющихся данных мы не можем полностью исключить вероятность локального перемагничивания в отдельных сайтах при внедрении более молодых интрузивных тел. Тем не менее, возраст наложенной компоненты и в этом случае будет отвечать одному из этапов пермо-триасового магматизма.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для дальнейшего анализа данных в первую очередь необходимо определить, следует ли ввести поправку за наклон вмещающих толщ, т.е. произошло ли внедрение интрузий и приобретение остаточной намагниченности в них до или после региональных деформаций. Однозначного ответа на этот вопрос не существует, хотя проблема обсуждалась применительно к траппам долины р. Кулюмбэ и ранее [Pavlov et al., 2007; Latyshev et al., 2017]. Согласно одной из гипотез, формирование пликативных структур Хантайско-Рыбинского вала происходило до начала пермо-триасового магматизма на Сибирской платформе [Кравцов, 1967]. В этом случае внедрение опробованных интрузий происходило уже в полого наклоненные осадочные толщи, и при дальнейших расчетах нам следует использовать палеомагнитные направления *in situ*. С другой стороны, распространена точка зрения, что деформации в исследуемом районе происходили синхронно со складчатостью на Таймыре (поздний триас), то есть после завершения траппового магматизма [Малич, 1975; Никишин и др., 2010]. Тогда при анализе палеомагнитных направлений и полюсов должна использоваться стратиграфическая система координат, с коррекцией за наклон осадочных толщ. Наконец, возможен и вариант, что оба описанных процесса в той или иной степени имели место.

Сначала рассмотрим распределение средних направлений по всем сайтам обратной полярно-

сти, за исключением KUL-24 и X-7, результаты по которым мы считаем не вполне надежными (см. выше). Направления несколько более тесно сгруппированы в географической системе координат, чем в стратиграфической ($K_g = 90.9$; $K_s = 83.4$ – табл. 1); максимальная кучность $K = 95.3$ достигается при 40% распрямлении складки [Watson, Enkin, 1993]. В то же время, если рассмотреть результаты по каждой локации отдельно, это дает несколько иной результат. Для интрузий района устья р. Турука кучность *in situ* существенно выше, чем при введении поправки за наклон вмещающих пород ($K_g = 188.3$; $K_s = 98.2$ – табл. 1), тогда как в остальных локациях направления несколько более тесно сгруппированы в стратиграфической системе координат. Этот факт указывает, что интрузивные тела обратной полярности в районе устья р. Турука, вероятно, внедрились после региональных дислокаций, в то время как в других районах деформации, по крайней мере отчасти, происходили после формирования интрузий. В этом случае обратно намагниченные тела района устья р. Турука отвечают времени формирования далдыканского комплекса в Норильском районе, также имеющего обратную полярность [Lind et al., 1994].

Подобный анализ, проведенный для направлений прямой полярности, также не дает однозначного результата. При рассмотрении направлений по всем сайтам, кроме KUL-21, который характеризуется аномально низким наклоном (см. выше), кучность в географической системе координат незначительно выше, чем в стратиграфической ($K_g = 33.8$, $K_s = 30.4$). Анализ данных отдельно по разным локациям или разным комплексам также не позволяет получить более четкий результат. Следовательно, мы предполагаем “синскладчатый” возраст намагниченности для большинства опробованных интрузий, что может в данном случае быть реализовано двумя способами: 1) силы внедрялись уже в частично наклоненные толщи, а затем подверглись деформациям; 2) часть интрузий была сформирована до дислокаций, а часть – после. Исключение составляют тела в районе устья р. Турука, отнесенные к далдыканскому комплексу, которые с большой вероятностью внедрялись на постскладчатом этапе. Отметим, что если наша гипотеза верна, то последние значительные деформации в районе исследования происходили непосредственно в процессе пермо-триасового магматизма и, возможно, связаны с компенсационным проседанием в пределах Тунгусской синеклизы из-за опустошения промежуточных или глубинных магматических камер.

Средний виртуальный геомагнитный полюс по всем сайтам, кроме вышеупомянутых X-7, KUL-21 и KUL-24, был рассчитан нами в трех вариантах: 1) в географической системе координат

для всех сайтов; 2) в стратиграфической системе координат для всех сайтов; 3) в географической системе координат для сайтов обратной полярности устья р. Турука и стратиграфической – для всех остальных. Третий вариант расчета позволяет получить средний полюс, который статистически неотличим от палеомагнитного полюса NMK [Pavlov et al., 2019], рассчитанного по вулканитам Норильского и Маймеч-Котуйского районов. Угловое расстояние $\gamma = 5.2^\circ$ несколько ниже критического угла $\gamma_{cr} = 6.3^\circ$, рассчитанного по методике [McFadden, McElhinny, 1990]. Заметим, что средние полюсы, рассчитанные только в стратиграфической и географической системах координат, значимо отличаются от полюса NMK (рис. 5а). Этот результат имеет два важных следствия. Во-первых, это поддерживает нашу гипотезу об относительном возрасте намагниченности и региональных дислокаций, изложенную выше. Во-вторых, совпадение среднего полюса с палеомагнитным указывает на формирование интрузий р. Кулюмбэ в течение довольно продолжительного времени, достаточного для осреднения вековых вариаций геомагнитного поля. Согласно современным оценкам, этот период составляет 10^4 – 10^5 лет [Merrill et al., 1996; Tauxe et al., 2016].

В целом виртуальные геомагнитные полюсы (ВГП), рассчитанные по сайтам, образуют на стереограмме практически изометричное облако точек (рис. 5б). Несмотря на неравномерную плотность фигуративных точек на диаграмме, в первом приближении не удается выделить какие-либо тесные представительные кластеры близко расположенных ВГП, которые соответствовали бы масштабным кратковременным магматическим событиям, в отличие от других районов Сибирской платформы, например Ангаро-Тасеевской впадины [Latsyshev et al., 2018]. Исключение представляет группа обратно намагниченных интрузий нижнего течения р. Кулюмбэ (сайты KV8–KV13). Выделяется изолированная группа, состоящая из ВГП сайтов KUL-17, KUL-28 и KUL-32 (катангский комплекс), которая существенно отличается по долготе как от основной массы полюсов, так и от палеомагнитного полюса NMK (угловое расстояние от последнего $\sim 30^\circ$). Эта группа может быть свидетельством экскурса геомагнитного поля или являться результатом нераспознанных тектонических дислокаций и, как следствие, некорректной поправки за элементы залегания вмещающих пород.

Для того, чтобы определить место магматических событий района р. Кулюмбэ в эволюции траппового магматизма Сибирской платформы, нами было проведено сравнение виртуальных геомагнитных полюсов по опробованным интрузиям со средними полюсами по вулканическим свитам Норильского района (по данным [Pavlov

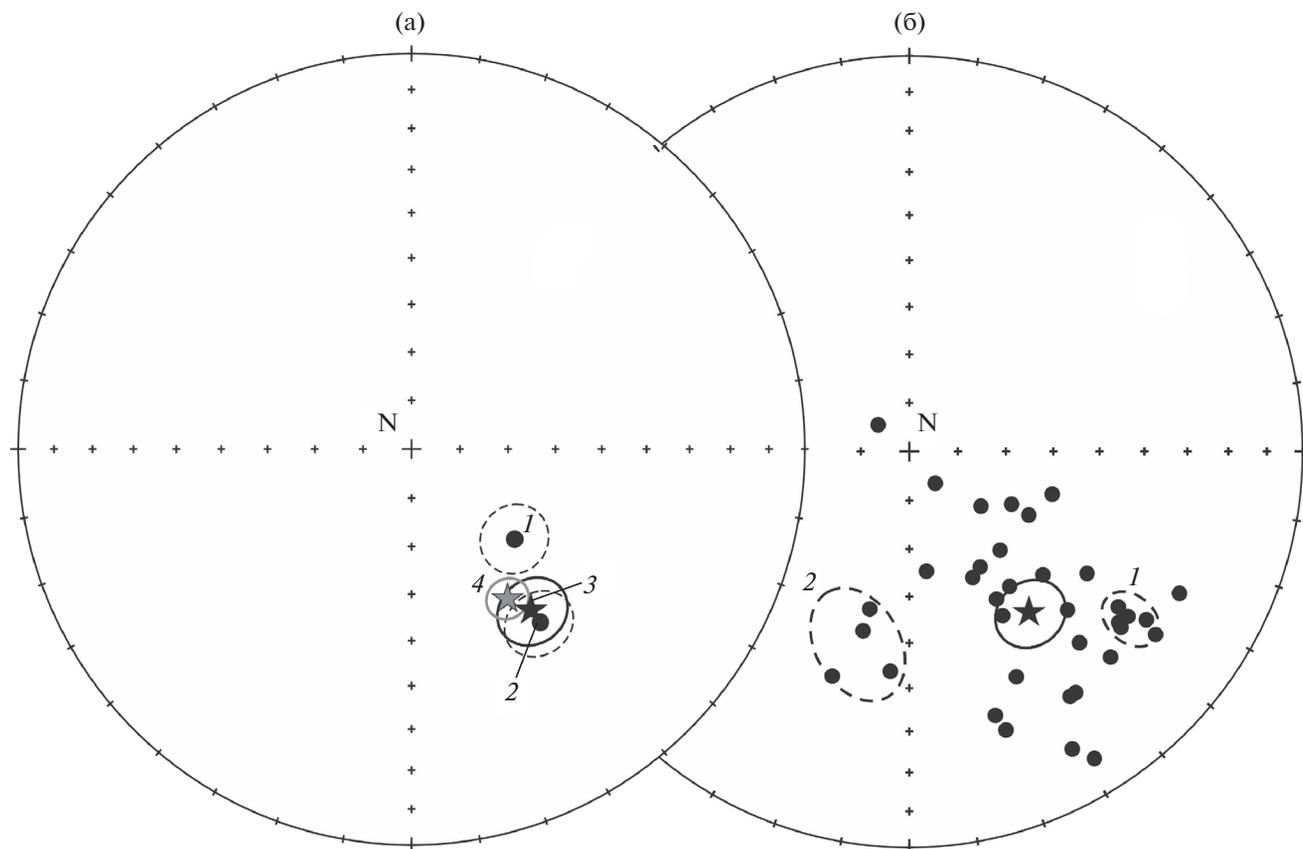


Рис. 5. Виртуальные геомагнитные полюсы, рассчитанные по палеомагнитным направлениям: (а) – сравнение средних полюсов с палеомагнитным полюсом NMT для перми–триаса Сибирской платформы (1 – средний полюс, рассчитанный в географической системе координат; 2 – средний полюс, рассчитанный в стратиграфической системе координат; 3 – средний полюс, рассчитанный по интрузиям обратной полярности в устье р. Турука *in situ* и всем остальным интрузиям – в стратиграфической системе координат; 4 – палеомагнитный полюс NMT [Pavlov et al., 2019]); (б) – распределение средних виртуальных геомагнитных полюсов по сайтам; (средний полюс показан звездой с овалом доверия): 1 – группа полюсов по интрузиям нижнего течения р. Кулюмбэ; 2 – “аномальные” виртуальные геомагнитные полюсы (пояснения см. в тексте).

et al., 2019]). В случае, когда угловое расстояние между полюсами велико, мы можем утверждать, что рассматриваемые магматические события произошли в разное время; если же полюсы совпадают в пределах доверительных интервалов, эти магматические события с большой вероятностью являются одновозрастными. Подобная методика была использована нами ранее при корреляции интрузивных тел Норильского района с вулканитами [Latyshev et al., 2020a]. Поскольку в вулканогенном разрезе Норильского района ранее нами были выделены “вулканические пульсы”, представляющие собой последовательные серии потоков с очень близкими палеомагнитными направлениями, то референтные полюсы для свит были рассчитаны нами в двух вариантах: 1) средние полюсы по потокам (далее – “вариант I”); и 2) средние полюсы по пульсам и индивидуальным направлениям (далее – “вариант II”) (табл. 2). Как будет видно далее, эти два варианта приводят к

несколько, хотя и не принципиально, различной интерпретации.

Поскольку распределение виртуальных геомагнитных полюсов (рис. 5б) практически не обнаруживает тесных кластеров, которые бы могли отвечать интенсивным магматическим событиям, при сравнении полюсов интрузивных тел с вулканогенными свитами далее будет рассмотрено несколько групп, которые объединяют в себе интрузии одного комплекса, близкие по географическому признаку и/или по палеомагнитным характеристикам: 1) интрузии катангского комплекса, распространенные главным образом в районе устья р. Халиль; 2) сайты Кулюмбинской интрузии, пространственно близкие и характеризующиеся сходными палеомагнитными направлениями; 3) обратно намагниченные интрузии. Некоторые интрузивные тела, которые являются единственными опробованными представителями того или иного комплекса или типа (напри-

Таблица 2. Референтные средние виртуальные геомагнитные полюсы для вулканогенных свит Норильского района, рассчитанные по данным работы [Pavlov et al., 2019]

Свита	Среднее по лавовым потокам				Среднее по дирекционным группам и индивидуальным направлениям			
	<i>N</i>	Plong°	Plat	A95°	<i>N</i>	Plong°	Plat	A95°
Ивакинская	3	353.1	−51.1	16.5	2	350.7	−51.7	23.1
Сыверминская	11	112.5	16.5	2.5	5	112.5	15.3	5.3
Гудчихинская	5	140.6	35.3	21.3	4	147.6	38.8	21.7
Туклонская	5	187.6	70.4	12.5	2	181.7	69.5	50.6
Надеждинская	15	214.0	70.5	7.7	7	225.5	65.0	14.3
Моронговская	11	133.1	59.0	6.4	4	128.3	58.2	14.2
Мокулаевская	13	141.4	54.7	7.5	5	143.2	55.6	18.5
Хараелахская	7	156.2	49.1	13.7	4	155.3	49.5	20.4
Кумгинская	6	170.4	63.0	7.0	2	172.8	65.4	34.1

Таблица 3. Угловые расстояния (°) между средними полюсами интрузий Кулюмбинского района и вулканогенных свит Норильского района. Свиты: gd – гудчихинская, tk – туклонская, nd – надеждинская, mr – моронговская, mk – мокулаевская, hr – хараелахская, km – кумгинская. СК – система координат: G – географическая, S – стратиграфическая

интрузии	ск	Средние ВГП по свитам на уровне потоков							Средние ВГП по свитам на уровне пульсов						
		gd	tk	nd	mr	mk	hr	km	gd	tk	nd	mr	mk	hr	km
Силурийская	G	35.9	11.7	20.0	13.8	16.9	22.2	11.5	32.2	10.2	26.6	15.1	14.9	21.4	9.1
	S	15.5	25.7	34.4	12.4	5.7	4.2	16.1	10.1	22.5	39.3	13.9	4.3	3.5	17.8
Ильтыкская	G	30.1	35.1	42.9	13.7	18.9	29.4	31.1	31.0	33.0	49.5	11.1	18.6	28.3	30.8
	S	14.2	39.5	48.3	14.2	14.7	22.0	31.8	17.2	37.3	54.6	12.5	15.2	20.5	32.8
Кулюмбинская	G	49.7	18.3	20.7	25.5	30.2	36.8	24.0	46.6	18.6	27.2	26.1	29.4	35.9	21.0
	S	31.0	13.4	23.3	8.4	11.4	18.1	10.1	27.2	13.2	29.5	11.1	10.8	16.6	10.4
Кузьмовский комплекс	G	41.6	12.0	18.0	18.4	22.1	27.8	15.2	38.0	11.4	25.1	19.7	21.1	27.3	13.3
	S	26.9	17.2	26.1	7.3	7.4	13.3	9.8	23.0	15.0	32.3	10.1	6.1	12.7	10.9
Халильская	G	15.5	33.9	42.6	9.3	8.3	16.9	25.9	16.0	31.7	48.8	8.3	9.8	16.2	27.4
	S	2.0	43.5	52.1	23.4	18.9	18.5	33.7	7.4	41.3	57.0	23.4	20.1	18.5	36.1
Катангский комплекс	G	14.1	36.2	45.1	12.2	11.7	18.5	28.1	15.9	34.0	51.3	10.6	11.3	17.8	29.7
	S	4.7	44.9	53.2	27.6	22.2	18.5	34.8	6.3	42.7	57.6	27.9	23.0	18.5	37.4

мер, Силурийская, Халильская интрузии), рассматривались индивидуально. При этом нужно подчеркнуть, что в последнем случае корреляция представляется нам менее обоснованной.

Наибольший интерес среди опробованных тел долины р. Кулюмбэ представляет Силурийская интрузия (сайт K7, норильский тип), в которой неоднократно обнаруживалась сульфидная минерализация. Виртуальный геомагнитный полюс, рассчитанный для этой интрузии, в географической системе координат лежит далеко от полюсов всех вулканогенных свит Норильского района (рис. 6а, 6б), а в стратиграфической – наиболее близок к полюсам мокулаевской и хараелахской

свит при обоих вариантах расчета средних полюсов по свитам (рис. 6в, 6г, рис. 7; табл. 3). На основании этого можно предположить, что: 1) внедрение Силурийской интрузии, вероятно, было близким по времени к формированию мокулаевской или хараелахской свит; 2) приобретение намагниченности породами Силурийской интрузии произошло до наклона вмещающих пород. Отметим, что близкий возраст формирования предполагается нами для рудоносных интрузий норильского типа, расположенных в Норильской мульде – Норильск-1, Черногорская, Норильск-2 [Latyshev et al., 2020a].

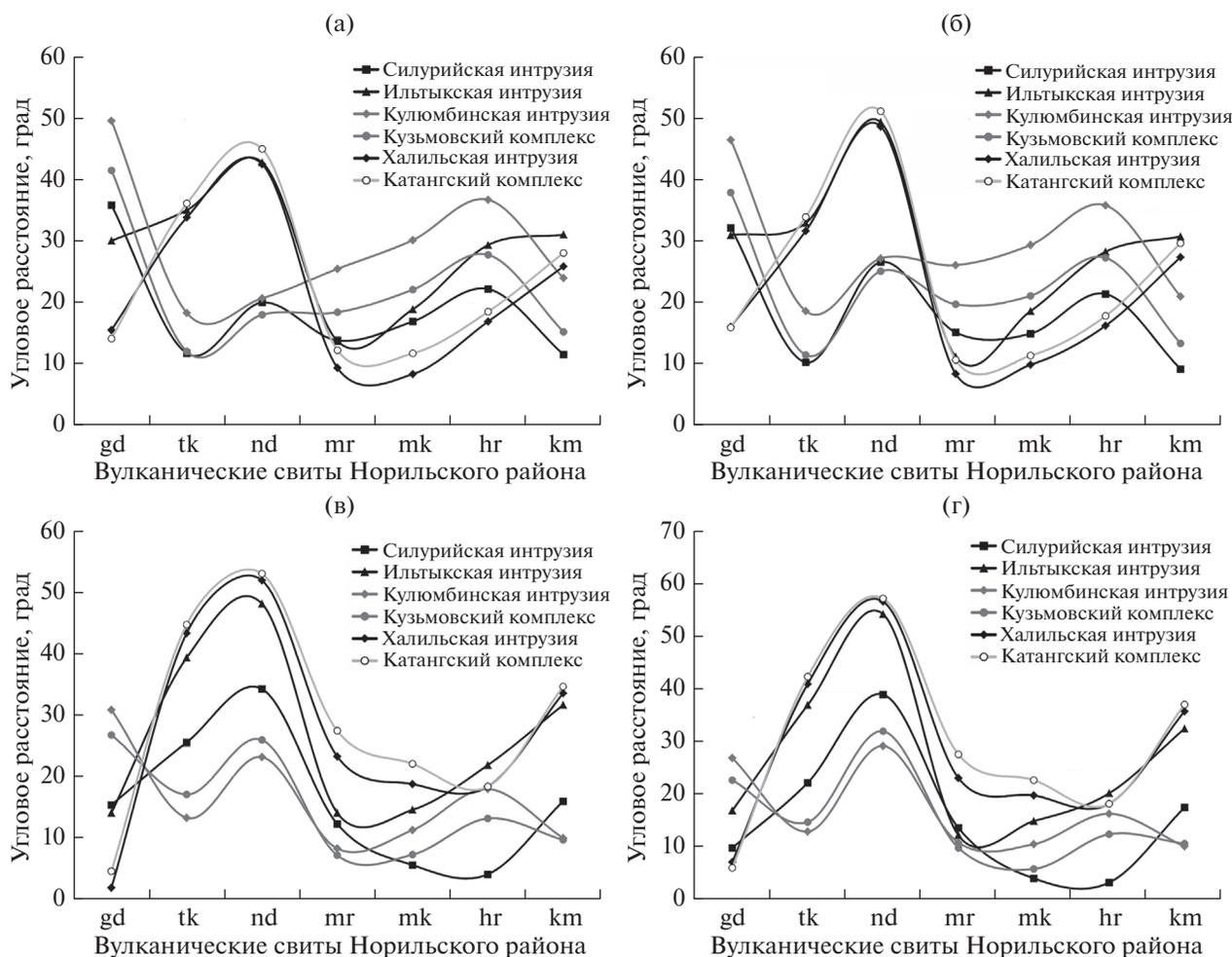


Рис. 6. Сравнение средних полюсов исследованных интрузивных тел с полюсами вулканических свит Норильского района: (а) – полюсы интрузий в географической системе координат; полюсы свит рассчитаны на уровне потоков; (б) – полюсы интрузий в географической системе координат; полюсы свит рассчитаны на уровне пульсов; (в) – полюсы интрузий в стратиграфической системе координат; полюсы свит рассчитаны на уровне потоков; (г) – полюсы интрузий в стратиграфической системе координат; полюсы свит рассчитаны на уровне пульсов. Свиты: gd – гудчихинская, tk – туклонская, nd – надеждинская, mr – моронговская, mk – мокулаевская, hr – хараелахская, km – кумгинская.

Аналогичная процедура была проделана нами для некоторых других интрузивных тел и групп интрузий р. Кулюмбэ. Так, Ильтыкская интрузия (сайт K8, круглогорский тип норильского комплекса) демонстрирует полюс, который значительно удален от всех референтных полюсов в обеих системах координат и при обоих вариантах расчета. Следовательно, Ильтыкская интрузия не может быть напрямую сопоставлена ни с одной из свит Норильского района по палеомагнитным данным. При этом следует подчеркнуть, что результаты по Ильтыкской интрузии получены по единичному сайту, и для надежной корреляции требуется получение более представительных данных.

Средний полюс по сайтам Кулюмбинской интрузии во всех вариантах расчета удален от полюсов вулканических свит Норильского района.

Наименьшее угловое расстояние (8.4° – табл. 3) достигается при сопоставлении с моронговской свитой в варианте I (рис. 6в), следовательно, эта версия корреляции на данный момент представляется нам наиболее предпочтительной. Близкий к Кулюмбинской интрузии полюс интрузива, отнесенного к кузьмовскому комплексу (сайт K11), демонстрирует схожие результаты сравнения и может быть сопоставлен с моронговской–мокулаевской свитами (рис. 6в, 6г). На рис. 7 видно, что полюсы Кулюмбинской интрузии и тела кузьмовского комплекса расположены в области между кумгинской, моронговской и мокулаевской свитами, несколько ближе к двум последним в обоих вариантах кривой опорных полюсов. Таким образом, корреляция Кулюмбинской интрузии и силла кузьмовского комплекса с моронговской–мокулаевской свитами представляется

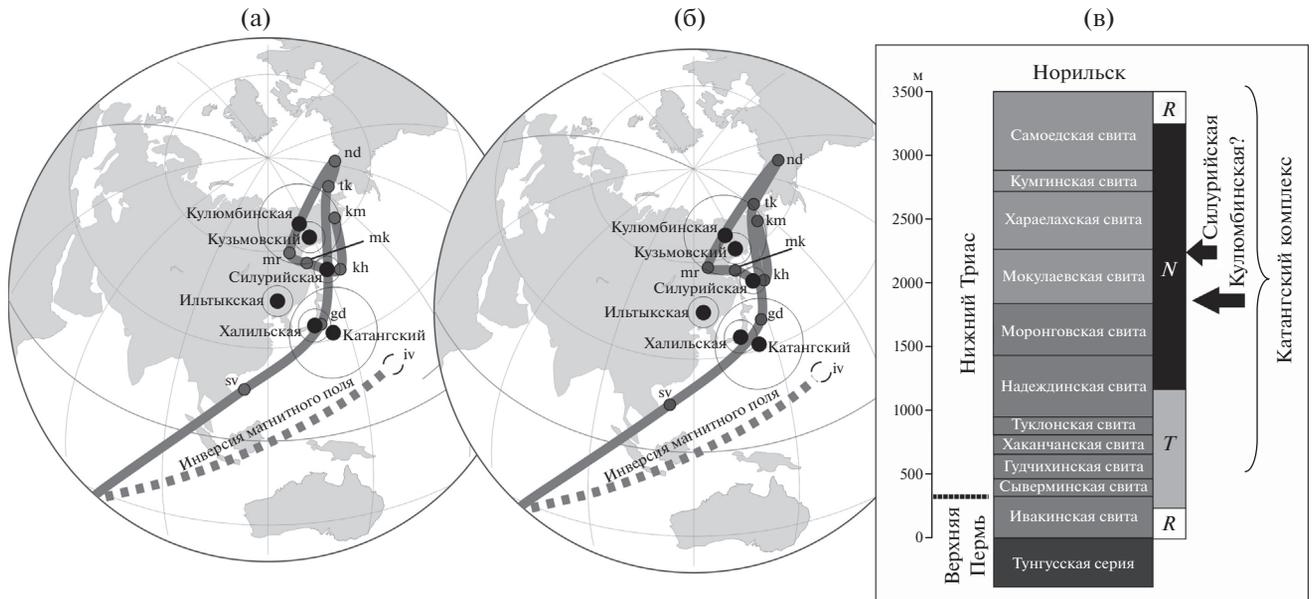


Рис. 7. Корреляция интрузий района р. Куломбэ с туфо-лаваовой толщей Норильского района. (а)–(б) – Положение средних полюсов для исследованных интрузий (стратиграфическая система координат) относительно референтной кривой ВГП по свитам. Средние полюсы по свитам рассчитаны: (а) – на уровне потоков; (б) – на уровне дирекционных групп и индивидуальных направлений. Свиты: iv – ивакинская, sv – сьверминская, gd – гудчихинская, tk – туклонская, nd – надеждинская, mg – моронговская, mk – мокулаевская, hg – хараелахская, km – кумгинская. (в) – Корреляция интрузий Куломбинского района с вулканогенным разрезом Норильского района. Магнитостратиграфия туфо-лаваовой толщи показана в работах [Heunemann et al., 2004; Latyshev et al., 2020b]. R – интервал обратной полярности; N – интервал прямой полярности; T – переходный интервал.

наиболее вероятной, хотя нельзя полностью исключить возможность кумгинского возраста этих тел. Кроме того, близость полюсов рассматриваемых интрузий указывает на примерно одинаковое время их формирования, несмотря на отнесение интрузий к разным комплексам (курейский, кузьмовский). В дополнение можно отметить, что ВГП сайта KUL-40, также отнесенного к курейскому комплексу [Krivolutskaya et al., 2020b], несмотря на большой радиус круга доверия, близок к полюсам кузьмовской и Куломбинской интрузий, а также моронговской свиты (табл. 1). В случае сопоставления Куломбинской интрузии и других рассмотренных тел курейского и кузьмовского комплекса с моронговской–мокулаевской свитами формирование этих интрузивов также оказывается близким по времени к внедрению рудоносных интрузий Норильского района [Latyshev et al., 2020].

Поскольку Халильская интрузия характеризуется значимо различающимися палеомагнитными направлениями во всех трех сайтах, для сравнения со свитами Норильского района были использованы результаты только по сайту K3, где направление было рассчитано по большому числу образцов с достаточной точностью. Единственный вариант прямой корреляции ВГП этого сайта – это сопоставление полюса в стратиграфической системе координат с гудчихинской свитой

(рис. 6в, 6г, рис. 7). При этом следует учитывать, что формирование гудчихинской свиты происходило во время инверсии геомагнитного поля, и ее среднее палеомагнитное направление – результат осреднения данных по нескольким вулканическим пульсам и индивидуальным лавовым потокам, направления которых характеризуются значительным разбросом [Gurevitch et al., 2004; Pavlov et al., 2019]. В связи с этим корреляция Халильской интрузии с норильской туфо-лаваовой толщей представляется несколько менее обоснованной, чем для интрузий, рассмотренных ранее.

Средний виртуальный геомагнитный полюс, рассчитанный по интрузивным телам катангского комплекса прямой полярности (без учета “экскурсионных” направлений), при введении поправки на элементы залегания вмещающих пород также оказывается довольно близким к полюсу гудчихинской свиты (рис. 6в, 6г). Помимо высказанных выше соображений, необходимо заметить, что индивидуальные ВГП по сайтам катангского комплекса разбросаны достаточно широко ($A95_s = 14^\circ$ для среднего значения), а петрохимические характеристики катангского комплекса принципиально отличаются от гудчихинской свиты и скорее близки к свитам верхней части Норильской туфо-лаваовой толщи [Krivolutskaya et al., 2020b]. Учитывая эти обстоятельства, мы предпочитаем интерпретацию, что формирова-

ние катангского комплекса было распределенным по времени и охватывало сразу несколько этапов образования вулканогенного разреза. Косвенным подтверждением того, что внедрение катангских интрузий могло начаться в “переходном” интервале от обратной к прямой полярности, который охватывает нижние свиты норильского вулканогенного разреза [Heunemann et al., 2004; Pavlov et al., 2019], является наличие “экскурсионных” направлений в отдельных сайтах, упомянутых выше.

Таким образом, большинство полюсов, рассчитанных для исследуемых интрузивных тел, в географической системе координат значительно удалено от области ВГП вулканитов Норильского района, в то время как в стратиграфической системе координат они оказываются близки к некоторым свитам. Этот факт предоставляет нам дополнительное подтверждение того, что формирование интрузивных тел прямой полярности происходило до окончания региональных деформаций.

Наконец, средний ВГП для интрузий обратной полярности оказывается более чем на 30° удален от полюса единственной обратно намагниченной в норильском разрезе ивакинской свиты. Вкупе с нашей интерпретацией, что как минимум часть обратно намагниченных тел долины р. Кулюмбэ внедрились после основных региональных дислокаций, это указывает на сопоставление интрузий обратной полярности с далдыканским комплексом, представляющим заключительный этап магматизма. Заметим, что среди опробованных тел присутствуют интрузии, по петрохимическим характеристикам сходные с катангским комплексом, – сайты K5-K6, KUL-1, KUL-25 [Krivolutskaya et al., 2020b]. Это указывает на возможность формирования интрузивных тел катангского комплекса как в эпоху прямой полярности, синхронно с вулканической активностью, так и в последующую эпоху обратной полярности. Такая же продолжительность формирования интрузивных тел катангского комплекса была установлена нами ранее для центральной части Тунгусской синеклизы [Latyshev et al., 2018]. Таким образом, хотя время начала формирования катангского комплекса остается неопределенным, внедрение катангских интрузий продолжалось и после завершения основной фазы вулканизма, примерно синхронно с далдыканским комплексом в Норильском районе.

В заключение заметим, что интрузивный магматизм в долине р. Кулюмбэ в разное время локализовался на разных стратиграфических уровнях. Так, в каменноугольно-пермских отложениях тунгусской серии локализованы интрузивные тела прямой полярности (Кулюмбинская интрузия), тогда как в образованиях кембрия–ордови-

ка распространены исключительно обратно намагниченные интрузивы (рис. 1б). Только между ними, в силур-девонских отложениях, чередуются интрузии как прямой, так и обратной полярности, расположенные иногда в пределах сотен метров друг от друга. Впрочем, в последнем случае неоднократное проявление магматизма может быть связано с нахождением в зоне Имангдино-Летнинского разлома, обеспечивающего повышенную проницаемость верхних горизонтов коры.

ВЫВОДЫ

1. На основании детального анализа палеомагнитных данных по интрузивным телам долины р. Кулюмбэ мы предполагаем, что большая часть опробованных интрузий внедрилась до окончания региональных деформаций, которые произошли в начале раннего триаса на завершающих стадиях траппового магматизма. Исключения составляют силлы обратной полярности в районе устья р. Турука, после формирования которых значительных дислокаций не было.

2. Обратно намагниченные интрузии района р. Кулюмбэ, скорее всего, формировались после окончания главной фазы вулканической активности на Сибирской платформе, синхронно далдыканскому этапу магматизма в Норильском районе.

3. Формирование интрузивных тел долины р. Кулюмбэ происходило в течение достаточно длительного времени для осреднения вековых вариаций геомагнитного поля (10–100 тыс. лет) и охватывает по меньшей мере по одному интервалу обратной и прямой полярности на рубеже перми и триаса.

4. Силурийская интрузия (норильский тип) по возрасту может быть сопоставлена с мокулаевской–хараелахской свитами Норильского района (рис. 7в). Это указывает на близкое время формирования интрузивов норильского типа с сульфидной минерализацией в Норильском и Кулюмбинском районах.

5. Формирование Кулюмбинской интрузии, а также некоторых других тел, отнесенных к курейскому и кузьмовскому комплексам, скорее всего, отвечает моронговскому–мокулаевскому времени.

6. Формирование интрузивных тел катангского комплекса происходило в течение достаточно продолжительного времени синхронно основной фазе вулканизма на Сибирской платформе и, возможно, после его окончания. Таким образом, катангский комплекс не может быть напрямую сопоставлен ни с одной конкретной свитой Норильского района.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Д.В. Рудько, В.С. Чмереву за помощь в проведении полевых работ, П.С. Уляхиной и Д.В. Коршунову – за участие в лабораторных исследованиях, В.Э. Павлову – за участие в полевых работах и обработке палеомагнитных результатов, В.А. Радько – за полезное обсуждение результатов, а также двух рецензентов за ценные замечания и комментарии к статье.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке ООО “Норильскгеология” (договор НГ-130/18) и РФФИ (гранты №№ 18-35-20058, 18-05-70094 и 20-05-00573).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альмухамедов А.И., Медведев А.А., Золотухин В.В.* Вещественная эволюция пермотриасовых базальтов Сибирской платформы во времени и пространстве // *Петрология*. № 12(4). С. 339–353.
- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.* Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51(9). С. 1159–1187.
- Долгаль А.С.* Реализация некоторых идей академика В.Н. Страхова в практике интерпретации геопотенциальных полей. Академик В.Н. Страхов – геофизик и математик. 2012. М.: Наука. С. 55–78.
- Золотухин В.В., Виленский А.М., Дюжиков О.А.* Базальты Сибирской платформы. 1986. Новосибирск: Наука. 255 с.
- Криволицкая Н.А.* Эволюция траппового магматизма и Pt–Cu–Ni рудообразование в Норильском районе. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2013. 306 с.
- Крацов А.Г.* Тектоника междуречья Хантайка–Сигоя. Геология Северо-Запада Сибирской платформы. Тр. НИИГА. 1967. Т. 133. С. 104.
- Латышев А.В., Веселовский Р.В., Иванов А.В., Фетисова А.М., Павлов В.Э.* Свидетельства кратких интенсивных пиков магматической активности на юге Сибирской платформы (Ангаро-Тасеевская впадина) на основании результатов палеомагнитных исследований // *Физика Земли*. 2013. № 6. С. 77–90.
- Михальцов Н.Э., Казанский А.Ю., Рябов В.В., Шевко А.А., Куприш О.В., Брагин В.Ю.* Палеомагнетизм траппов северо-западной части Сибирской платформы по результатам исследований керн // *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 11. С. 1595–1613.
- Малич Н.С.* Тектоническое развитие чехла Сибирской платформы. 1975. Недра. С. 216.
- Павлов В.Г. и др.* Геологическое строение и полезные ископаемые Брусской площади. Отчет Брусской партии о результатах групповой геологической съемки масштаба 1 : 50000 на Брусской площади и общих поисках на медно-никелевые руды за 1984–1988 гг. Листы R-143-В,Г; Q-45-9-Г; Q-45-10-А-в,г; -Б; -В,Г; Q-45-11-А,Б; -В,Г; Q-45-22-Б; Q-45-23-А,Б. ГСЭ КГУ Красноярск. 1988. ТГФ СФО, инв. № 25000.
- Павлов В.Э., Флутто Ф., Веселовский Р.В., Фетисова А.М., Латышев А.В.* Вековые вариации геомагнитного поля и вулканические пульсы в пермо-триасовых траппах Норильской и Маймеча-Котуйской провинций // *Физика Земли*. № 5. 2011. С. 35–50.
- Никишин А.М., Соборнов К.О., Прокопьев А.В., Фролов С.В.* Тектоническая история Сибирской платформы в венде-фанерозе // *Вест. Московского университета*. Серия 4: Геология. 2010. № 1. С. 3–16.
- Рябов В.В., Шевко А.А., Гора М.П.* Магматические образования Норильского района. Петрология траппов. Т. 1. Новосибирск: изд-во “Нонпарель”. 2001. 407 с.
- Chenet A.L., Fluteau F., Courtillot V., Gerard M., Subbarao K.V.* Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B04101. <https://doi.org/10.1029/2006JB004635>
- Chenet A.L., Courtillot V., Fluteau F., Gerard M., Quidelleur X., Khadri S.F.R., Subbarao K.V., Thordarson T.* Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: 2. Constraints from analysis of eight new sections and synthesis for a 3500-m-thick composite section // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. B06103. <https://doi.org/10.1029/2008JB005644>
- Courtillot V.E., Renne P.R.* On the ages of flood basalt events // *Geoscience*. 2003. V. 335. P. 113–140.
- Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain size and composition dependence // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 13. 1977. P. 260–267.
- Dunlop D.J.* Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1–22.
- Enkin R.J.* A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada. 1994. P. 16.
- Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. Cambridge University Press. 2014. 653 p.
- Fedorenko V.A., Lightfoot P.C., Naldrett A.J., Czamanske G.K., Hawkesworth C.J., Wooden J.L., Ebel D.S.* Petrogenesis of the flood-basalt sequence at Noril'sk, North-Central Siberia // *Int. Geol. Rev.* 1996. V. 38. P. 99–135.
- Fedorenko V., Czamanske G.* Results of new field and geochemical studies of the volcanic and intrusive rocks of the Maymecha-Kotuy Area, Siberian flood-basalt province, Russia // *Int. Geol. Rev.* 1997. V. 39. P. 479–531.
- Fedorenko V., Czamanske G., Zen'ko T., Budahn J., Siems D.* Field and geochemical studies of the melilite-bearing Arydzhangsky Suite, and an overall perspective on the Siberian alkaline-ultramafic flood-volcanic rocks // *Int. Geol. Rev.* 2000. V. 42(9). P. 769–804.
- Fisher R.* Dispersion on a sphere // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*. 1953. V. 217(1130). P. 295–305.
- Gurevitch E.L., Heunemann C., Rad'ko V., Westphal M., Bachtadse V., Pozzi J.P., Feinberg H.* Palaeomagnetism and magnetostratigraphy of the Permian-Triassic northwest

- central Siberian Trap Basalts // *Tectonophysics*. 2004. V. 379. P. 211–226.
- Heunemann C., Krassa D., Soffel H., Gurevitch E., Bachtadse V.* Directions and intensities of the Earth's magnetic field during a reversal: results from the Permo-Triassic Siberian trap basalts, Russia // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 218. P. 197–213.
- Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V.* Siberian Traps large igneous province: evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism // *Earth-Sci. Rev.* 2013. V. 122. P. 58–76.
- Kirschvink J.L.* The leastsquare line and plane and the analysis of paleomagnetic data // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1980. V. 62. P. 699–718.
- Krivolutskaya N.A., Latyshev A.V., Dolgal A.S., Gongalsky B.I., Makarieva E.M., Makariev A.A., Svirskaya N.M., Bychkova Ya.V., Yakushev A.I., Asavin A.M.* Unique PGE–Cu–Ni Noril'sk Deposits, Siberian Trap Province: Magmatic and Tectonic Factors in Their Origin // *Minerals*. 2019. V. 9. № 66.
- Krivolutskaya N., Belyatsky B., Gongalsky B., Dolgal A., Lapkovsky A., Malitch K., Taskaev V., Svirskaya N.* Petrography and Geochemistry of Magmatic Rocks in the Northwestern Siberian Traps Province, Kulyumber River Valley. Part I: Rocks of the Khalil and Kaya Sites // *Minerals*. 2020a. V. 10. № 409.
<https://doi.org/10.3390/min10050409>
- Krivolutskaya N., Belyatsky B., Gongalsky B., Dolgal A., Lapkovsky A., Bayanova T.B.* Petrographical and geochemical characteristics of magmatic rocks in the northwestern Siberian traps province, Kulyumber river valley. part II: Rocks of the Kulyumber site // *Minerals*. 2020b. V. 10. № 415.
- Latyshev A.V., Krivolutsкая N.A., Ulyahina P.S., Bychkova Ya.V., Gongalsky B.I.* Intrusions of the Kulumbe river valley, NW Siberian traps province: paleomagnetism, magnetic fabric and geochemistry. Chapter 6 in: *Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism*. Eds. D.K. Nurgaliev et al. Springer Geophysics. 2018. P. 67–82.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-90437-5_6
- Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Ivanov A.V.* Paleomagnetism of the Permian-Triassic intrusions from the Tunguska syncline and the Angara-Taseeva depression, Siberian Traps Large Igneous Province: evidence of contrasting styles of magmatism // *Tectonophysics*. 2018. V. 723. P. 41–55.
- Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E.* Correlation of the Permian-Triassic ore-bearing intrusions of the Noril'sk region with the volcanic sequence of the Siberian Traps based on the paleomagnetic data // *Economic Geology*. 2020a. V. 115(6). P. 1173–1193.
<https://doi.org/10.5382/econgeo.4746>
- Latyshev A., Fetisova A., Veselovskiy R.* Linking Siberian traps LIP emplacement and end-Permian mass extinction: Evidence from magnetic stratigraphy of the Maymecha-Kotuy volcanic section // *Geosciences*. 2020b. V. 10(295).
<https://doi.org/10.3390/geosciences10080295>
- Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W.* 1993 Remobilisation of the continental lithosphere by mantle plumes: major-/trace-element and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk district, Siberian Trap, Russia // *Contrib. Mineral Petrol.* 1993. V. 114(2). P. 171–188.
- Lind E., Kropotov S., Czamanske G., Gromme S., Fedorenko V.* Paleomagnetism of the Siberian flood basalts of the Noril'sk area: A constraint on eruption duration. *International Geology Review*. 1994.
<https://doi.org/10.1080/00206819409465508>
- Merrill R., McFadden P., McElhinny M.* *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. San Diego: Academic Press. 1996. 531 p.
- Moulin M., Courtillot V., Fluteau F., Valet J.-P.* The “van Zijl” Jurassic geomagnetic reversal revisited // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2012. V. 13. P. Q03010.
- Pavlov V.E., Gallet Y.* Upper Cambrian to Middle Ordovician magnetostratigraphy from the Kulumbe river section (north western Siberia) // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1998. V. 108. P. 49–59.
- Pavlov V., Courtillot V., Bazhenov M., Veselovsky R.* Paleomagnetism of the Siberian traps: new data and a new overall 250 Ma pole for Siberia // *Tectonophysics*. V. 443. 2007. P. 72–92.
- Pavlov V., Bachtadse V., Mikhailov V.* New Middle Cambrian and Middle Ordovician palaeomagnetic data from Siberia: Llandelian magnetostratigraphy and relative rotation between the Aldan and Anabar-Angara blocks // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 276. № 3–4. P. 229–242.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.021>
- Pavlov V.E., Fluteau F., Latyshev A. V., Fetisova A.M., Elkins-Tanton L.T., Black B.A., Burgess S.D., Veselovskiy R.V.* Geomagnetic Secular Variations at the Permian-Triassic Boundary and Pulsed Magmatism During Eruption of the Siberian Traps // *Geochemistry. Geophys. Geosystems*. 2019. V. 20.
<https://doi.org/10.1029/2018GC007950>
- Sobolev S.V., Sobolev A.V., Kuzmin D.V., Krivolutsкая N.A., Petrunkin A.G., Arndt N.T., Rad'ko V.A., Vasil'yev Y.R.* Linking mantle plumes, large igneous provinces, and environmental catastrophes // *Nature*. 2011. V. 477(7364). P. 312–316.
- Tauxe L., Banerjee S.K., Butler R.F., Van der Voo R.* *Essentials of Paleomagnetism*. 4th Web Edition. 2016.
- Watson G., Enkin R.* The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2135–2137.
- Wignall P.B.* Large igneous provinces and mass extinctions // *Earth-Science Reviews*. 2001. V. 53. P. 1–33.
- Wooden J.L., Czamanske G.K., Bouse R.M., King B.-S.W., Knight R.J., Siems D.F.* Isotopic and trace element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1993. V. 57. P. 3677–3704.
- Xu Y., Yang Z., Tong Y.-B., Jing X.* Paleomagnetic secular variation constraints on the rapid eruption of the Emeishan continental flood basalts in southwestern China and northern Vietnam // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2018. V. 123. P. 2597–2617.
- Zijderveld J.D.A.* A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. *Methods in paleomagnetism* / Eds. D.W. Collinson, K.M. Creer. Amsterdam: Elsevier. 1967. P. 254–286.

Paleomagnetism of the Permian-Triassic Trap Intrusions from the Kulumbe River Valley, Northwestern Siberian Platform

A. V. Latyshev^{a, b, *}, A. A. Lapkovskii^c, R. V. Veselovskiy^{a, b},
A. M. Fetisova^{a, b}, and N. A. Krivolutskaya^d

^aFaculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

^cООО Norilskgeologiya, St. Petersburg, 195220 Russia

^dInstitute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: anton.latyshev@gmail.com

The Kulumbe River area has a structurally transitional position in the Siberian trap province due to being located in the junction zone of the Norilsk region and Tunguska syncline. The Kulumbe river valley combines characteristic igneous formations of both regions; however, the formation sequence of the intrusive complexes and their correlation with the volcanics are still unclear. This paper presents new paleomagnetic data on the intrusive bodies of the Kulumbe river valley. It is shown that intrusive magmatism in the region continued for a long time spanning at least one interval of reversed and one interval of normal polarity. Based on the comparison of virtual geomagnetic poles, the Silurian intrusion (Norilsk complex) containing sulfide mineralization can be correlated to the Mokulaeva–Kharaelakh formations and close to the formation time of the ore-bearing intrusions of the Norilsk region. The formation of the Kulumbe intrusion (Kureikan complex) and some other bodies of the Kureikan and Kuzmovka complexes is most likely to correspond to the Morongo–Mokulai age and is also close to the formation time of the ore-bearing intrusions. The reversely magnetized intrusive bodies of the Kulumbe River valley were formed after the completion of the main volcanic phase and are approximately synchronous with the Daldykan complex in the Norilsk region. The formation of the intrusions of the Katanga complex, just as in the central part of the Tunguska syncline, spans a long period of time and cannot be correlated to any particular formation. Finally, based on the detailed analysis of the paleomagnetic data we hypothesize that most of the intrusions of the Kulumbe River valley (except for part of the reversely magnetized bodies) have been formed before the end of the main regional deformations which roughly coincides with the termination of trap magmatism.

Keywords: paleomagnetism, Siberian trap province, intrusions, Permian, Triassic