



## TWO PULSES OF MAGMATIC ACTIVITY DURING THE EARLY RIPHEAN KUONAMKA IGNEOUS PROVINCE FORMATION: PALEOMAGNETIC SUBSTANTIATION OF THE HYPOTHESIS

A.M. Pasenko ✉, I.V. Fedyukin , V.E. Pavlov 

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

**ABSTRACT.** By the beginning of the 20th century, at least ten different generations of intrusive mafic bodies 1800–900 Ma were distinguished on the territory of the Anabar massif. The first modern age estimates, however, indicate the formation of the bulk of these bodies in a relatively short period of time ~1480–1500 Ma. Based on geochronological and paleomagnetic data, intrusive bodies with this age were combined into the Kuonamka large igneous province (LIP). However, a complex of paleomagnetic studies indicated the probable existence of at least two pulses of magmatic activity during the formation of this province, differing in age, possibly by ~20 Ma. We performed a paleomagnetic study of subvolcanic bodies of the main composition of Permo-Triassic (dykes) and Mesoproterozoic (sills) age, emerging to the surface in the valley of the middle reaches of the Kotui River. As expected, the studied dikes contain an ancient magnetization, the direction of which is typical for Permo-Triassic magmatic bodies of the region and the Siberian platform as a whole, and the paleomagnetic directions of the sills are close to those previously determined in the age-related subvolcanic bodies of the Kuonamka igneous province (1501±3 Ma) of the Anabar massif. The data obtained allow us to test the previously proposed hypothesis about the existence of two magmatic pulses ~1480 and 1500 Ma ago during the formation of the Kuonamka igneous province. The results of the analysis of already known and new paleomagnetic data obtained by us do not support this hypothesis. A refined paleomagnetic pole was proposed for the Siberian platform ~1500 Ma ago with coordinates 22.6° S, 65.0° E and A95=4.3°.

**KEYWORDS:** Kuonamka igneous province; Kotuy; Anabar massif; paleomagnetism; Siberian platform; Mesoproterozoic; Kotuy magmatic complex

**FUNDING:** The work was carried out within the framework of the RSF project № 22-77-00052.



EDN: NXITGW

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Aleksandr M. Pasenko, [a.m.pasenko@iperas.ru](mailto:a.m.pasenko@iperas.ru)

Received: September 13, 2023

Revised: January 10, 2024

Accepted: January 11, 2024

**FOR CITATION:** Pasenko A.M., Fedyukin I.V., Pavlov V.E., 2024. Two Pulses of Magmatic Activity during the Early Riphean Kuonamka Igneous Province Formation: Paleomagnetic Substantiation of the Hypothesis. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (2), 0748. doi: 10.5800/GT-2024-15-2-0748

## ДВА ПУЛЬСА МАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РАННЕРИФЕЙСКОЙ КУОНАМСКОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ: ПАЛЕОМАГНИТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИПОТЕЗЫ

А.М. Пасенко, И.В. Федюкин, В.Э. Павлов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

**АННОТАЦИЯ.** К началу XX в. на территории Анабарского поднятия выделялось по крайней мере десять различных генераций интрузивных базитовых тел с возрастом от 1800 до 900 млн лет. Современные оценки возраста, однако, указывают на формирование основного количества этих тел в относительно небольшом промежутке времени ~1480–1500 млн лет назад. На основании геохронологических и палеомагнитных данных интрузивные тела с таким возрастом были объединены в крупную Куонамскую магматическую провинцию (КМП). Но комплекс палеомагнитных исследований указывал на вероятное существование как минимум двух пульсов магматической активности при формировании этой провинции, различающихся по возрасту, возможно, на ~20 млн лет. Авторами было выполнено палеомагнитное исследование субвулканических тел – даек и силлов основного состава, выходящих на поверхность в долине среднего течения р. Котуй. Как и ожидалось, изученные дайки содержат древнюю намагниченность, направление которой типично для пермско-триасовых магматических тел региона и Сибирской платформы в целом, а палеомагнитные направления силлов близки к таковым, определенным ранее близким по возрасту субвулканическим телам КМП (1501±3 млн лет) Анабарского поднятия. Полученные по этим силам данные позволяют тестировать выдвинутую ранее гипотезу о существовании двух магматических пульсов ~1480 и 1500 млн лет назад при формировании КМП. Результаты совместного анализа уже известных и полученных авторами новых палеомагнитных и геохронологических данных не подтверждают эту гипотезу. Предложен уточненный палеомагнитный полюс для Сибирской платформы ~1500 млн лет назад с координатами 22.6° ю.ш., 65.0° в.д. и  $A95=4.3^\circ$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Куонамская магматическая провинция; Котуй; Анабарское поднятие; палеомагнетизм; Сибирская платформа; мезопротерозой; котуйский интрузивный комплекс

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ №22-77-00052.

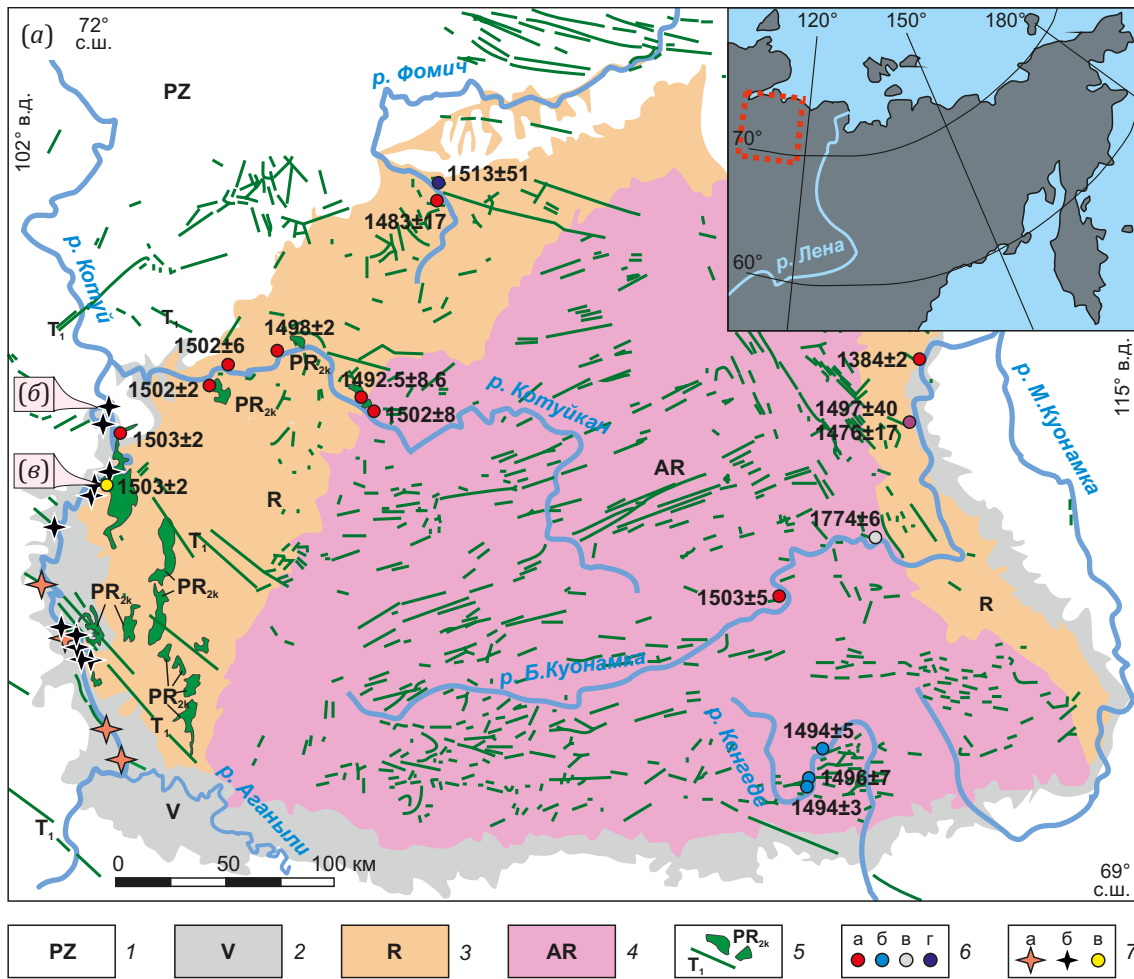
### 1. ВВЕДЕНИЕ

На территории Анабарского поднятия, как в пределах выступа древнего кристаллического фундамента Сибирской платформы, так и в области развития ее осадочного рифейско-фанерозойского чехла, широко распространены субвулканические тела (дайки и силлы) базитового состава [State Geological Map..., 2015, 2016] (рис. 1). Большинство из них на основании геологических соотношений и/или геохронологических датировок считаются позднедокембрийскими, часть имеет пермско-триасовый возраст, возраст некоторых тел (докембрийский или фанерозойский) разными авторами оценивается по-разному (например [Pasenko et al., 2023]).

На основании синтеза данных среднемасштабных геологических съемок 1950–1970-х гг. А.В. Округин с соавторами выделяли в составе позднедокембрийских базитов Анабарского поднятия десять различных генераций (поясов) даек и силлов со значениями возраста от 1800 до 900 млн лет, полученными преимущественно по K-Ar геохронометру [Okrugin et al., 1990]. Выполненные с тех пор U-Pb и Sm/Nd изотопные определения, отвечающие современным требованиям к качеству геохронологических данных, не подтверждают, однако, гипотезу о широком развитии в пределах Анабарского поднятия многочисленных эпизодов позднедокембрийского базитового магматизма. Имеющиеся

на настоящий момент современные данные говорят о том, что практически все геохронологически изученные позднедокембрийские базитовые тела Анабарского региона сформировались в относительно небольшом промежутке времени ~1480–1500 млн лет назад и только единичные дайки имеют возраст ~1380 и ~1770 млн лет [Ernst et al., 2000; Gladkochub et al., 2022].

С начала 2000-х гг. в регионе одновременно с геохронологическими определениями был выполнен большой объем палеомагнитных исследований [Veselovskiy et al., 2006, 2009; Ernst et al., 2000; Evans et al., 2016]. Палеомагнитные данные органично дополнили геохронологические, позволяя коррелировать магматические тела неизвестного возраста с телами, для которых современные геохронологические датировки уже были получены. В результате было показано, что подавляющее большинство позднедокембрийских базитовых тел Западного и Северного Прианабарья имеют возраст около 1500 млн лет, что послужило основанием для объединения их в составе новой Куонамской магматической провинции (КМП) [Ernst et al., 2016]. Недавние геохронологические и палеомагнитные результаты значительно расширяют площадь этой провинции, указывая на то, что она распространялась на юг Анабарского поднятия и, возможно, на территорию Уджинского и Оленекского поднятий [Pasenko, Malyshev,



**Рис. 1.** Геологическая карта-схема Анабарского массива и известные прецизионные определения возраста докембрийских интрузивных тел (а); холодный контакт силла (PR<sub>2</sub>) с карбонатами эдиакарской старореченской свиты (V<sub>ст</sub>) (б) и горячий контакт силла (PR<sub>2</sub>) с карбонатами раннерифейской юсмастакской свиты билляхской серии (R<sub>1б</sub>) (в).

1 – отложения палеозоя; 2 – отложения венды; 3 – отложения рифея; 4 – образования архей-протерозойского фундамента; 5 – интрузивные образования основного состава; 6 – известные достоверные определения возраста: а – [Ernst et al., 2016], б – [Tomshin et al., 2023], в – [Gladkochub et al., 2022], г – [Veselovskiy et al., 2006]; 7 – точки отбора образцов этого исследования: а – пермско-триасовых даек, б – рифейских силлов, в – геохронологической пробы.

**Fig.1.** Geological map-scheme of the Anabar massif and known precision age determinations of Precambrian intrusive bodies (a); cold contact of sill with carbonates of the Ediacaran Staraya Rechka formation (б) and backed contact of sill with carbonates of the Early Riphean Yusmastakh formation (в).

1 – Paleozoic deposits; 2 – Vendian deposits; 3 – Riphean deposits; 4 – formations of the Archaean-Proterozoic basement; 5 – intrusive formations of the main composition; 6 – known reliable age definitions: a – [Ernst et al., 2016], б – [Tomshin et al., 2023], в – [Gladkochub et al., 2022], г – [Veselovskiy et al., 2006]; 7 – Sampling points of this study: a – Permo-Triassic dikes, б – Riphean sills, в – geochronological sample.

2020; Tomshin et al., 2023; Wingate et al., 2009; Malyshev et al., 2022].

В статье 2009 г. [Veselovskiy et al., 2009] было высказано предположение (поддержанное затем в работе [Evans et al., 2016]) о существовании по крайней мере двух пульсов магматической активности при формировании Куонамской вулканической провинции, различающихся по возрасту, возможно, на ~20 млн лет. Это предположение базировалось на статистически значимом расхождении средних палеомагнитных направлений изученных к тому времени базитовых тел Западного и Северного Прианабарья, а также на возможном различии их изотопного возраста. В то время как для всех изученных тел Западного Прианабарья U-Pb определения показывали возраст около ~1500 млн лет, единственное определение, имевшееся для силла из Северного Прианабарья (долина р. Фомич), указывало на его формирование около ~1480 (1483±17) млн лет назад [Ernst et al., 2016]. В пользу гипотезы о существовании двух пульсов при формировании КМП свидетельствуют в какой-то степени также результаты изотопного датирования Талахтахой диатремы (1476±17 млн лет), расположенной на востоке Анабарского поднятия [Zhmodik et al., 2022], а также возраст (1473±24 млн лет) Кютингдинского силла Оленекского поднятия [Wingate et al., 2009]. Отнесение последнего к КМП поддерживается не только геохронологическими данными, но и близостью полученного по нему палеомагнитного полюса к соответствующим полюсам Западного и Северного Прианабарья [Evans et al., 2016; Wingate et al., 2009].

С другой стороны, значимое различие средних палеомагнитных направлений изученных тел Северного и Западного Прианабарья может быть связано с недостаточным осреднением вековых геомагнитных вариаций при расчете одного или обоих соответствующих направлений. При этом различие изотопных возрастов тел, которые могли бы быть отнесены к разным пульсам магматической активности, не кажется очевидным с учетом достаточно больших размеров их доверительных интервалов. Таким образом, становится ясно, что гипотеза двух пульсов нуждается в дополнительной проверке.

В 2021–2023 гг. авторами были выполнены палеомагнитные исследования позднекембрийских базитовых тел возраста ~1500 млн лет из долины среднего течения р. Котуй. Их мезопротерозойский возраст подтверждается двумя U-Pb геохронологическими определениями, выполненными для одного из крупных силлов этого района мощностью ~40–50 м и площадью распространения ~800 км<sup>2</sup> [Pasenko et al., 2023]. Полученные данные позволяют вернуться к тестированию гипотезы о существовании двух пульсов магматической активности при формировании КМП. Результаты этого тестирования и следующие из него выводы излагаются в настоящей работе.

## 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории Анабарского поднятия силлы и дайки, соотносимые с КМП, представлены преимущественно основными породами толеитового и субщелочного состава внутриплитного происхождения с источником

**Таблица 1.** Геохронологические определения для тел Куонамской магматической провинции, полученные по U-Pb, Sm/Nd и Ar-Ar геохронометрам

**Table 1.** Geochronological data for the magmatic bodies of the Kuonamka LIP based on the U-Pb, Sm/Nd and Ar-Ar geochronometers

Объект	Район	Метод	Датируемый минерал	Возраст	Ссылки
Силл	р. Фомич	Sm/Nd	Plg-Apt-Орх-Нур-WR*	1513±51	[Veselovskiy et al., 2006]
Дайка	р. Б. Куонамка			1503±5	[Ernst et al., 2000]
Дайка	р. Котуйкан	U-Pb, ID-TIMS	Бадделеит	1502±6	[Ernst et al., 2016]
Силл	р. Котуйкан			1498±2	[Ernst et al., 2016]
Силл	р. Котуйкан			1502±8	[Ernst et al., 2016]
Силл	р. Фомич	U-Pb, IN-SIMS	Zr-содержащий минерал	1483±17	[Ernst et al., 2016]
Силл	р. Котуй			1503±2	[Ernst et al., 2016]
Силл	р. Котуйкан			1502±2	[Ernst et al., 2016]
Силл	р. Котуйкан			1493±9	[Ernst et al., 2016]
Силл	р. Котуй	U-Pb, ID-TIMS	Бадделеит	1503±3	[Pasenko et al., 2023]
Дайка	р. Кенгеде			1496±7	
Дайка	р. Кенгеде			1494±3	[Tomshin et al., 2023]
Дайка	р. Кенгеде			1494±5	
Диатрема	р. Б. Куонамка в районе устья р. Талахта	Ar-Ar	Сандин	1476±17	[Zhmodik et al., 2022]
Дайка	р. Б. Куонамка	U-Pb, ID-TIMS	Бадделеит	1384±2	[Ernst et al., 2000]
Дайка	р. Б. Куонамка	U-Pb, ID-TIMS	Бадделеит	1774±6	[Gladkochub et al., 2022]

Примечание. \* – Plg-Apt-Орх-Нур-WR (плагноклаз-апатит-ортопироксен-гиперстен-вал).

Note. \* – Pl-Art-Орх-Нур-WR (plagioclase-apatite-orthopyroxene-hypersthene-whole rock).

смешанного типа между E-MORB и OIB [Ernst et al., 2016]. Известные современные возрастные определения для тел КМП варьируются в пределах 1483–1513 млн лет (табл. 1), при этом ее средний возраст оценивается как  $1501 \pm 3$  млн лет [Ernst et al., 2016].

В последние несколько лет появились новые геохронологические и изотопные определения (табл. 1), которые позволяют отнести к КМП также дайковый рой долины р. Кенгеде (южный склон Анабарского поднятия, [Tomshin et al., 2023]), серию субвулканических тел основного состава в долине среднего течения р. Котуй (Юго-Западное Прианбарье [Pasenko et al., 2023]) и, возможно, Талахтахскую диатрему, прорывающую рифейские отложения на восточном склоне Анабарского поднятия [Zhmodik et al., 2022]. Осадочные образования склонов Анабарского поднятия (рифейские, вендские и палеозойские отложения), в том числе и в районе работ, характеризуются преимущественно субгоризонтальным залеганием или же очень пологими углами падения – до  $5^\circ$ .

Для выполнения палеомагнитного анализа авторами было опробовано семь ранее не изучавшихся силлов мезопротерозойского возраста котуйского интрузивного комплекса и четыре раннетриасовые дайки оленёк-велинггинского интрузивного комплекса [State Geological Map..., 2015] (рис. 1). Силлы сложены долеритами с различной степенью вторичных изменений, дайки образованы относительно свежими долеритами и габбро-долеритами. Все отобранные для палеомагнитных исследований образцы как силлов, так и даек характеризуются полнокристаллической структурой.

Мощность изученных тел от первых метров до первых десятков метров. Исследование пермско-триасовых даек было проведено для заверки их возраста и для оценки степени влияния пермско-триасового магматизма на палеомагнитную запись докембрийских силлов.

Отбор образцов для проведения классического теста обжига не мог быть произведен в силу отсутствия обнаженных контактов. Вмещающие породы были опробованы на некотором удалении от контактов. Всего было отобрано 16 образцов вмещающих карбонатов юсмастхской свиты на расстоянии 2 км от ближайшего интрузивного тела (силл мезопротерозойского возраста). К сожалению, исследования авторов показали, что изученные вмещающие породы не содержат интерпретируемого палеомагнитного сигнала и также не могут быть использованы для выполнения теста контактов даже в его упрощенном виде.

### 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

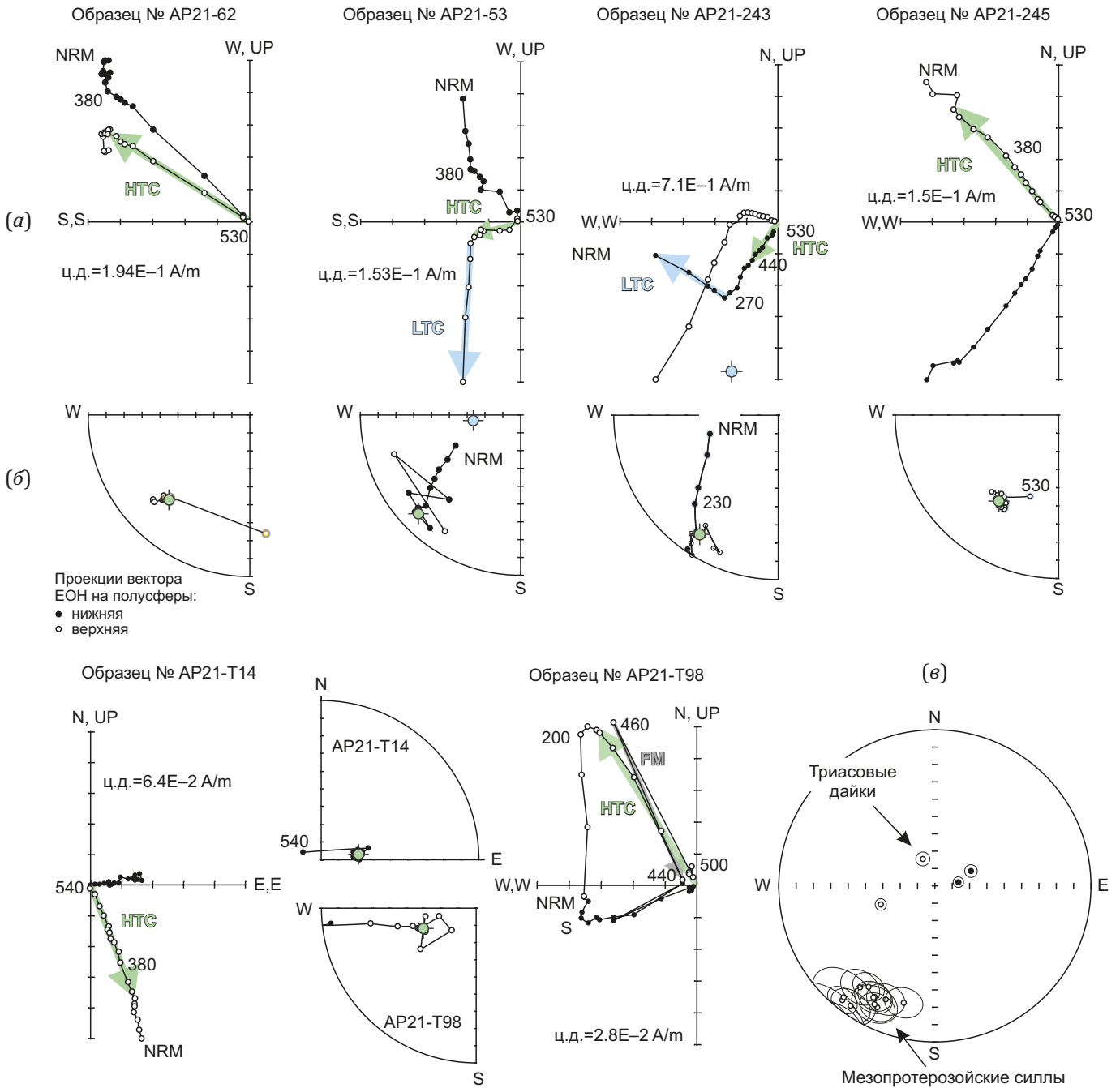
Для палеомагнитных исследований ориентированные образцы отбирались штучным методом. Отбор и последующая обработка палеомагнитных образцов проводились по стандартной методике [Tauxe, 2010] в лаборатории Главного геомагнитного поля ИФЗ РАН и на оборудовании ЦКП ИФЗ РАН [Veselovskiy et al., 2022].

Ступенчатая магнитная чистка проводилась путем температурного размагничивания с использованием немагнитной печи MMTD80 (Magnetic Measurements, Великобритания) с измерением вектора естественной остаточной намагниченности (ЕОН) на криогенном SQUID (2G-Enterprises, США) и спин – JR-6 (AGICO, Чехия) магнитометрах в пространстве, экранированном от внешнего магнитного поля. Термомагнитные исследования проводились на вибромагнитометре конструкции Ю.К. Виноградова (ГО «Борок», Россия) и на капнометре MFK1-FA с термоприставкой CS3 (AGICO, Чехия). Коэрцитивные параметры снимались на вибромагнитометре PMC MicroMag 3900 (Lake Shore, США). Компонентный анализ, расчет палеомагнитных полюсов и визуализация данных проводились в компьютерной программе "PmTools" [Efremov, Veselovskiy, 2023].

### 4. ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ

Палеомагнитные данные подтверждают указанный на геологической карте пермско-триасовый возраст изученных даек. Эти тела содержат стабильную палеомагнитную запись с единственной, как правило, компонентой намагниченности, характеризующейся направлениями обеих полярностей, типичными для пермско-триасовых тел Сибирской трапповой провинции (рис. 2, образцы № AP21-T14 и AP21-T98). В ряде образцов по итогам ступенчатой температурной чистки авторами обнаружено присутствие одновременно двух антиполярных компонент (рис. 2, образец AP21-T98). Подобное явление для пермско-триасовых траппов Сибири описывалось неоднократно (например [Veselovskiy et al., 2003]) и связано, возможно, с ложным самообращением намагниченности по механизму, предложенному в статье [Shcherbakov et al., 2017]. В данной работе эта особенность палеомагнитной записи рассматриваться не будет, однако стоит отметить ее как характерное свойство данных пород.

В изученных образцах мезопротерозойских силлов выделено две компоненты намагниченности – низко- и среднетемпературная и высокотемпературная. Иногда спектры блокирующих температур для обеих компонент существенно перекрываются – в этом случае выделение конечных направлений оказывается невозможным. Низко- и среднетемпературная компонента (LTC) была выделена на интервале температур от 20–380 до 400–540 °С. Она характеризуется либо умеренными и высокими положительными наклонениями преимущественно с юго-западными склонениями (рис. 2), либо высокими положительными наклонениями и северными склонениями. Во втором случае выделяемое направление близко к направлению современного геомагнитного поля в районе работ и является, по всей видимости, результатом современного перемагничивания. В первом же выделяемые направления могут интерпретироваться как наложение двух компонент: высокотемпературной древней (см. ниже) и современной (или пермско-триасовой трапповой).



**Рис. 2.** Результаты ступенчатой магнитной очистки магматических тел среднего течения р. Котуй докембрийского (верхний ряд) и пермско-триасового (нижний ряд) возраста.

(а) – диаграммы Зийдверельда и (б) – стереограммы направления вектора NRM. Цифрами показана температура шагов очистки в градусах Цельсия. LTC, HTC – низко- и высокотемпературная компоненты намагниченности, FM – ложная компонента намагниченности. (в) – стереограмма среднего направления характеристических компонент намагниченности в отдельных сайтах. Все направления приведены в географической системе координат. На диаграммах черные/белые кружки – проекции вектора NRM на горизонтальную/вертикальную плоскость. Ц.д. – цена деления на осях диаграммы Зийдверельда.

**Fig. 2.** Results of stepwise magnetic cleaning of magmatic bodies of the middle reaches of the Kotuy River of Precambrian (upper row) and Permo-Triassic (lower row) ages.

(а) – Zijderveld diagrams and (б) – stereograms of the NRM vector. The numbers show the temperature of the steps heating in Celsius degrees. LTC, HTC – secondary and characteristic components of magnetization, FM – false magnetization component. (в) – stereogram of the average direction of the characteristic magnetization components at individual sites. All directions are given in a geographical coordinate system. In the diagrams, the black/white circles are projections of the NRM vector on the horizontal/vertical plane. Ц.д. – the magnetization scale on the axes of the Zijderveld diagram.

**Таблица 2.** Направления характеристической компоненты намагниченности, выделенные в интрузивных телах Куонамской магматической провинции**Table 2.** Directions of the characteristic magnetization component isolated in the intrusive bodies of the Kuonamka LIP

Объект*	$\phi$ (N)	$\lambda$ (E)	$n/N$	$D^\circ$	$I^\circ$	$K$	$\alpha 95^\circ$
Мезопротерозойские долеритовые силлы							
о. Гугда-Ары	69.49	103.49	29/31**	205.4	-12.5	15.6	7.0
р. Орон-Юрях	69.58	103.38	13/15**	215.1	-5.5	25.9	8.3
о. Песчаный	69.53	103.39	13/13	208.5	-17.1	32.3	7.4
р. Хатыска_1	69.99	103.06	8/12**	203.4	-18.6	41.5	8.7
р. Хатыска_2	69.99	103.06	6/13**	219.0	-5.2	107.0	6.5
р. В. Налэ	70.05	103.12	9/12**	219.3	-7.0	14.3	14.1
р. Оревун_1	70.13	103.39	12/12	216.4	-17.3	23.6	9.1
р. Оревун_2	70.17	103.39	12/12	207	-13.3	19.7	10.0
р. Оревун_3	70.21	103.56	12/12	213.3	-20.3	35.2	7.4
р. Утруктак	70.40	103.43	12/12	194.9	-20.2	26.3	8.6
пор. Кирилл-Сергей-Уоран	70.45	103.47	16/16	208.8	-16.5	19.3	8.6
Среднее направление			11	210.2	-14.1	78.2	5.2
Пермско-триасовые долеритовые дайки							
р. Хара-хая			12/13	81.0	76.3	15.6	3.0
р. Унгкян			12/12	67.7	67.5	25.9	3.6
р. От-юрях			15/15	251.0	-57.0	15.6	3.2
р. Кочокон			13/13	335.8	-73.0	25.9	4.0

Примечание.  $\phi$ ,  $\lambda$  – географическая широта и долгота точек опробования;  $n/N$  – количество образцов, использованных для расчета среднего направления, отобранных в сайте;  $D$ ,  $I$ ,  $K$ ,  $\alpha 95$  – склонение, наклонение, кучность, радиус 95%-ного овала доверия. \* – названия точек даны по ближайшим характерным географическим объектам. Все направления приведены для современной системы координат. \*\* – для отбраковки направлений векторов естественной остаточной намагниченности использован угол отсечения  $40^\circ$ .

Note.  $\phi$ ,  $\lambda$  – geographic latitude and longitude;  $n/N$  – number of samples used to calculate the average direction, sampled at the site;  $D$ ,  $I$ ,  $K$ ,  $\alpha 95$  – declination, inclination, accuracy, 95 % radius of the confidence oval. \* – the names of points are given according to the nearest characteristic geographical objects. All directions are given for the geographic coordinate system. \*\* – a  $40^\circ$  cut-off angle was used to reject the directions of the natural remnant magnetization vectors.

Высокотемпературная (НТС), она же характеристическая, компонента намагниченности выделяется на широком спектре температур – 300–600 °С и отличается умеренными и пологими отрицательными наклонениями с юго-западным склонением (рис. 2; табл. 2). Судя по преобладающим значениям максимальных деблокирующих температур (~530 °С), основным минералом-носителем этой компоненты намагниченности является, вероятно, низкотитанистый титаномагнетит.

## 5. МАГНИТНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Результаты термомагнитных измерений указывают на то, что изученные образцы мезопротерозойских силлов относительно термостабильны. Диаграммы зависимости намагниченности насыщения от температуры  $M_s(T)$  часто имеют практически обратимый характер и свидетельствуют о том, что основные минералы – носители намагниченности – имеют точки Кюри в интервале 500–580 °С (рис. 3, а). Диаграммы температурной зависимости магнитной восприимчивости  $k(T)$  также подтверждают присутствие в изученных образцах минералов-носителей намагниченности с такими точками Кюри (рис. 3, б). Наиболее вероятно, что

эти минералы – магнетит и низкотитанистый титаномагнетит. Основной магнитный минерал в измеренных образцах обладает относительно низкой коэрцитивностью, свойственной минералам титаномагнетитового ряда – максимум на FORC-диаграмме лежит в области полей порядка 10 мТл (рис. 3, д).

На диаграмме Дея-Данлопа (рис. 3, г) образцы распределены в области псевдооднородных (PSD) частиц, вдоль кривой смещения однодоменных (SD) и многодоменных (MD) зерен. Характер FORC-диаграммы [Muxworthy, Dunlop, 2002] указывает на преобладание в изученных образцах PSD зерен.

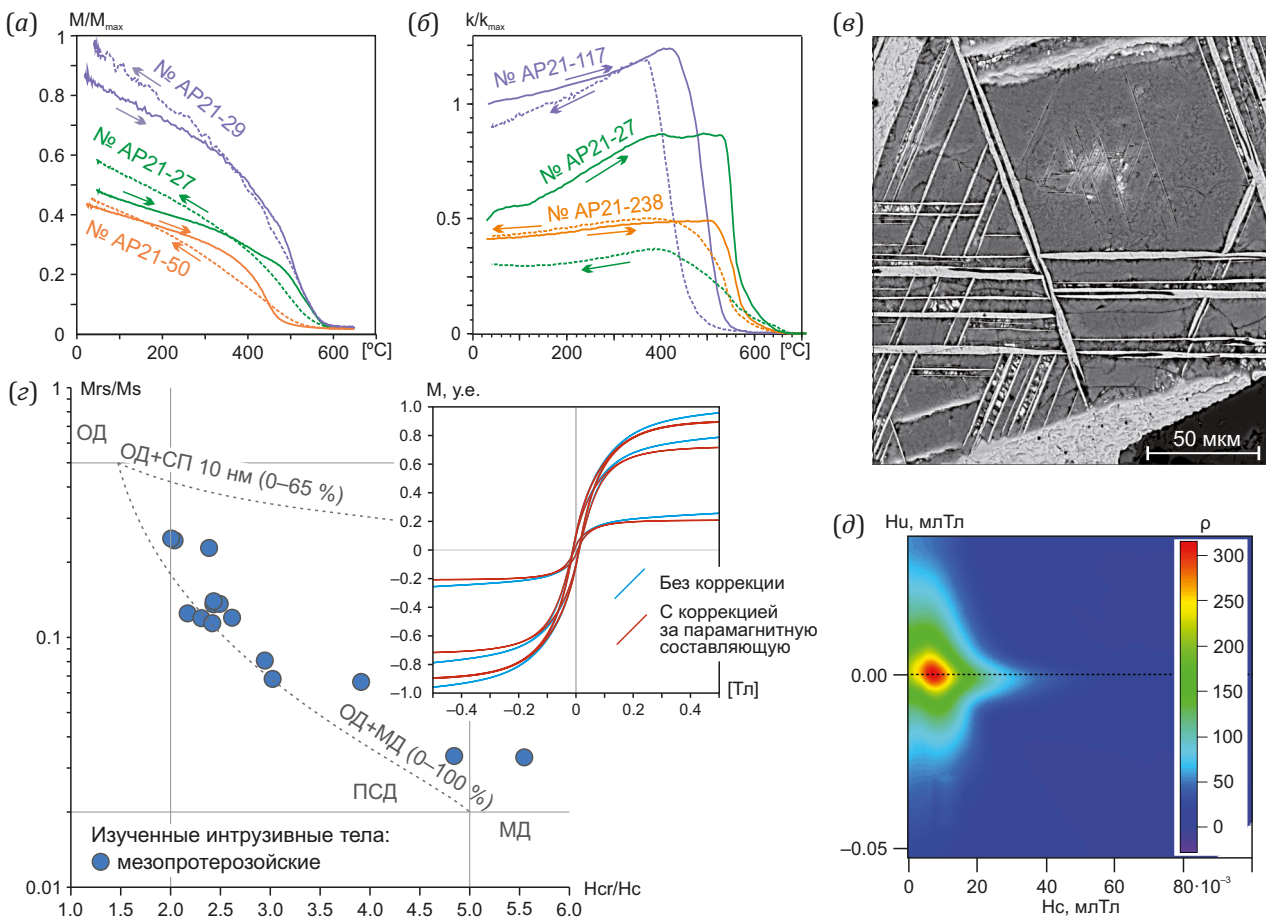
Исследование шлифов под электронным микроскопом показывает наличие структур гетерофазного окисления (ГФО), образующихся обычно при высоких температурах в процессе остывания магмы (рис. 3, в). Размеры ламелей, образованных в результате ГФО, в изученных образцах варьируются от ~0.7 до ~3.0 мкм, что, согласно экспериментальным оценкам, соответствует окислению при температуре выше 900 °С [Gapeev, Celmovich, 1986]. Помимо присутствия зерен титаномагнетитов со структурами ГФО, в подчиненном количестве отмечены гомогенные зерна титаномагнетита.

### 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В пользу первичности выделенной высокотемпературной компоненты намагниченности в изученных интрузивных телах можно привести следующие аргументы. Во-первых, петромагнитные эксперименты показали присутствие в образцах титаномагнетита и магнетита, находящихся преимущественно в псевдооднородном состоянии. Это значит, что исследуемые породы могут нести стабильный древний палеомагнитный сигнал [Dunlop, Özdemir, 1997]. Во-вторых, в образцах мезопротерозойских долеритов были обнаружены структуры гетерофазного (высокотемпературного) окисления зерен титаномагнетита (рис. 3, в). Это свидетельствует в пользу термоостаточной природы записанного в них палеомагнитного сигнала. В-третьих, существенное различие палеомагнитных направлений, записанных в мезопротерозойских и пермско-триасовых интрузивных породах, указывает на отсутствие

перемагничивания во время пермско-триасового магматического события. В пользу первичности характеристической компоненты намагниченности изученных мезопротерозойских силлов свидетельствует также практическое совпадение ее направлений с палеомагнитными направлениями, выделенными ранее в силлах долины р. Котуйкан примерно в 30 км севернее района работ. Эти силлы относятся к КМП, и ранее для них был получен положительный тест обжига, подтверждающий первичность их намагниченности [Evans et al., 2016].

Сходство палеомагнитных направлений (их кучность равна 136 (табл. 3)) для изученных (в настоящей работе и ранее) силлов среднего Котуя и их географическая близость позволяют распространить на все эти силлы определение возраста  $1502.5 \pm 2.6$  млн лет (U-Pb, бадделейт), полученное недавно по одному из них – Оревуновскому [Pasenko et al., 2023]. Такое определение



**Рис. 3.** Результаты петромагнитного исследования мезопротерозойских пород среднего течения р. Котуй. (а) – диаграмма температурной зависимости намагниченности насыщения; (б) – диаграмма температурной зависимости магнитной восприимчивости; (в) – структура высокотемпературного окисления в кристалле титаномагнетита; (г) – диаграмма Дея-Данлопа. На врезке – характерные петли гистерезиса. СП, ОД, ПСД, МД – суперпарамагнитные, однодоменные, псевдооднородные и многодоменные зерна соответственно; (д) – FORC-диаграмма [Muxworthy, Roberts, 2007].

**Fig. 3.** The results of a petromagnetic study of Mesoproterozoic rocks of the middle reaches of the Kotui River. (а) – a diagram of the temperature dependence of saturation magnetization; (б) – a diagram of the temperature dependence of magnetic susceptibility; (в) – the structure of high-temperature oxidation in a titanomagnetite crystal; (г) – the Dey-Dunlop diagram. The inset shows characteristic hysteresis loops. СП, ОД, ПСД, МД are superparamagnetic, single-domain, pseudo-single-domain and multi-domain grains, respectively; (д) – the FORC diagram [Muxworthy, Roberts, 2007].



**Таблица 3.** Палеомагнитные определения для тел Куонамской магматической провинции Сибирской платформы  
**Table 3.** Paleomagnetic determination for the Kuonamka LIP of the Siberian Platform

Объект	Сайт №	Район	$\phi^\circ$ (N)	$\Lambda^\circ$ (E)	PLat $^\circ$ (N)	Plon $^\circ$ (E)	A95 $^\circ$
Северо-Анабарский субрегион (Север), р. Фомич (1483±17 млн лет) [Evans et al., 2016]							
1	3-04(D)*	Фомич	71.2767	107.1442	-13.3	73.9	3.7
	3-04(C)*	Фомич	71.2767	107.1442	-13.8	71.8	4.9
	Средний полюс				-13.6	2.8	
2	5-04*	Фомич	71.3422	106.9244	-28.6	79.4	9.3
	6-04*	Фомич	71.3408	106.9278	-26.0	80.0	7.6
	Средний полюс				-27.3	79.7	
3	7-04*	Фомич	71.3772	106.8511	-20.4	81.1	5.8
	8-04*	Фомич	71.3786	106.8400	-25.8	83.8	7.5
	9-04*	Фомич	71.3636	106.8056	-19.4	84.9	5.7
	10-04*	Фомич	71.3658	106.8142	-26.8	96.7	10.3
	Средний полюс				-23.2	86.5	
4	11-04*	Фомич	71.3747	106.7314	-22.4	89.7	7.7
	12-04*	Фомич	71.3717	106.7281	-16.4	81.5	3.8
	Средний полюс				-19.4	85.5	
5	14-04*	Фомич	71.3928	106.5356	-23.4	81.2	11.8
6	15/16-04*	Фомич	71.4090	106.3800	-17.8	64.8	12.7
7	17_04	Фомич	71.4317	106.2567	-33.5	62.6	7.0
Средний полюс для интрузивных тел р. Фомич			по телам (N=7, K=55)		-22.8	76.3	8.2
			по сайтам (N=13, K=61)		-22.4	79.3	5.4
Западно-Анабарский субрегион (Запад), р. Котуйкан и ее притоки (1502±2 млн лет) [Evans et al., 2016]							
8	8-01	Н. Котуйкан	70.5200	103.8800	-23.9	67.0	9.0
9	3-01	Н. Котуйкан	70.4666	104.4500	-33.1	59.0	5.4
10	14-07	Н. Котуйкан	70.5194	103.8554	-23.7	66.1	4.3
11	181-08(DC)	В. Котуйкан	70.6333	105.269	-23.0	76.0	6.5
12	1-08	В. Котуйкан	70.5895	104.9653	-25.6	65.4	3.9
13	40-07	В. Котуйкан	70.5670	104.5259	-26.1	55.6	3.5
	41-07	В. Котуйкан	70.5634	104.5381	-28.3	55.9	7.7
	Средний полюс				-27.2	55.8	
14	37-07(D)	Илья	70.4206	105.563	-20.1	48.6	5.7
15	D-08	В. Котуйкан	70.7005	105.6013	-19.2	63.2	9.3
16	39-07(D)	В. Котуйкан	70.6059	104.9124	-34.4	63.0	6.7
	39-07(H)	В. Котуйкан	70.6059	104.9124	-34.5	81.5	10.4
	Средний полюс				-34.8	72.2	
17	10-00	Маган	70.2358	104.6681	-22.4	52.5	11.3
18	1-07	Джогджо	70.1847	104.1219	-27.6	65.8	4.5
19	3-07	Джогджо	70.1929	104.1194	-24.3	55.6	4.3
20	4-07	Джогджо	70.2281	104.1778	-25.7	69.0	4.7
21	8-07	Джогджо	70.3094	104.3128	-25.7	68.7	8.5
22	11-07	Н. Котуйкан	70.4964	104.5335	-23.2	31.6	4.8
	11-07(C)	Н. Котуйкан	70.4964	104.5335	-23.9	30.7	9.9
	16-00	Н. Котуйкан	70.5117	104.5292	-22.7	26.5	6.3
	Средний полюс				-23.3	29.6	
23	14-00	Джогджо	70.4878	104.4889	-24.4	57.6	5.7
24	17-00	Джогджо	70.5153	104.5022	-27.3	49.6	5.6
25	12-07	Н. Котуйкан	70.5626	104.0303	-18.1	61.7	4.1
26	13-07	Н. Котуйкан	70.5634	103.8909	-7.0	71.3	5.9
27	6-01	Н. Котуйкан	70.5300	103.9100	-23.4	55.5	6.2

Таблица 3 (продолжение)

Table 3 (continued)

Объект	Сайт №	Район	$\phi^\circ$ (N)	$\Lambda^\circ$ (E)	PLat $^\circ$ (N)	Plon $^\circ$ (E)	A95 $^\circ$	
Средний полюс для интрузивных тел р. Котуйкан			по телам ( $N=20, K=53$ )		-24.4	60.6	4.5	
			по сайтам ( $N=24, K=36$ )		-25.1	58.2	5.0	
Юго-Западное Прианабарье, субрегион Юго-Запад, среднее течение р. Котуй (1503±2 млн лет)								
28	о. Гугда-Ары	Котуй	69.4883	103.4942	-24.7	75.5	5.1	
29	р. Орон-Юрях	Котуй	69.5754	103.3761	-19.3	65.9	5.9	
30	о. Песчаный	Котуй	69.5272	103.394	-26.5	71.6	5.5	
31	р. Хатыска1	Котуй	69.9878	103.0632	-27.8	76.8	6.5	
	р. Хатыска2	Котуй	69.9878	103.0632	-18.0	61.7	4.6	
	р. В. Налэ	Котуй	70.0462	103.1209	-18.7	61.2	10.0	
	Средний полюс				-21.6	66.3		
32	р. Утруктак	Котуй	70.3968	103.4292	-29.3	86.6	6.5	
33	пор. Кирилл-Сергей-Уоран	Котуй	70.4548	103.4676	-25.3	71.6	6.4	
Силл «Оревун» (данные из этой работы и работы [Evans et al., 2016])								
34	р. Оревун1	Котуй	70.1339	103.3921	-24.5	63.3	6.8	
	р. Оревун2	Котуй	70.1652	103.3866	-24.2	73.8	7.3	
	р. Оревун3	Котуй	70.2094	103.5583	-26.7	66.4	5.7	
	16-07	Котуй	70.3088	103.5395	-29.4	67.0	3.9	
	17-07	Котуй	70.3115	103.5385	-26.4	60.0	6.2	
	18-07	Котуй	70.3149	103.5373	-28.2	71.7	9.9	
	19-07	Котуй	70.317	103.5392	-31.5	76.4	7.6	
	20-07	Котуй	70.3214	103.5416	-28.2	65.3	7.4	
	21-07	Котуй	70.3238	103.5424	-31.1	73.5	6.3	
	22-07	Котуй	70.3271	103.543	-27.5	61.6	9.6	
	23-07	Котуй	70.3311	103.5411	-30.4	83.9	12.3	
	24-07	Котуй	70.3378	103.5369	-27.1	62.7	7.7	
	25-07	Котуй	70.3443	103.5363	-27.1	75.5	7.2	
		Средний полюс				-28.0	69.2	
	35	26-07	Котуй	70.3926	103.4287	-31.0	72.9	5.2
	36	27-07	Котуй	70.4261	103.4277	-29.4	78.7	9.6
Средний полюс для интрузивных тел р. Котуй			по телам ( $N=9, K=136$ )		-26.3	73.0	4.4	
			по сайтам ( $N=23, K=114$ )		-26.8	70.5	2.8	
Восточно-Анабарский субрегион, р. Большая Куонамка (1503±5 млн лет) [Ernst et al., 2000]								
37	KU_1*	Б. Куонамка	69.545	109.1317	-7.1	53.1	20.3	
38	KU_2*	Б. Куонамка	69.5967	109.9167	-4.3	44.3	19.7	
39	KU_3*	Б. Куонамка	69.6167	110.3033	-27.4	80.0	7.1	
40	KU_4*	Б. Куонамка	69.7633	110.8433	16.5	31.8	7.8	
41	KU_14*	Б. Куонамка	69.8967	112.8	-5.7	61.3	9.9	
Средний полюс для интрузивных тел р. Б. Куонамка			по телам ( $N=5, K=12$ )		-5.8	53.6	22.8	
			по сайтам ( $N=5, K=12$ )		-5.8	53.6	22.8	
Палеомагнитный полюс Сибирской платформы ~1500 млн лет			по телам ( $N=41, K=28$ )		-22.6	65.0	4.3	
			по сайтам ( $N=65, K=28$ )		-24.0	66.4	3.4	

Примечание. Палеомагнитные направления для отдельных сайтов приведены из работы [Evans et al., 2016], где были пересчитаны с учетом данных из работы [Veselovskiy et al., 2009]. \* – направления инвертированы относительно направлений, приведенных в работе [Veselovskiy et al., 2009]. Координаты сайтов:  $\phi^\circ$  (N) – широта (северная),  $\Lambda^\circ$  (E) – долгота (восточная). Координаты полюсов: PLat $^\circ$  (N) – широта (северная); Plon $^\circ$  (E) – долгота (восточная). A95 – радиус 95 % круга доверия. N – число тел (интрузий) или сайтов. K – кучность.

Note. Paleomagnetic direction for unique sites from [Evans et al., 2016] recalculated after [Veselovskiy et al., 2009]. \* – the directions are inverted relative to [Veselovskiy et al., 2009]. The coordinates of the sites are:  $\phi^\circ$  (N) – latitude (north),  $\Lambda^\circ$  (E) – longitude (east). Pole coordinates: PLat $^\circ$  (N) – latitude (north); Plon $^\circ$  (E) – longitude (east). A95 is the radius of 95 % of the circle of trust. N is the number of bodies (intrusions) or sites. K is the precision parameter.

идеально совпадает с более ранним определением по северной части этого очень большого по протяженности силла ( $1503 \pm 2$  млн лет, U-Pb, бадделлит [Ernst et al., 2016]).

Для решения основной задачи данной работы нужно сравнить палеомагнитные данные, полученные по разным субрегионам КМП (табл. 3). Понятно, что поскольку рассматриваемые магматические тела расположены иногда на значительном расстоянии друг от друга, следует сравнивать не палеомагнитные направления, а палеомагнитные полюсы. Географически рассматриваемые объекты естественным образом разделяются на четыре субрегиона: Северо-Анабарский (Север), Западно-Анабарский (Запад), Восточно-Анабарский (Восток) и субрегион, расположенный на юго-западе Анабарского поднятия в долине среднего течения р. Котуй (Юго-Запад).

Палеомагнитные направления Восточно-Анабарского субрегиона количественно сравнивать с таковыми для других субрегионов (в рамках рассмотрения вопроса о существовании двух пульсов) бессмысленно из-за малого числа сайтов и высокого разброса палеомагнитных направлений. Мера точности определения среднего палеомагнитного полюса A95 (радиус круга 95 % доверия) здесь составляет  $22.8^\circ$  (табл. 3), что слишком много, если учитывать возможное угловое расстояние между полюсами, различие в возрасте которых может составлять  $\sim 20$  млн лет. Таким образом, для сравнения остаются только полюсы регионов Север, Запад и Юго-Запад.

Далее встает вопрос о способе расчета средних палеомагнитных полюсов и их кругов доверия. Это можно делать на уровне сайтов, взвешенных сайтов и на уровне отдельных тел – интрузий. Поскольку разные магматические тела в данном случае представлены разным количеством сайтов, расчет на уровне сайтов может привести к большему влиянию на конечный результат тех тел, в которых было отобрано несколько сайтов, по сравнению с телами, где был отобран и изучен только один сайт. Задача требует, чтобы результаты по каждому изученному магматическому телу входили в расчет с одинаковым весом, поэтому авторы считают более корректным рассчитывать среднее по субрегиону на уровне отдельных тел – интрузий. Расчет на уровне взвешенных сайтов (подобно тому, как это делалось в работе [Evans et al., 2016]) приводит практически к тому же результату.

Сайты, использованные для расчетов, и полученные по ним положения индивидуальных и средних палеомагнитных полюсов приведены в табл. 3. В эту таблицу не внесены сайты с весом 0 из работы [Evans et al., 2016, табл. 1]. Кроме того, в один сайт были осреднены данные по магматическим и по перемагнитченным ими осадочным породам из сайтов 39-07(D) и 39-07(H) из той же работы.

Прежде всего можно отметить, что так же, как и в предшествующих работах [Veselovskiy et al., 2009; Evans et al., 2016], средние полюсы, рассчитанные для субре-

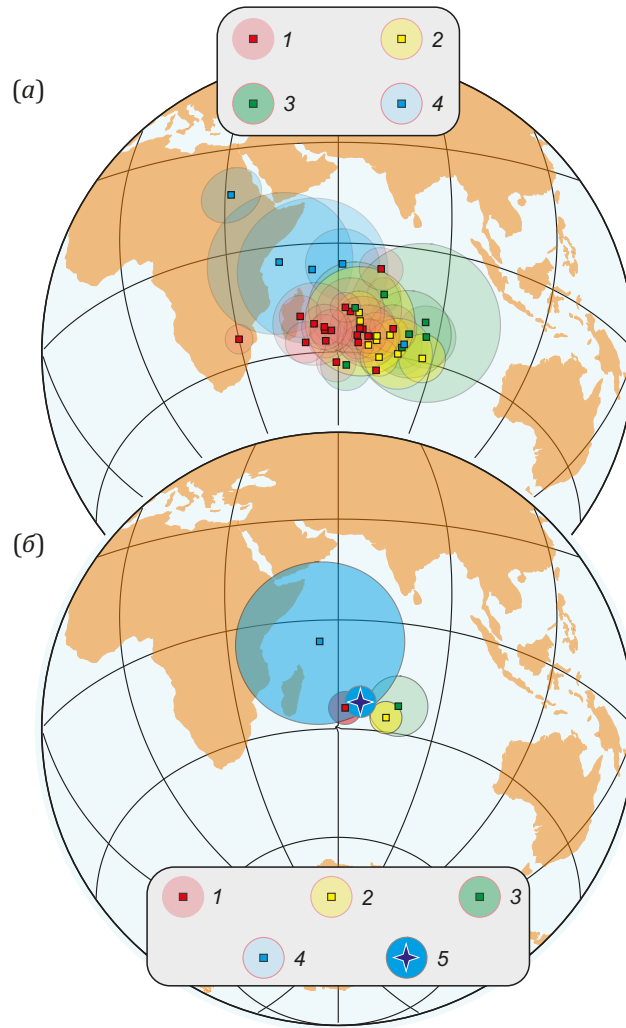
гионов Запад и Север, значимо различаются (рис. 4) ( $\gamma/\gamma_{cr} = 14.6^\circ/8.8^\circ$  [McFadden, McElhinny, 1990]). Это неудивительно, с учетом того, что набор полюсов, используемых авторами для расчета, по сравнению с работой [Evans et al., 2016] практически не изменился, а способ расчета среднего полюса в нашей работе (по телам) по смыслу мало отличается от способа, использовавшегося в работе [Evans et al., 2016] (по взвешенным сайтам).

Значительно отличаются также средние полюсы субрегионов Запад и Юго-Запад ( $\gamma/\gamma_{cr} = 11.5^\circ/7.2^\circ$  [McFadden, McElhinny, 1990]). С другой стороны, средние полюсы для регионов Север и Юго-Запад статистически идентичны ( $\gamma/\gamma_{cr} = 4.61^\circ/8.23^\circ$  [McFadden, McElhinny, 1990]). Взятые вместе эти результаты имеют непосредственное отношение к вопросу о выделении двух разнесенных по времени пульсов магматической активности при формировании Куонамской провинции.

Стоит напомнить, что, говоря о пульсах, в данном случае авторы имеют в виду периоды времени, разнесенные между собой примерно на 20 млн лет, как это предполагалось в гипотезе, предложенной в работе [Veselovskiy et al., 2009]. Если палеомагнитные направления для таких пульсов достаточно хорошо осреднены по времени, то соответствующие палеомагнитные полюсы определены с высокой точностью, а скорость движения полюсов (плит) достаточно высока – тогда можно использовать различие палеомагнитных полюсов для решения вопроса о наличии нескольких пульсов магматической активности. Если средние полюсы получены для интервалов времени, недостаточных для осреднения вековых геомагнитных вариаций (т.е. меньших, чем 10–100 тыс. лет (например [Butler, 1998]), то их различие может быть связано именно с этим недостаточным осреднением, а не с различием (в масштабах многих миллионов лет) их возраста. Такие полюсы непригодны для уверенного решения вопроса о наличии нескольких пульсов магматической активности.

Полюсы из субрегиона Юго-Запад и Запад согласно результатам изотопных определений имеют примерно одинаковый возраст около 1500 млн лет, но при этом их средние полюсы значительно различаются. В условиях, когда нет никаких оснований говорить об относительных горизонтальных смещениях названных субрегионов внутри Анабарского поднятия, это является прямым указанием на то, что эти средние полюсы недостаточно осредняют вековые геомагнитные вариации. Эту гипотезу поддерживают результаты математического моделирования, согласно которым силлы мощностью около 40 м (как в данном случае) остывают значительно быстрее, чем это необходимо для осреднения вариаций геомагнитного поля [Metelkin et al., 2019].

Уже это обстоятельство ставит под сомнение возможность использования средних полюсов субрегионов Запад и Север для обоснования гипотезы о существовании двух пульсов при формировании Куонамской провинции. Следующим аргументом против этой



**Рис. 4.** Виртуальные геомагнитные полюсы, полученные по интрузивным телам Анабарского массива: (а) – по отдельным интрузивным телам, (б) – для отдельных субрегионов. 1 – р. Котуйкан (Западный Анабар); 2 – р. Котуй (Юго-Западный Анабар); 3 – р. Фомич (Северный Анабар); 4 – р. Большая Куонамка (Восточный Анабар); 5 – новый палеомагнитный полюс Сибирской платформы ~1500 млн лет.

**Fig. 4.** Virtual geomagnetic poles obtained from the intrusive bodies of the Anabar massif: (a) – for individual intrusive bodies, (b) – for individual subregions. 1 – Kotuikan River (Western Anabar); 2 – Kotuy River (Southwestern Anabar); 3 – Fomich River (Northern Anabar); 4 – Bolshaya Kuonamka River (Eastern Anabar); 5 – paleomagnetic pole of the Siberian platform ~1500 Ma.

гипотезы является совпадение средних полюсов субрегионов Север и Юго-Запад. Оказывается, не все полюсы с возрастом ~1500 млн лет отличаются от полюсов с предположительным возрастом ~1480 млн лет и, таким образом, палеомагнитное обоснование гипотезы о пульсах ~1500 и ~1480 млн лет назад полностью разрушается.

Итогом анализа полученных данных является вывод о том, что на настоящий момент гипотеза двух пульсов не имеет под собой сколько-нибудь серьезных оснований. Если так, то палеомагнитные данные по субрегиону Север могут быть объединены с данными по другим изученным субрегионам для расчета общего палеомагнитного полюса возрастом ~1500 млн лет для Сибирской платформы. Координаты этого полюса показаны в табл. 3.

Поскольку нет оснований для выделения пульса ~1480 млн лет, нет также и оснований для палеомагнитного полюса этого возраста, предложенного в работе [Evans et al., 2016].

Полученные данные не поддерживают существование пульсов ~1500 и ~1480 млн лет назад, однако не означают, что формирование силлов в рассматриваемых субрегионах происходило строго одновременно. Напротив, различие магнитных полярностей палеомагнитных направлений между субрегионами Запад, Юго-Запад и Север, с одной стороны, и различие средних полюсов между субрегионами Запад и Юго-Запад, с другой стороны, определенно указывают на то, что магматическая активность в них протекала неодновременно. Вывод о недостаточном осреднении геомагнитных вековых вариаций в пределах субрегионов

автоматически означает, что длительность магматической активности внутри этих субрегионов не превышала, по всей видимости, 10–100 лет.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные палеомагнитные данные не поддерживают гипотезу о существовании двух магматических пульсов ~1500 и ~1480 млн лет назад при формировании КМП [Veselovskiy et al., 2009].

Северо-Анабарский и Западно-Анабарский полюсы с возрастом  $1483 \pm 17$  млн лет и ~1500 млн лет, предложенные в работе [Evans et al., 2016], следует рассматривать как виртуальные геомагнитные полюсы и избегать их использования для палеотектонических реконструкций.

Осреднение всех (ранее опубликованных и полученных авторами) палеомагнитных данных по КМП позволяет получить наиболее точную (по сравнению с ранее предложенными) оценку положения палеомагнитного полюса для Сибирской платформы ~1500 млн лет назад с координатами  $22.6^\circ$  ю.ш.,  $65.0^\circ$  в.д. и  $A95=4.3^\circ$ .

Длительность магматической активности внутри выделенных субрегионов Север, Запад и Юго-Запад не превышала, по-видимому, 10–100 тыс. лет.

## 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.Б. Кузьмичеву и Д.В. Коваленко за ценные комментарии и советы при подготовке статьи.

## 9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Butler R.F., 1998. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes. Blackwell Scientific Publications, 319 p.

Dunlop D.J., Özdemir Ö., 1997. Rock Magnetism. Fundamentals and Frontiers, Geological Magazine. Cambridge University Press, Cambridge, 596 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>.

Efremov I.V., Veselovskiy R.V., 2023. PMTools: New Application for Paleomagnetic Data Analysis. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 59, 798–805. <https://doi.org/10.1134/S1069351323050026>.

Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D., 2000. Integrated Paleomagnetism and U-Pb

Geochronology of Mafic Dikes of the Eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for Mesoproterozoic Paleolatitude of Siberia and Comparison with Laurentia. *The Journal of Geology* 108 (4), 381–401. <https://doi.org/10.1086/314413>.

Ernst R.E., Okrugin A.V., Veselovskiy R.V., Kamo S.L., Hamilton M.A., Pavlov V., Söderlund U., Chamberlain K.R., Rogers C., 2016. The 1501 Ma Kuonamka Large Igneous Province of Northern Siberia: U-Pb Geochronology, Geochemistry, and Links with Coeval Magmatism on Other Crustal Blocks. *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 653–671. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.015>.

Evans D.A.D., Veselovsky R.V., Petrov P.Yu., Shatsillo A.V., Pavlov V.E., 2016. Paleomagnetism of Mesoproterozoic Margins of the Anabar Shield: A Hypothesized Billion-Year Partnership of Siberia and Northern Laurentia. *Precambrian Research* 281, 639–655. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.017>.

Gapeev A.K., Celmovich V.A., 1986. Microstructure of Natural Heterophase-Oxidized Titanomagnetites. *Physics of the Earth* 4, 100–104 (in Russian) [Гапеев А.К., Цельмович В.А. Микроструктура природных гетерофазно-окисленных титаномagnetитов // Физика Земли. 1986. № 4. С. 100–104].

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Pisarevsky S.A., Ernst R.E., Söderlund U., Kotov A.B., Kovach V.P., Okrugin A.V., 2022. 1.79–1.75 Ga Mafic Magmatism of the Siberian Craton and Late Paleoproterozoic Paleogeography. *Precambrian Research* 370, 106557. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106557>.

Malyshev S.V., Pasenko A.M., Khudoley A.K., Ivanov A.V., Priyatkina N.S., Pazukhina A.A., Marfin A.E., DuFrane S.A., Sharygin I.S., Gladkochub E.A., 2022. What Is the Age of the Udzha Paleorift?: U-Pb Age of Detrital Zircons from Udzha Basin Terrigenous Succession, Northern Siberia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 67 (4), 548–567 (in Russian) [Мальшев С.В., Пасенко А.М., Худолей А.К., Иванов А.В., Прияткина Н.С., Пазухина А.А., Марфин А.Е., Дюфрейн Э.С., Шарыгин И.С., Гладкочуб Е.А. Каков возраст Уджинского палеорифта?: U-Pb возраст обломочных цирконов терригенных пород Уджинского бассейна, север Сибири // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 4. С. 548–567. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.401>.

McFadden P.L., McElhinny M.W., 1990. Classification of the Reversal Test in Palaeomagnetism. *Geophysical Journal International* 103 (3), 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>.

Metelkin D.V., Lavrenchuk A.V., Mikhaltsov N.E., 2019. Could the Norilsk Region Dolerite Sills Have Recorded Geomagnetic Field Reversals? Results of Mathematical Modeling. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 55, 833–840. <https://doi.org/10.1134/S1069351319060041>.

Muxworthy A.R., Dunlop D.J., 2002. First-Order Reversal Curve (FORC) Diagrams for Pseudo-Single-Domain Magnetites at High Temperature. *Earth and Planetary Science Letters* 203 (1), 369–382. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00880-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00880-4).

Muxworthy A.R., Roberts A.P., 2007. First-Order Reversal Curve (FORC) Diagrams. In: D. Gubbins, E. Herrero-Bervera (Eds), *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer, Dordrecht, p. 266–272. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6\\_99](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_99).

Okrugin A.V., Oleinikov B.V., Savvinov V.T., Tomshin M.D., 1990. Late Precambrian Dyke Swarms of the Anabar Massif, Siberian Platform, USSR. In: A.J. Parker, P.C. Rickwood, D.H. Tucker (Eds), *Mafic Dykes and Emplacement Mechanisms*. Proceedings of the Second International Dyke Conference (September 12–16, 1990, Adelaide, South Australia). Balkema, Rotterdam, p. 529–533.

Pasenko A.M., Malyshev S.V., 2020. Paleomagnetism and Age Correlation of the Mesoproterozoic Rocks of the Udzhia and Olenek Uplifts, Northeastern Siberian Platform. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56, 864–887. <https://doi.org/10.1134/S1069351320050067>.

Pasenko A.M., Malyshev S.V., Pazukhina A.A., Savelev A.D., Lipenkov G.V., Chamberlain K.R., 2023 (in press). Age, Composition, and Paleomagnetism of Dolerite – Gabbro Dolerite Intrusions of the Western Slope of the Anabar Massif: The Issue of Vendian Magmatism in the Region. *Doklady Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2360278X>.

Shcherbakov V.P., Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Tselmovich V.A., 2017. Origin of False Components of NRM during Conventional Stepwise Thermal Demagnetization. *Russian Geology and Geophysics* 58 (9), 1118–1128. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.08.008>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2015. Anabaro-Vilyuiskaya Series. Scale 1:1000000. Sheet R-48 (Khatanga). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 398 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Анабаро-Виллюйская. Масштаб 1:1000000. Лист R-48 (Хатанга): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 398 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2016. Anabaro-Vilyuiskaya Series. Scale 1:1000000. Sheet R-49 (Olenyok). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 296 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Анабаро-Виллюйская. Масштаб 1:1000000. Лист R-49 (Оленёк): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 296 с.].

Tauxe L., 2010. *Essentials of Paleomagnetism*. University of California Press, Berkeley, 489 p.

Tomshin M.D., Ernst R.E., Söderlund U., Okrugin A.V., 2023. Kengede Mafic Dyke Swarm and Expansion of the 1.50 Ga Kuonamka Large Igneous Province of Northern Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (4), 0707 (in Russian) [Томшин М.Д., Эрнст Р.Е., Сёдерлунд У., Округин А.В. Кенгединский мафический дайковый рой и расширение Куонамской крупной изверженной провинции (1500 млн лет) Северной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 4. 0707]. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-4-0707>.

Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V., 2022. Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0579 (in Russian) [Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарёв А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0579]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.

Veselovsky R.V., Pavlov V.E., Gallet Y., 2003. Paleomagnetism of Traps in the Podkamennaya Tunguska and Kotui River Valleys: Implications for the Post-Paleozoic Relative Movements of the Siberian and East European Platforms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 39 (10), 856–871.

Veselovskiy R.V., Pavlov V.E., Petrov P.Yu., 2009. New Paleomagnetic Data on the Anabar Uplift and the Uchur-Maya Region and Their Implications for the Paleogeography and Geological Correlation of the Riphean of the Siberian Platform. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45, 545–566. <https://doi.org/10.1134/S1069351309070015>.

Veselovskiy R.V., Pavlov V.E., Petrov P.Yu., Karpenko S.F., Kostitsyn Yu.A., 2006. New Paleomagnetic and Isotopic Data on the Mesoproterozoic Igneous Complex on the Northern Slope of the Anabar Uplift. *Doklady Earth Sciences* 411, 1190–1194. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06080058>.

Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Don-skaya T.V., Konstantinov K.M., Mazukabzov A.M., Stanovich A.M., 2009. Geochronology and Paleomagnetism of Mafic Igneous Rocks in the Olenek Uplift, Northern Siberia: Implications for Mesoproterozoic Supercontinents and Paleogeography. *Precambrian Research* 170 (3–4), 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.01.004>.

Zhmodik S.M., Travin A.V., Yudin D.S., Belyanin D.K., Airiyants E.V., Kiseleva O.N., Moroz T.N., Lazareva E.V., Ivanov P.O., 2022. The Time of Rock Formation in the Talakhtakh Diatreme (Arctic Siberia) According to Laser  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dates. *Doklady Earth Sciences* 502, 7–13. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22020131>.