



PETRO- AND PALEOMAGNETIC STUDIES OF BASALTS OF THE UPPER DEVONIAN APPAINSKAYA SUITE (WESTERN YAKUTIA)

K. M. Konstantinov^{1,2}, M. D. Tomshin³, Sh. Z. Ibragimov⁴, M. Z. Khuzin²,
I. K. Konstantinov², A. A. Yakovlev¹, E. V. Artemova¹

¹ Geo-Scientific Research Enterprise (NIGP) PJSC ALROSA, Mirny, Russia

² Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

³ Institute of Diamond and Precious Metals Geology, Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia

⁴ Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract: Introduction. One of the main tasks of paleomagnetic studies is to obtain a framework of reference poles for calculating the kinematic characteristics of lithospheric taxones as a basis for geodynamic reconstructions. Each paleomagnetic reference point must have a precise (± 10 Ma) geochronological dating and a maximum paleomagnetic reliability index. A correct paleomagnetic pole (PMP) can be obtained from the data of geochronological and paleomagnetic studies conducted in one and the same geological object, such as a suite, an intrusive complex etc. In the Yakutian diamondiferous province (YDP), such objects include basalt nappes of the Upper Devonian Appainskaya suite, which stratigraphic position is undoubted (Fran, 385–375 Ma).

Geological setting (in brief). In the eastern segments of the Siberian platform, a powerful cycle of tectonic and magmatic activity in the Middle Paleozoic produced transgressive and sheet intrusions, volcanic pipes, lava and tuff formations comprised of basites, as well as all the currently known industrial diamondiferous kimberlite bodies. Magmatic activity of basites was associated with formation of paleorift systems, including the largest one, Viluyi paleorift (Fig. 1). In the Middle Paleozoic, the geodynamic setting for magmatism and rifting was determined by the plume-lithosphere interaction. The rise of the plume's matter underneath the thinned lithosphere was accompanied by decompression melting and formation of basaltic magmas in large volumes.

We have studied basalts of the Appainskaya suite which were sampled from the Ygyatta and Markha river valleys (Fig. 2). In the coastal outcrops at the Ygyatta river, two nappes are observed, a (stratigraphically) lower outcrop 17÷23/10 containing plagiophyre palagonite basalts (upper five meters are outcropped), and an upper outcrop 16/10 containing olivinophyric palagonite basalts (upper three meters are outcropped). In the coastal outcrops of the Markha river, from the Enerdek loop to the M. Dyukteli river (outcrop 16÷20/14), only plagiophyric basalts of the lower nappe are developed. At this location, the total capacity of the basalts can reach 35–40 m. In view of the fact that the basalts lie subhorizontally at angles up to 5° (outcrop 17/14, Fig. 3), oriented samples were taken in the modern system of coordinates.

Formational features of the chemical composition typical of the Middle Paleozoic intrusive basites (higher contents of Ti, Fe and K) are less clear in derivatives of the effusive facies. By their chemical composition, the basalts are normal alkalinity rocks (the sum of alkali not higher than 3.05 %; SiO₂=48.1–49.7 %; rather moderate content of TiO₂=1.9–2.5 %) (Fig. 4 A, B). The amount of magnesia (Mg#) ranges from 46 to 56. The main carriers of natural remanent magnetization (NRM, In) are titanomagnetites that belong to titanomagnetite and hemo-ilmenite series (Fig. 4).

Research. Our research was conducted in specialized laboratories using modern equipment and facilities of Geo-Scientific Research Enterprise (NIGP) PJSC ALROSA (Mirny), Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk), Kazan Federal University (Kazan) and Institute of Geology of Diamond and Precious Metals SB RAS (Yakutsk).

Research results. By magnetic (scalar and vector) parameters, basalts of the Appainskaya suite are characterized by the bimodal distribution of magnetic susceptibility values, NRM and α : geometric means are $810 \cdot 10^{-5}$ SI-units and $225 \cdot 10^{-3}$ A/m, respectively, at the Ygyatta river, and $1470 \cdot 10^{-5}$ SI-units and $490 \cdot 10^{-3}$ A/m, respectively, at the Markha river (Table 1, Fig. 5). Factor Q is below 1. Results of the petrophysical observations are consistent with the geological materials and suggest that the basalts at the Ygyatta river occupy the upper stratigraphic horizon.

The studied outcrops of basalts of the Appainskaya suite have the following characteristic components of \mathbf{In}^{ch} :

1. Component A – negative vectors of the characteristic NRM are clustered in the fourth sector of the stereogram (sample Igy179m1, Fig. 10, Fig. 14 A, Table 2). Found in outcrop 16/10. Component A is metachronous \mathbf{In}^{m} that formed due to heating of basalts by dolerites of the Ygyatta sill, which suggests the dyke-type of the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) (Fig. 6 C) and a high oxidation level of titanomagnetites (sample 179, Fig. 8).

2. Component *B* – steep positive vectors of the characteristic \mathbf{In}^{ch} (samples Igy224m2, Mrh142m2 and Mrh176t2, Fig. 10, Fig. 14 A, Table. 2). Found in outcrops 20/10 and 16÷18/14. Component *B* is typical of the outcrops with significant deviations of the axes of the AMS ellipse (Fig. 6 D, E), which suggests epigenetic changes in the basalts. New occurrences of titanomaghemites are observed in the studied outcrops (sample 228, Fig. 8), which leads to an almost complete destruction of vector \mathbf{In}^0 and formation of viscous NRM – \mathbf{In}^{v} , which are oriented in the direction similar to the geomagnetic field. This conclusion is supported by the ‘artificial magnetization reversal’ tests (Fig. 11 A).

3. Component *C* – negative vectors of the characteristic NRM are clustered in the first sector of the stereogram at angles varying from -50 to -40° (Fig. 12, Fig. 14, Table 2). Found in four outcrops at the Ygyatta river (outcrops 17/10, and 21÷23/10).

4. Component *D* – positive vectors of the characteristic NRM are clustered in the third sector of the stereogram at angles varying from 40 to 50° (Fig. 13, Fig. 14, Table 2). Found in four outcrops at the Markha river (outcrops 20A, 20B, and 20C/14).

The primary origin of characteristic components *C* and *D* of the basalts is determined as follows:

- The ‘sedimentary’ type of AMS (Fig. 6 E, and Fig. 6 F);
- According to the differential thermomagnetic analysis (DTMA), the mineral carrier of magnetization is virtually unaltered titanomagnetite with the Curie point of $\approx 550^\circ\text{C}$ (samples 254 and 204, Fig. 8);
- The presence of samples with negative NRM vectors (Table 1);
- The magnetically stable state of the components is confirmed by high values of hysteresis parameters (Fig. 7) and the ‘artificial magnetization reversal’ experiment (Fig. 11 B).
- The positive inversion test (Table 3, Fig. 14 B, and Fig. 14 C): $\gamma/\gamma_c=5.1/6.2$ at the sample level, and $\gamma/\gamma_c=8.7/16.2$ at the site level.

Discussion. Data on 12 sites and previously published values were used to calculate the reference paleomagnetic pole (PMP) (Fran) (Table 5, Fig. 15, A). The PMP coordinates are as follows: latitude $\phi=1.7^\circ$, longitude $\lambda=92.8^\circ$, and confidence intervals $dp/dm=3.7/5.9^\circ$. The PMP’s paleomagnetic reliability index is high enough, and the PMP can be thus considered as a reference for the Frasnian period (370 ± 5 Ma). On this basis, taking into account the previous paleomagnetic data, paleomagnetic reconstructions of the Siberian platform, ranging from 420 up to 325 Ma, are obtained in our study (Fig. 15, B). In the above-mentioned period of time, the Siberian platform gradually moved in one direction, mostly latitudinal, from 11° to 25° N. After the Appainskaya time, the latitudinal movement was replaced by motions in the predominantly meridional eastward direction, and the average displacement velocity in these segments increased from 4.4 to 6.7 cm/year. It is possible that after the formation of the Appainskaya suite (Fran), the Siberian platform could pass the three hot spots representing the modern Atlantic islands near the northwestern coast of Africa (Canary, Madeira and Azores, i.e. the northern flank of the African superplume). These hotspots might have formed the tracks (Fig. 15) that controlled the intrusion of alkaline ultrabasic melts and formation of kimberlites in the Late Devon – Early Carbon.

Conclusion. In the lower stream composed of the palagonite plagiophyre basalts of the Appainskaya suite, the paleomagnetic studies reveal two primary components of the NRM vectors, from bottom to top, *D* and *C*, respectively, with the direct and reverse polarity. Their presence in the basalts is marked by the ‘sedimentary’ type of AMS, practically un-oxidized titanomagnetites, and the positive inversion test.

The reference PMP for the basalts of the Appainskaya suite, which is determined in our studies, provides for a more precise definition of the paleogeographic position and reconstruction of the drift of the Siberian platform in the Middle Paleozoic (from 420 to 325 Ma) and makes it possible to associate this drift with probable energy sources (i.e. hot spots), which might have been related to the intrusion of kimberlites.

Key words: Siberian platform; Vilyui paleorift system; Ygyatta depression; Middle Paleozoic; Fran; Appainskaya suite; basalts; paleomagnetism

Recommended by S.A. Pisarevsky

For citation: Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Ibragimov Sh.Z., Khuzin M.Z., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Artemova E.V. 2016. Petro- and paleomagnetic studies of basalts of the Upper Devonian Appainskaya suite (Western Yakutia). *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (4), 593–623. doi:10.5800/GT-2016-7-4-0224.

Для цитирования: Константинов К.М., Томшин М.Д., Ибрагимов Ш.З., Хузин М.З., Константинов И.К., Яковлев А.А., Артемова Е.В. Петро- и палеомагнитные исследования базальтов аппайнской свиты верхнего девона (Западная Якутия) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 4. С. 593–623. doi:10.5800/GT-2016-7-4-0224.

ПЕТРО- И ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВ АППАИНСКОЙ СВИТЫ ВЕРХНЕГО ДЕВОНА (ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

К. М. Константинов^{1,2}, М. Д. Томшин³, Ш. З. Ибрагимов⁴, М. З. Хузин²,
И. К. Константинов², А. А. Яковлев¹, Е. В. Артемова¹

¹ АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

⁴ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация: Проведены петро- и палеомагнитные исследования базальтов Ыгыаттинской впадины Вилюйской палеорифтовой системы, распространенных в долинах рек Марха и Ыгыатта. Базальты участвуют в сложении аппаинской свиты Дзар франского времени (385–375 млн лет), формируя два разноуровневых потока: нижний – плагиофировый палагонитовый и верхний – оливинофировый. Базальты обладают векторами естественной остаточной намагниченности (ЕОН) разной природы: вязкой, метахронной и первичной. Их носителем является титаномагнетит, испытавший окисление разной степени, вплоть до титаномаггемитов. Присутствие первичной компоненты ЕОН доказано для большинства обнажений по комплексу геолого-геофизических признаков. На основе полученных и опубликованных данных рассчитан реперный палеомагнитный полюс для франского времени с координатами: широта $\varphi=1.7^\circ$, долгота $\lambda=92.8^\circ$ и доверительными интервалами $dp/dm=3.7/5.9^\circ$, который может использоваться для решения разных задач стратиграфии, геохронологии, металлогении, геодинамики и пр. Выполненные палеомагнитные реконструкции предполагают, что в конце позднего девона – начале раннего карбона (375–345 млн лет) Сибирская платформа могла пройти над мантийными плюмами, которые вызвали внедрение щелочно-ультраосновных расплавов и формирование кимберлитов.

Ключевые слова: Сибирская платформа; Вилюйская палеорифтовая система; Ыгыаттинская впадина; средний палеозой; фран; аппаинская свита; базальты; палеомагнетизм

1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач палеомагнитных исследований заключается в получении системы реперных полюсов с целью расчета кинематических характеристик литосферных плит для построения геодинамических реконструкций. Палеомагнитному реперу должны соответствовать точная (± 10 млн лет) геохронологическая привязка и максимальный индекс палеомагнитной надежности (ИПН) [Van der Voo, 1993; Pechersky, Didenko, 1995]. Для получения корректного палеомагнитного полюса (ПМП) необходимо, чтобы данные геохронологических и палеомагнитных исследований отвечали одному и тому же геологическому объекту (свите, интрузивному комплексу и т.п.).

В настоящее время собран ряд палеомагнитных определений по среднепалеозойским базитам (дайкам, силлам, покровам) Якутской алмазоносной провинции (ЯАП), удовлетворяющих современным требованиям [Kravchinsky et al., 2002; Konstantinov, 2006, 2014; Konstantinov et al., 2007, 2016; Konstantinov, Stegnitskii, 2012; Orlov, Shatsillo, 2011]. Однако

для них отсутствует прецизионная геохронология, что делает невозможной разработку валидной геодинамической модели развития Восточной Сибири.

Согласно палеомагнитным реконструкциям [Khramov, 1991; Pechersky, Didenko, 1995; Kuzmin et al., 2010], дрейф Сибирской платформы в среднем палеозое интерпретируется неоднозначно. Так, например, по [Kuzmin et al., 2010], формирование среднепалеозойских кимберлитов и траппов связано с прохождением Сибирской платформы над Африканским суперплюмом, а точнее на северном его фланге. С другой стороны, согласно [Khramov, 1991; Pechersky, Didenko, 1995], Сибирская платформа в среднем палеозое огибала Африканский суперплюм с запада и прошла над ним только в конце девона – начале карбона. Очевидно, что неоднозначность геодинамических моделей predeterminedена недостаточностью надежных палеомагнитных данных по среднепалеозойскому интервалу траектории кажущейся миграции полюса (ТКМП) Сибирской платформы. В этой связи получение реперных ПМП по датированным геологическим образованиям с целью детализации среднепалеозой-

ского интервала ТКМП Сибири является весьма актуальным.

В ЯАП к таким объектам можно отнести покровы базальтов аппаинской свиты верхнего девона D_3ap , стратиграфическое положение которых не вызывает сомнения (фран, 385–375 млн лет). Проведенные палеомагнитные исследования Г.Г. Камышевой в начале 70-х годов прошлого века [Khratov, 1973, 1975] свидетельствуют о высокой перспективности базальтов в решении поставленных задач.

2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

В восточных регионах Сибирской платформы в среднем палеозое проявился мощный цикл тектономагматической активизации, благодаря которому сформировались секущие и пластовые интрузии, трубки взрыва, лавовые и туфовые образования базитового состава, а также все промышленно-алмазоносные кимберлитовые тела. Базитовая магматическая деятельность была связана с формированием палеорифтовых систем. Наиболее крупной из них является Вилюйская (рис. 1). Геодинамическая обстановка среднепалеозойского магматизма и рифтогенеза определялась плюм-литосферным взаимодействием [Tomshin, 2000; Kiselev et al., 2014]. Подъем вещества плюма под утоненную литосферу сопровождался декомпрессионным плавлением и образованием больших объемов базальтовых магм. По результатам палеомагнитных исследований [Gurevich, 1984; Pavlov et al., 2008; Konstantinov et al., 2011] предполагается, что раскрытие Вилюйского палеоавлакогена связано с вращением Алданского геоблока относительно Анабаро-Ангарского по часовой стрелке на 20–25° вокруг эйлеровского полюса, расположенного к юго-западу от Вилюйского бассейна в тыловой области Байкало-Патомского складчатого пояса. Такое вращение могло привести к неоднородному растяжению коры и образованию депрессий с утонением коры в 1.5–2.0 раза. В результате этого в пределах Вилюйской палеорифтовой системы (ВПС) формировалась серия грабенообразных прогибов (в частности, Ыгыаттинская и Кемпендяйская впадины) и продольных поднятий, таких как Сунтарское, разделяющее Ыгыаттинскую и Кемпендяйскую впадины [Chumakov, 1959]. Большинство среднепалеозойских структур ВПС перекрыто более молодыми образованиями. В центральных и юго-восточных частях это многокилометровые (до 6 км) отложения среднего карбона – мела, а на западе – мощные силлы пермотриасовых траппов [Parfenov, Kuzmin, 2001].

На северо-западном и юго-восточном плечах ВПС находятся два мощных дайковых пояса (рис. 1): Ви-

люйско-Мархинский и Чаро-Синский, контролируемые зонами глубинных разломов [Tomshin, 2000]. Вилюйско-Мархинский дайковый пояс (ВМДП) протянулся на 700 км в северо-восточном направлении и имеет ширину 30 км на юге и более 100 км на севере. Не менее мощным является и Чаро-Синский пояс даек. На юго-западном окончании ВПС в ее центриклинальном замыкании выделяется Контайско-Джербинское рассеянное поле даек северо-восточного простираения. С дайковыми поясами в основном связана интрузивная фация базитов. Последняя проявлена в форме даек, силлов, хонолитов, интродуцированных в карбонатные и глинисто-карбонатные отложения кембрия, ордовика и, реже, силура. Мощность даек изменяется от 6–8 до 80 м, протяженность достигает первых десятков километров. Максимально установленная мощность силлов 50–60 м. В южной части ЯАП были выявлены базитовые трубки взрыва. Интрузивы характеризуются слабо проявленными процессами внутрикамерной дифференциации, и, как правило, в конкретном теле присутствует одна разность пород, чаще всего представленная призматическо-офитовыми габбро-долеритами.

Лавовые образования тяготеют к рифтовым впадинам (рис. 1), где они фиксируются по бортам последних в виде коренных выходов в береговых обнажениях крупных водотоков (реки Вилюй, Марха, Ыгыатта) либо вскрываются скважинами в центральных частях впадин. Можно предположить, что первоначально лавы имели более широкое распространение, поскольку в кимберлитовых трубках Малоботуобинского района установлены ксенолиты базальтов аппаинской свиты франского времени [Tomshin et al., 1973], которые в настоящее время здесь отсутствуют. Базальты занимают разное стратиграфическое положение в отложениях верхнего девона – нижнего карбона (аппаинская свита и низы эмяксинской свиты), а располагающаяся между ними вилюйчанская свита (D_3vl) базальтов не содержит [Kolodezchnikov, 1982; Gaiduk, 1988].

В южной части ВМДП (долины рек Ыгыатта, Холмолох, Дзюктели и среднее течение р. Вилюй) наблюдается пространственное совмещение среднепалеозойских базитов с пермотриасовыми траппами (рис. 2, А). Широко распространенные здесь силлы пермотриасовых траппов (рис. 3, обн. 8/10) мощным плащом практически полностью перекрывают среднепалеозойские дайки. Это затрудняет исследование последних и возможно лишь по их эпизодическим выходам в долинах крупных рек (рис. 3, обн. 9/10).

Выполненное в последние годы [Mashchak, Naumov, 2004; Tomshin et al., 2004, 2015; Courtillot et al., 2010; Powerman et al., 2013; Ricci et al., 2013; Kiselev et al., 2014; и др.] изотопное (K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd

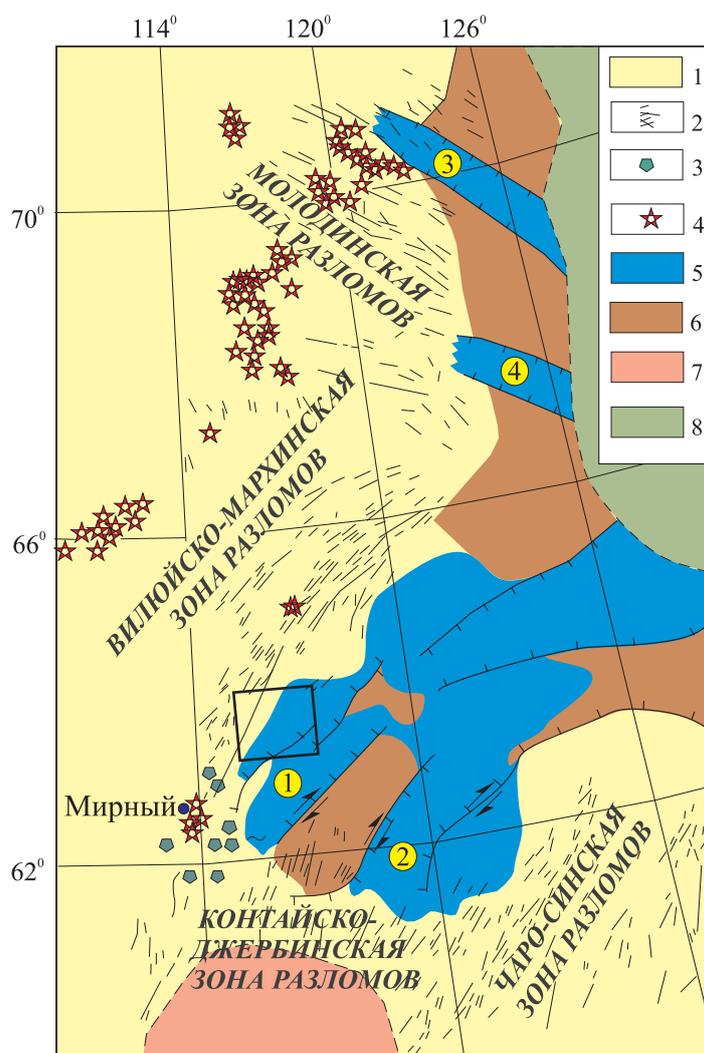


Рис. 1. Зона динамического влияния Вилюйской палеорифтовой системы Сибирской платформы по [Tomshin, 2000] с некоторыми изменениями.

Среднепалеозойский структурный ярус: 1 – осадочный чехол Сибирской платформы; 2 – дайковые пояса долеритов; 3 – базитовые трубки; 4 – кимберлитовые трубки; 5 – вулканогенно-осадочные образования в рифтах; 6 – сводовые поднятия, сопряженные с рифтами; 7 – Байкальская складчатая область; 8 – Верхояно-Колымская складчатая область. Цифры в кружках – основные структуры Вилюйской палеорифтовой системы: 1, 2 – Ыгыаттинская и Кемпендяйская впадины, 3, 4 – Кютюндинский и Соболевский рифты. Прямоугольник – площадь работ.

Fig. 1. The zone of dynamic influence of the Vilyuy paleorift systems of the Siberian platform [Tomshin, 2000] (the scheme is slightly modified).

The Middle Paleozoic structural stage: 1 – sedimentary cover of the Siberian platform; 2 – dyke belts of dolerites; 3 – basite pipes; 4 – kimberlite pipes; 5 – volcanic-sedimentary formations in rifts; 6 – arched uplifts associated with rifts; 7 – Baikalskaya folded region; 8 – Verkhoyansk-Kolyma folded region. Numbers in circles – main structures of the Vilyuy paleorift system: 1, 2 – Ygyatta and Kempendyai depressions, 3 – Kyutyungda rift; 4 – Sobolevsky rift. Box – study area.

и U-Pb) датирование долеритов ВПС указывает на то, что их внедрение укладывается в основном в возрастные рубежи 380–362 млн лет. По базальтам аппаинской и эмяксинской свит р. Вилюй имеются два прецизионных определения изотопного возраста – 366 и 368 млн лет [Ricci et al., 2013], что соответствует фанену (граница девона – карбона).

Для проводимых исследований выбраны базальты аппаинской свиты, расположенные в доли-

нах рек Ыгыатта и Марха (см. рис. 2). В береговых обнажениях р. Ыгыатта вскрываются два покрова: нижний (стратиграфически) – обн. 17–23/10, выполненный плагиофировыми палагонитовыми базальтами (обнажены верхние 5 м), и верхний – обн. 16/10, выполненный оливинофировыми палагонитовыми базальтами (вскрыты верхние 3 м). В береговых обнажениях р. Марха на отрезке от Энердекской петли до р. М. Дьюктели (обн. 16–20/14)

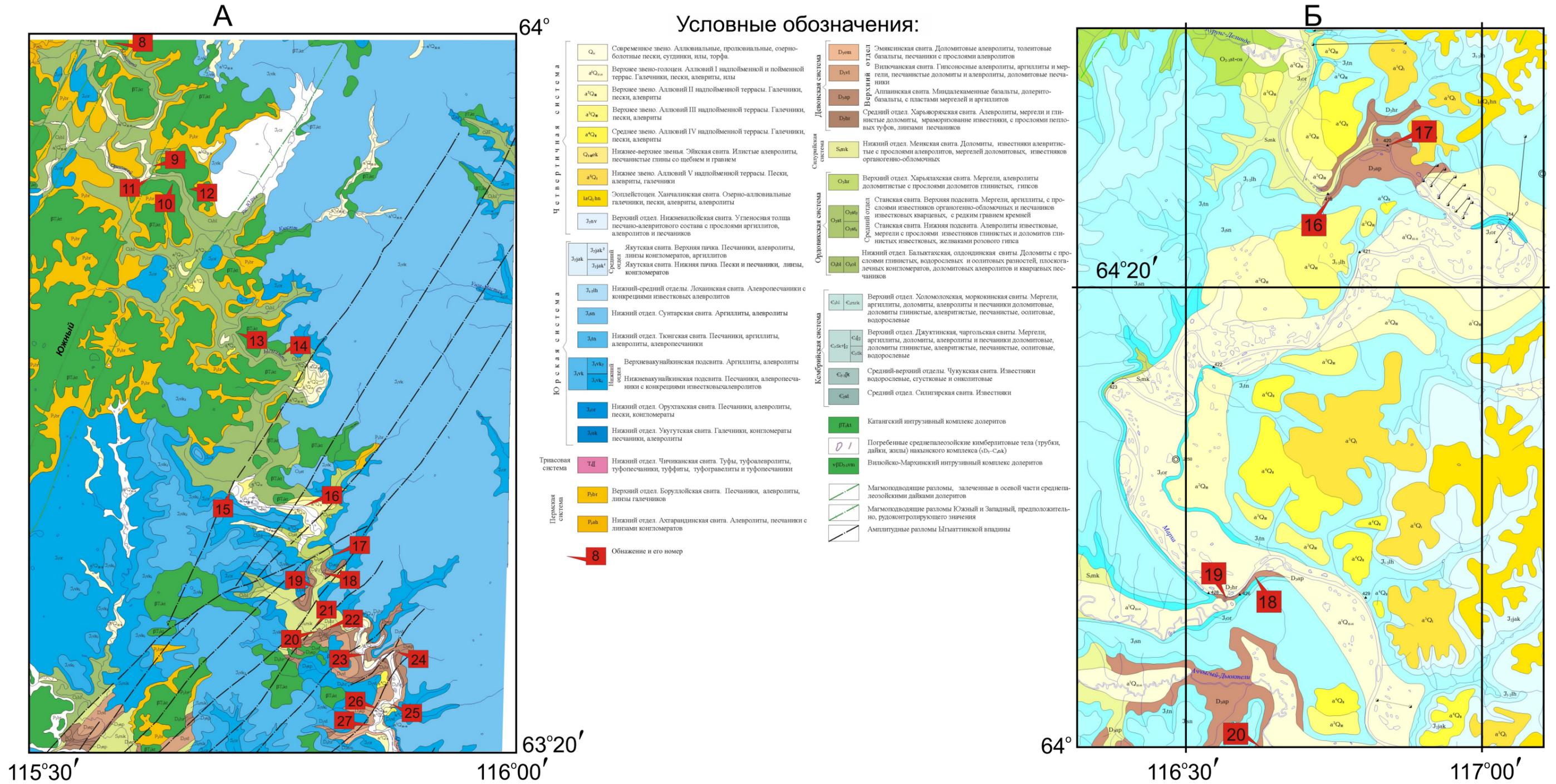


Рис. 2. Схемы расположения изученных обнажений рек Ыгыатта (А) и Марха (Б).

Рис. 2. Schemes showing locations of the studied outcrops at the Ygyatta (A) and Markha (B) rivers.



Рис. 3. Объекты палеомагнитных исследований (привязку см. на рис. 2).

Обн. 8/10, левый берег р. Ыгыатта – силл долеритов катангского (?) интрузивного комплекса (Ыгыаттинская интрузия). Обн. 9/10, район устья р. Еркютей (правый приток р. Ыгыатта) – дайка долеритов вилуйско-мархинского интрузивного комплекса, контролируемая разломом «Южный». Обн. 17/14, левый берег р. Марха – нижний субгоризонтальный контакт (подошва) базальтов аппаинской свиты и алевроитопесчаников харьяюряхской свиты. Обн. 20А, В/14, строительный карьер на правом берегу р. Марха, в 2 км ниже устья ее правого притока р. Аччыгый-Дьюктели – вскрываются слабоветрелые базальты аппаинской свиты. Обн. 24/10 – коренной выход алевроитопесчаников аппаинской свиты. Обн. 5/16 – коренной выход базальтов аппаинской свиты в стратотипическом обнажении.

Fig. 3. Objects of the paleomagnetic studies (see locations in Fig. 2).

Outcrop 8/10, the left bank of the Ygyatta river – dolerite sill of the Katanga (?) intrusive complex (Ygyatta intrusion). Outcrop 9/10, near the Erkyutei river mouth (the right tributary of the Ygyatta river) – dolerite dyke of the Vilyui-Markha intrusive complex controlled by the Southern fault. Outcrop 17/14, the left bank of the Markha river – the lower subhorizontal contact (sole) of the basalts of the Appainskaya suite and aleurite-sandstones of the Kharyayuryakh suite. Outcrop 20A, B/14, the quarry on the right bank of the Markha river, 2 km below the mouth of its right tributary Achchygy-Dyukteli – outcropped poorly weathered basalts of the Appainskaya suite. Site 24/10 – the basic rock outcrop of aleurite-sandstones of the Appainskaya suite. Site 5/16 – the basic rock outcrop of the basalts of the Appainskaya suite in the stratotype outcrop.

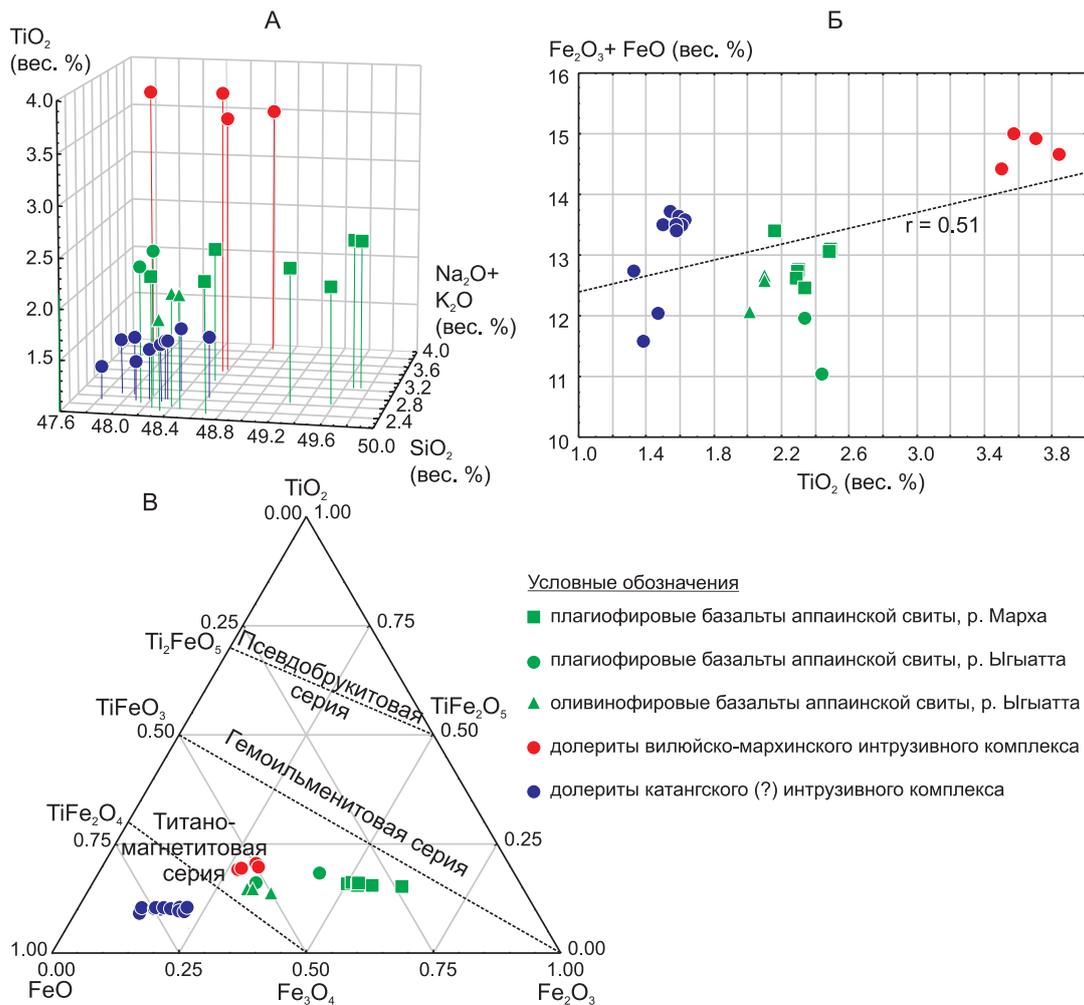


Рис. 4. Сравнительный химический состав базитов рек Ыгыатта и Марха. А – тройная диаграмма $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$; Б – график зависимости $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO} - \text{TiO}_2$, где r – коэффициент корреляции; В – тернарный график по [Akimoto, 1962].

Fig. 4. Comparison of chemical compositions of basites sampled from sites at the Ygyatta and Markha rivers. А – ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$; Б – plot of $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO} - \text{TiO}_2$, where r is the correlation coefficient; В – ternary curve from [Akimoto, 1962].

развиты только плагиофировые базальты нижнего покрова. Суммарная мощность базальтов (по обнажениям) здесь может достигать 35–40 м. Отличительной чертой обеих разновидностей рассматриваемых базальтов является постоянное присутствие в них значительного количества палагонитового вещества. Максимальное его количество (до 27 %) установлено в кровлевых и подошвенных зонах покровов, а в центральных их не более 7–8 %. Палагонитовое вещество образует самостоятельные сферические и эллипсоидные выделения, выполняет интерстиционное пространство, заполняет трещинки, замещает оливин и вулканическое стекло. Установлено, что палагонитовый агрегат формировался на всем протяжении становления покрова. Палагонит чаще всего окрашен в светло-зеленый цвет, но нередко имеет желтую, желто-бурую и да-

же оранжево-красную расцветку. Палагонитовый агрегат образует совместный с базальтовым стеклом хлорит, нонтронит. Проведенные Б.В. Олейниковым исследования базальтов Ыгыаттинской впадины показали, что образование палагонитового вещества связано с взаимодействием базальтового расплава с морской водой [Oleinikov, 1973].

Формационные признаки химического состава, характерные для среднепалеозойских интрузивных базитов (повышенные содержания титана, железа, калия), в производных эффузивной фации выражены менее отчетливо. По химическому составу базальты отвечают породам нормальной щелочности с суммой щелочей, не превышающей 3.05 %, с содержанием $\text{SiO}_2=48.1-49.7$ % и довольно умеренным содержанием $\text{TiO}_2=1.9-2.5$ % (рис. 4, А, Б). Магнезиальность варьируется в диапазоне $\text{Mg}\#=46-56$.

По классификации [Akimoto, 1962] титаномагнетиты (основные минералы-носители намагниченности базальтов) относятся к титаномагнетитовой и гемоильменитовой сериям (рис. 4, В).

Гипостратотип аппаинской свиты (D_{3ap}) выделен В.Л. Масайтисом и М.В. Михайловым в 1966 г. в бассейне р. Аппая (см. рис. 3, обн. 5/16) – правый приток р. Вилюй [Masaitis, Mikhailov, 1968]. По результатам колонкового бурения в разрезе свиты выделяются два горизонта базальтов, разделенных прослоем глинистых пород (зеленовато-красных тонкоплитчатых мергелей и аргиллитов) [Giniyatullin et al., 1989]. Мощность аппаинской свиты может меняться от 40 до 80 м. Установлено, что базальты аппаинской свиты с размывом залегают на терригенных образованиях харьяюряхской свиты (D_{2hr}) среднего девона [Kolodeznikov, 1982]. Нами такое взаимоотношение зафиксировано в обн. 17/14 р. Марха (см. рис. 3). Собственных палеонтологических находок в аппаинской свите не установлено, но в перекрывающей ее с размывом (?) пестроцветными образованиями вилючанской свите (D_{2vl}) известны находки верхнедевонской ихтиофауны *Bothriolepis*, комплекс миоспор *Lophozonotriletes tylophorus Naum.* и *Archaeozonotrileres oiparus Naum.*, характерных для франского и фаменского ярусов, поэтому относящиеся к аппаинской свите базальты взяты как реперные для проведения палеомагнитных исследований с целью получения палеомагнитных направлений франа.

3. МЕТОДИКА РАБОТ

Отбор ориентированных образцов проведен из коренных береговых обнажений рек Ыгыатта и Марха (см. рис. 2). Два из них (см. рис. 3, обн. 20А, 20В/14) находятся в строительном карьере, где вскрываются слабовыветрелые базальты. Ввиду того, что базальты залегают субгоризонтально с углами наклона до 5° (см. рис. 3, обн. 17/14), отбор ориентированных образцов проводился в современной системе координат (ССК) [Khramov et al., 1982], с постоянным контролем магнитного склонения. Всего отобрано более 120 ориентированных штуфов, из которых выпиливались по 2–3 кубика с ребром 20 мм.

Петрографические и петрохимические исследования базитов выполнены в ИГАБМ СО РАН (г. Якутск) и ИЗК СО РАН (г. Иркутск). При изучении вещественного состава использовались традиционные петрографические и геохимические методы исследования. Минеральный состав пород определялся на микрозонде Camebax-micro и сканирующем микроскопе JSM-6480LM.

Экспериментальные петромагнитные исследования проводились в специализированных лабора-

ториях НИГП «АЛРОСА» ПАО (г. Мирный), ИЗК СО РАН (г. Иркутск) и Казанского федерального университета (г. Казань), использующих современную аппаратуру и оборудование: измерители магнитной восприимчивости (MFK1-FA, ф. AGICO, Чехия), спин-магнитометры (JR-5а и JR-6, ф. AGICO, Чехия), установки, размагничивающие переменным магнитным полем (AF-Demagnetizer, ф. Molspin LTD, Великобритания; LDA-5, ф. AGICO, Чехия) и температурой (MMTD80A, ф. Magnetic Measurements LTD, Великобритания), вибромагнитометры и измерители магнитной фракции (г. КФУ, РФ) и др.

При проведении исследований учитывались отечественные и зарубежные методические разработки по графической и аналитической реализации решений петро- и палеомагнитных задач с использованием компьютерных программ Statistica-6 [Borovikov, 2001], Opal-3 [Vinarsky et al., 1987], Enkin-96 [Enkin, 1994] и Anisoft-42 [Jelínek, 1997].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрофизические исследования. Базальты аппаинской свиты, независимо от изученных участков, характеризуются достаточно близкими средними значениями объемной плотности σ : р. Ыгыатта – 2883 ± 7 кг/м³ и р. Марха – 2890 ± 4 кг/м³ (табл. 1). Однако по магнитным параметрам изученные базальты существенно отличаются друг от друга (рис. 5). Например, базальты р. Ыгыатта (независимо от петрографических разновидностей) относительно менее магнитные по сравнению с плагиофировыми базальтами р. Марха: средние геометрические значения магнитной восприимчивости α и естественной остаточной намагниченности (ЕОН) I_n в первых составляют соответственно $810 \cdot 10^{-5}$ СИ и $225 \cdot 10^{-3}$ А/м, в то время как вторых – $1470 \cdot 10^{-5}$ СИ и $490 \cdot 10^{-3}$ А/м. Коэффициенты Кенигсбергера базальтов р. Марха немного выше ($Q=0.66$), чем у базальтов р. Ыгыатта ($Q=0.58$), но в целом они удовлетворяют среднестатистическому значению среднепалеозойских базитов ЯАП, которое, как правило, не превышает 1 [Konstantinov, 2014]. Образцы на глубине (см. рис. 3) меньше подвергались воздействию экзогенных процессов, что делает их более благоприятными для палеомагнитных исследований: так, в забое карьера (обн. 20А/14) фактор $Q=1.26$, на верхнем горизонте (обн. 20В/14) – 0.62, а на дневной поверхности (береговое обнажение 20С/14) – 0.47. Есть еще одно различие между рассматриваемыми базальтами – на участке р. Ыгыатта встречены обнажения (17/10 и 23/10) с отрицательно намагниченными векторами I_n , в то время как в большинстве обнажений они положительные. Для обнаже-

Т а б л и ц а 1. Спектр петрофизических параметров базальтов аппайнской свиты D_3ap в «естественном залегании»Table 1. The range of petrophysical parameters of basalts, Appainskaya suite (D_3ap), in situ

№ пп	№ обнажения	Координаты		N	σ (s), кг/м ³	n	ε (ε) 10 ⁻⁵ СИ	In				Q (ε) ед.
		φ, °	λ, °					In (ε) 10 ⁻³ А/м	Dcp°	Jcp°	k, ед./α ₉₅ °	
р. Ыгыатта, 2010 г. (H=61300 нТл, D=349°, J=79.6°)												
1	16	63.570	115.524	8	2862 (10)	16	925 (1.04)	190 (1.07)	348	30	22.8/7.9	0.42 (1.08)
2	17	63.527	115.645	11	2898 (7)	30	555 (1.02)	185 (1.03)	17	-22	22.9/5.6	0.69 (1.04)
3	20	63.459	115.617	9	2812 (10)	29	1010 (1.02)	275 (1.04)	341	61	29.5/5.0	0.57 (1.03)
4	21	63.462	115.626	11	2914 (11)	36	950 (1.12)	235 (1.11)	358	38	3.9/14.1	0.51 (1.08)
5	22	63.460	115.628	5	2907 (17)	19	780 (1.03)	155 (1.07)	356	14	6.5/14.2	0.42 (1.07)
6	23	63.437	115.714	6	2914 (7)	21	725 (1.05)	350 (1.18)	14	-13	7.8/17.2	1.00 (1.14)
Сводное				50	2883 (7)	151	810 (1.03)	225 (1.04)	2	20	3.9/6.8	0.58 (1.04)
р. Марха, 2014 г. (H=61025 нТл, D=347.5°, J=80.4°)												
7	16	64.396	116.739	18	2877 (8)	36	2025 (1.06)	490 (1.05)	330	61	15.3/6.3	0.49 (1.09)
8	17	64.431	116.851	11	2913 (5)	21	1335 (1.03)	605 (1.07)	335	59	27.1/6.2	0.93 (1.07)
9	18	64.117	116.7	20	2885 (7)	45	1375 (1.05)	485 (1.05)	330	61	12.8/6.2	0.72 (1.04)
10	20A			8	2909 (7)	17	1500 (1.02)	930 (1.07)	203	48	35.3/6.1	1.26 (1.06)
11	20B	63.979	116.613	8	2853 (16)	20	1605 (1.05)	490 (1.10)	272	59	9.3/11.3	0.62 (1.06)
12	20C			9	2919 (4)	19	935 (1.04)	215 (1.06)	303	78	15.5/8.8	0.47 (1.04)
Сводное				74	2890 (4)	158	1470 (1.03)	490 (1.04)	311	68	8.0/4.2	0.66 (1.04)
				124		309						

П р и м е ч а н и е. N и n – количество, соответственно, штучков и выпиленных их них кубиков; σ – среднее арифметическое значение объемной плотности; ε , In и Q – средние геомагнитические значения, соответственно, магнитной восприимчивости, EOH и коэффициента Кенигсбергера. Характеристики магнитного поля Земли в районе работ на период отбора проб [Macmillan et al., 2003]: H – модуль вектора напряженности, D и J – соответственно, склонение и наклонение вектора H, s/ε – ошибка среднего арифметического/геометрического, Dcp – среднее склонение, Jcp – среднее наклонение, k – кучность, α_{95} – угол доверия с вероятностью 95 % векторов In [Fisher, 1953].

Н о т е. N and n – number of hand specimens and sawed-out rock cubes, respectively; σ – arithmetic mean of volumetric density; ε , In and Q – geometric mean of magnetic susceptibility, NRM and Koenigsberger factor, respectively. Characteristics of the Earth's magnetic field in the study area through the sampling period [Macmillan et al., 2003]: H – module of stress vector, D and J – declination and inclination of vector H, respectively, s/ε – error of arithmetic/geometric mean, Dcp – declination mean, Jcp – inclination mean, k – clustering, α_{95} – 95% confidence angle of vectors In [Fisher, 1953].

ний с отрицательными векторами EOH также характерны повышенные значения фактора Q – соответственно 0.69 и 1.0.

Таким образом, изученные базальты аппайнской свиты по магнитным параметрам (скалярным и векторным) характеризуются бимодальным распределением значений ε и In. Вопрос заключается в том, как соотносятся между собой изученные участки по стратиграфической вертикали. Анали-

зируя геологические данные (см. раздел 2), топографическое положение изученных обнажений (см. рис. 2), собственные наблюдения и график распределения параметров ε -In-Q (рис. 5), мы видим, что фигуративная точка базальтов из обн. 20C/14 р. Марха лежит в области фигуративных точек базальтов р. Ыгыатта. Если учесть, что обн. 20C/14 находится выше по разрезу, чем обн. 20A/14 и 20B/14 (строительный карьер), то налицо явный

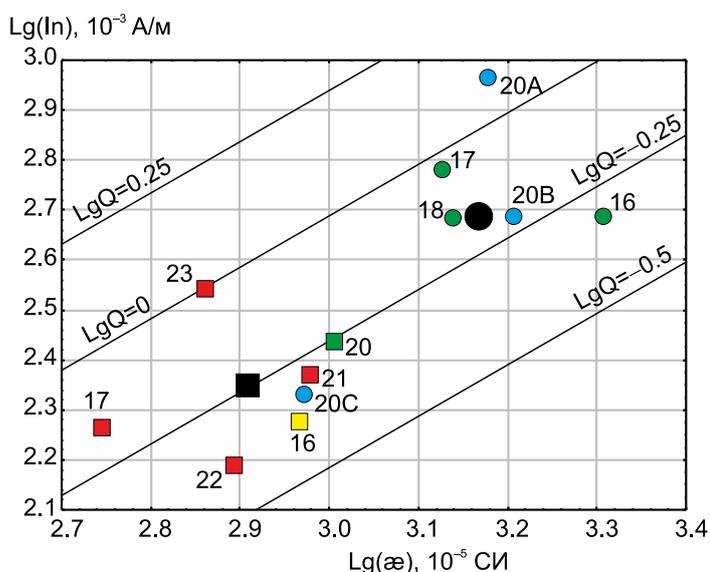


Рис. 5. Распределение спектра магнитных параметров базальтов аппаинской свиты D_{3ap} in situ.

Квадратики/кружочки – средние геометрические значения магнитных параметров по обнажениям (большие фигурки – по участкам), соответственно, рек Ыгыатта / Марха (табл. 1). Цветом выделены компоненты характеристической ЕОН, установленные в обнажениях (пояснения см. ниже): желтый – А, зеленый – В, красный – С и синий – D.

Fig. 5. Spectrum of magnetic parameters of basalts, Appainskaya suite (D_{3ap}) in situ.

Boxes/circles – mean geometric values of magnetic parameters by outcrops (large boxes/circles – by sites) at the Ygyatta and Markha rivers, respectively (Table 1.). Colour codes of components of the characteristic NRM, which are established for the studied outcrops (please find explanations below): yellow – A, green – B, red – C, blue – D.

переход снизу вверх от «сильномагнитных» к «слабомагнитным» образованиям. Независимые петрофизические наблюдения согласуются с геологическими материалами и свидетельствуют о том, что базальты р. Ыгыатта занимают верхний уровень.

Магнитотекстурные исследования. Выполнен анализ анизотропии магнитной восприимчивости (anisotropy of magnetic susceptibility – AMS) [Tarling, Hrouda, 1993] базальтов аппаинской свиты (рис. 6, А, Б). В целом, для обнажений базальтов рек Ыгыатта и Марха характерен «осадочный» тип AMS: плоскость магнитного расслоения, образованная большой K1 и средней K2 осями эллипса AMS, субгоризонтальная, а малая ось K3 – субвертикальная. Однако в базальтах р. Марха (рис. 6, Б) магнитная текстура, по сравнению с базальтами р. Ыгыатта (рис. 6, А), несколько нарушена, о чем свидетельствует заметное отклонение малой оси K3 от вертикали на юго-запад под углом $\approx 17^\circ$ ($D=253.4^\circ$,

$J=73.4^\circ$). Объяснение этого явления приводится ниже, в ходе интерпретации палеомагнитных исследований.

Магнитоструктурные исследования. Распределение значений гистерезисных параметров (ГП – намагниченность насыщения J_s , остаточная намагниченность насыщения J_{rs} , коэрцитивная сила H_c и коэрцитивная остаточная сила H_{cr}) базальтов аппаинской свиты (рис. 7) в целом так же согласуется с распределением параметров χ и \ln (см. табл. 1, рис. 5). Так, базальты р. Ыгыатта характеризуются относительно низкими значениями ГП, в то время как базальтам р. Марха соответствуют повышенные значения ГП. Таким образом, наблюдается тенденция снижения значений ГП базальтов вверх по стратиграфической вертикали. Практически все минералы ферромагнитной фракции базальтов р. Марха попадают в область псевдооднодоменных частиц [Day et al., 1977], в базальтах р. Ыгыатта – около 45 %, а остальные 55 % – в область суперпарамагнитных частиц.

Термомагнитные исследования. На термомагнитограммах дифференциального термомагнитного анализа (ДТМА) [Burov, Yasonov, 1979; Ibragimov, Yasonov, 1999] индуцированной намагниченности J_i базальтов наблюдается окисление титаномагнетитов разной степени, вплоть до их фазового перехода в титаномаггемиты с точками Кюри от 610 до 630°C (рис. 8). Например, такие минералогические превращения установлены в обр. 179 обн. 16/10 и обр. 228 обн. 20/10, в которых образовалась намагниченность химической природы, и, следовательно, для палеомагнитных исследований они непригодны. В нашем случае особая надежда на сохранность первичного палеомагнитного сигнала \ln^0 возлагается на образцы, испытавшие наименьшие фазовые превращения титаномагнетитов, например обр. 254 из обн. 23/10 и обр. 204 из обн. 20С/14. На термомагнитограммах ДТМА второй производной (d^2J_i/dt^2) для них характерны точки Кюри $\approx 550^\circ\text{C}$.

Палеомагнитные исследования [Zijderveld, 1967; Khramov et al., 1982; Shipunov, 1988; Enkin, 1994] включали размагничивание базальтов температурой до 625°C и переменным магнитным полем до 200 мТл (рис. 9–13). Для интерпретации палеомагнитных компонент векторов ЕОН также приведены данные по размагничиванию долеритов катангского (?) и вилюйско-мархинского интрузивных комплексов (см. рис. 9). Первые относятся к Ыгыаттинскому силлу (см. рис. 2, А, рис. 3), долериты которого характеризуются крутыми отрицательными направлениями векторов первичной \ln^0 (обр. Igy98t2) [Konstantinov et al., 2014a]. Вторые представляют Еркютейскую дайку (см. рис. 2, А, рис. 3, обн. 9/10 и 11/10), с векторами

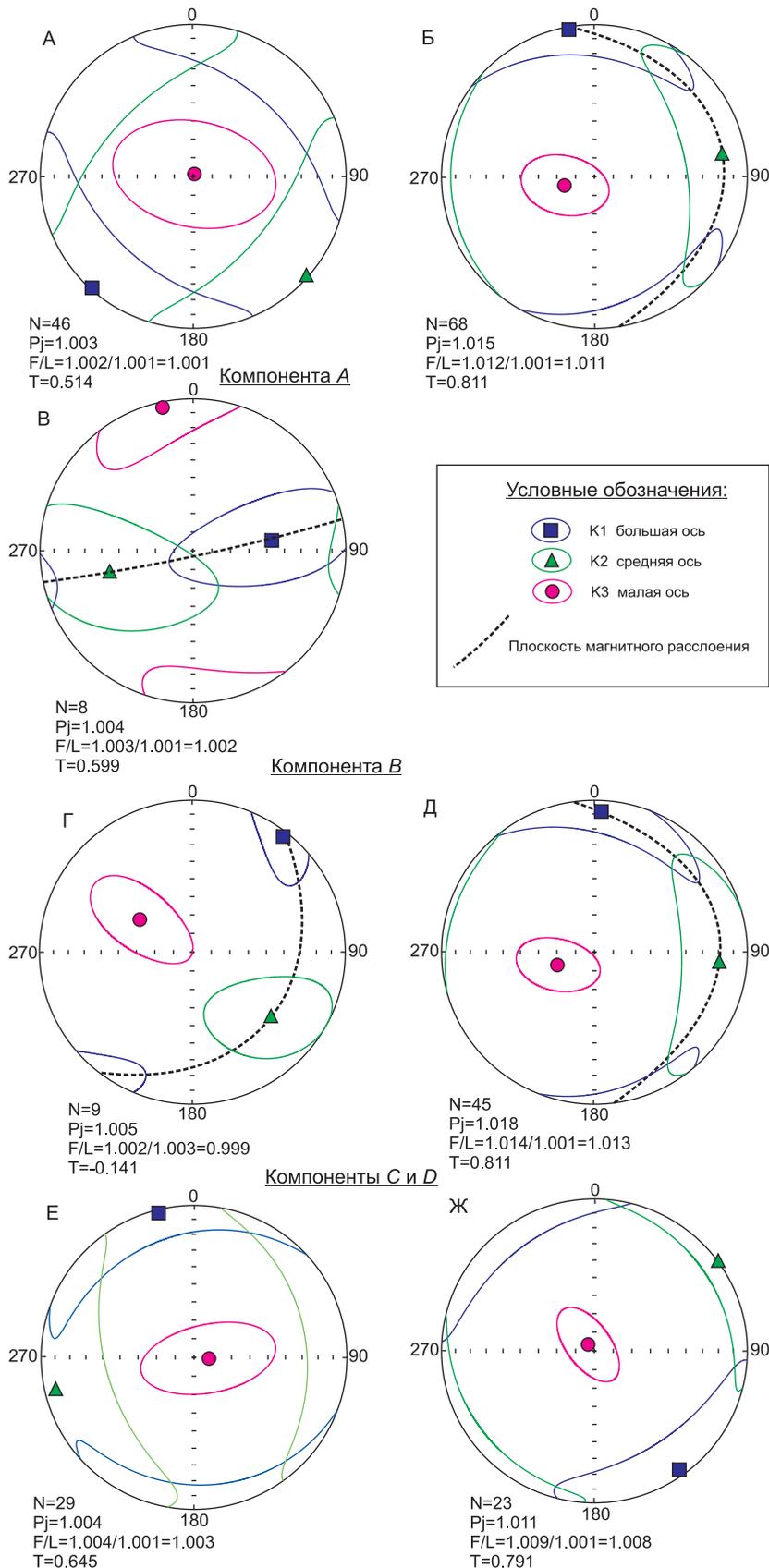


Рис. 6. Стереогаммы анизотропии магнитной восприимчивости базальтов аппаинской свиты.

А – сводная, р. Ыгыатта; В – сводная, р. Марха; В – обн. 16/10; Г – обн. 20/10; Д – обн. 16–18/14; Е – обн. 17, 21–23/10; Ж – обн. 20А, В, С/14. Pj – уточненная степень анизотропии, L – линейная анизотропия, F – плоскостная анизотропия, T – параметр формы эллипса AMS [Tarling, Hrouda, 1993]. Другие пояснения см. в тексте.

Fig. 6. Stereograms showing the anisotropy of magnetic susceptibility of the basalts of the Appainskaya suite.

A – summary, Ygyatta river; B – summary, Markha river; B – outcrop 16/10; Г – outcrop 20/10; Д – outcrop 16–18/14; Е – outcrops 17 and 21–23/10; Ж – outcrops 20A, B, C/14. Pj – updated degree of anisotropy, L – linear anisotropy, F – in-plane anisotropy, T – parameter of the AMS ellipse shape [Tarling, Hrouda, 1993]. Please find explanations in the text.

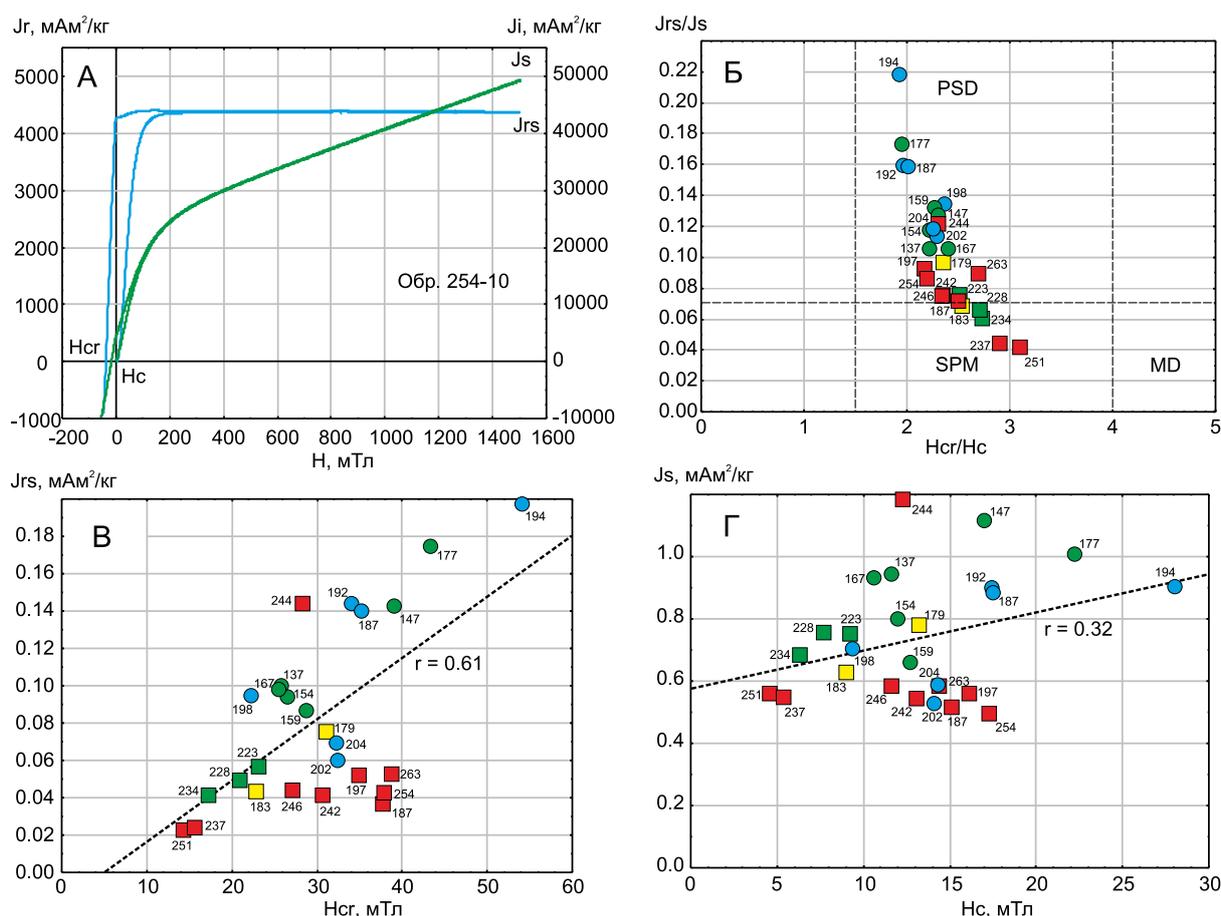


Рис. 7. Магнитоструктурные исследования минералов-носителей намагниченности (титаномагнетиты) базальтов рек Ыгыатта и Марха.

A – петли гистерезисов индуцированной (J_s) и остаточной (J_{rs}) намагниченности насыщения; B – диаграмма Дея (PSD, MD и SPM – области, соответственно, с псевдо-, многодоменными и суперпарамагнитными частицами титаномагнетитов); B, Г – графики зависимости гистерезисных параметров. Квадратики/кружочки – фигуративные точки гистерезисных параметров базитов рек Ыгыатта / Марха. Цветом выделены компоненты характеристической ЕОН, установленные в обнажениях (пояснения см. ниже): желтый – А (обн. 16/10), зеленый – Б (обн. 20/10, 16–18/14), красный – В (обн. 17/10, 21–23/10) и синий – Г (обн. 20А, В, С/14).

Fig. 7. Magnetic structure studies of the magnetization carrier minerals (titanomagnetites) of basalts sampled from sites at the Ygyatta and Markha rivers.

A – hysteresis loops of induced (J_s) and residual (J_{rs}) saturation magnetization; B – Dey diagram (PSD, MD and SPM – areas with pseudo-, multi-domain and superparamagnetic particles of titanomagnetite, respectively); B, Г – plots of hysteresis parameters. Boxes/circles – figurative points of hysteresis parameters of basites sampled from sites at the Ygyatta and Markha rivers. Colour codes of components of the characteristic NRM, which are established for the studied outcrops (please find explanations below): yellow – A (outcrop 16/10), green – B (outcrops 20/10 and 16÷18/14), red – B (outcrops 17/10 and 21÷23/10), blue – Г (outcrops 20A, B, C/14). Highlighted component characteristic NRM established in outcrops (see below for explanation.): Yellow – A (16/10 upd.), Green – B (upd 20/10, 16–18/14.), Red – B (upd. 17/10, 21–23/10), and blue – Г (upd 20A, B, C / 14).

характеристической¹ ЕОН In^{ch} (образцы Igy84t2 и Igy112m2), аналогичными векторам первичной In^0 дайки долеритов устья р. Моркока [Konstantinov,

¹ Характеристическая остаточная намагниченность In^{ch} – наиболее стабильная компонента ЕОН, выделенная в ходе магнитной чистки, на диаграмме Зийдервельда идущая в нуль. Для датировки и оценки природы характеристической остаточной намагниченности необходим комплекс дополнительных исследований, который включает три группы признаков: геологические, физические и геофизические [Pechersky, Sokolov, 2010].

Stegnitskii, 2012]. Зафиксированы случаи, когда долериты дайки (обр. Igy93m1) содержат метакристаллическую компоненту In^m , образовавшуюся за счет перемагничивания Ыгыаттинским силлом.

В изученных обнажениях базальтов аппаинской свиты установлен следующий набор характеристических компонент In^{ch} :

1. Компонента А – отрицательные векторы характеристической ЕОН, группирующиеся в четвертом секторе стереограммы (рис. 10, обр. Igy179m1).

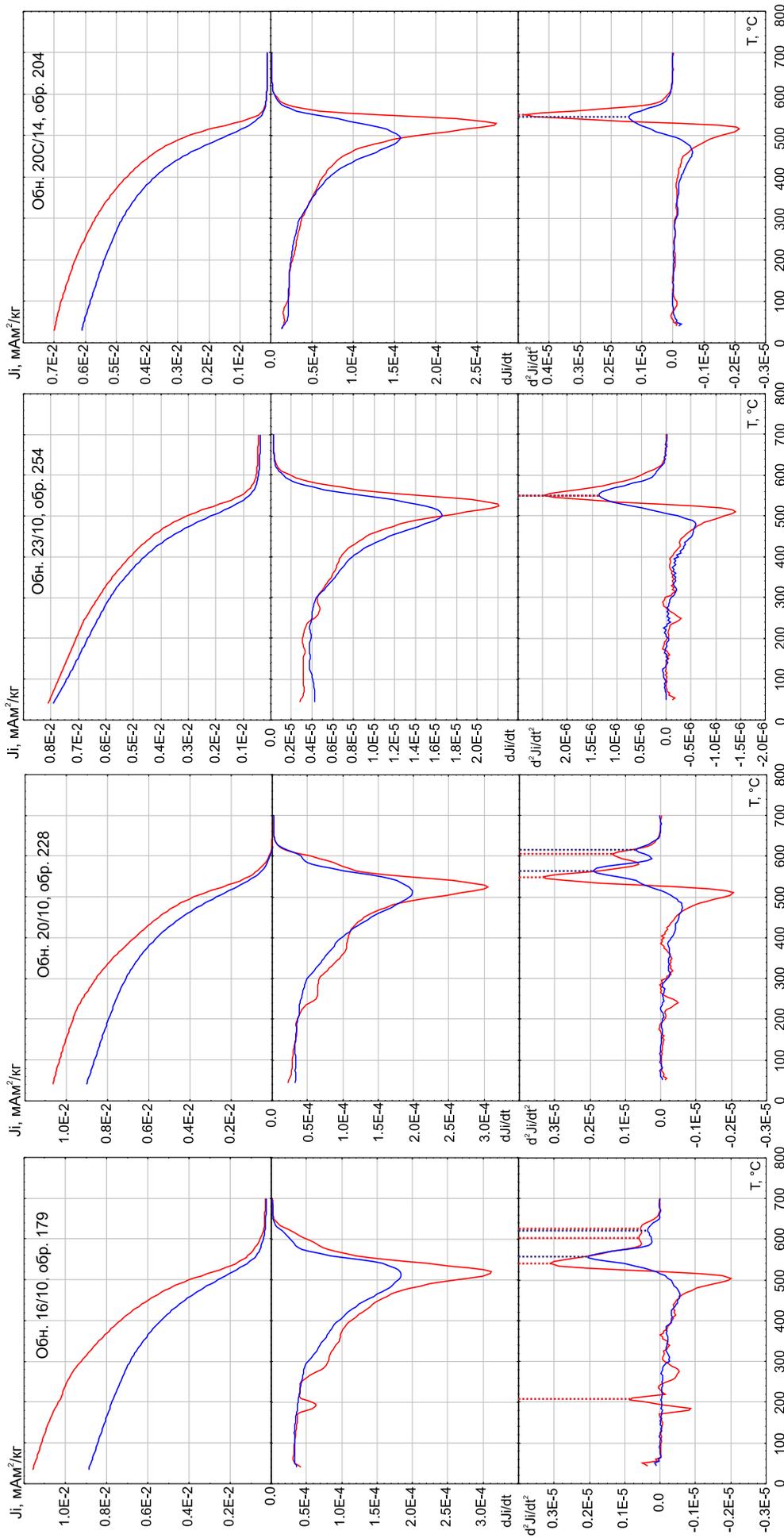


Рис. 8. Результаты дифференциального терромагнитного анализа по индуктивной намагниченности $J_i = f(T)$ базальтов аппайнской свиты. dJ_i/dt и d^2J_i/dt^2 – графики, соответственно, первой и второй производной. Красная/синяя кривая – нагрев/охлаждение.

Fig. 8. Results of the differential thermomagnetic analysis by induced magnetization $J_i = f(T)$ of basalts, Appainskaya suite. dJ_i/dt and d^2J_i/dt^2 – plots of the first and second derivative, respectively. Red/blue curve – heating/cooling.

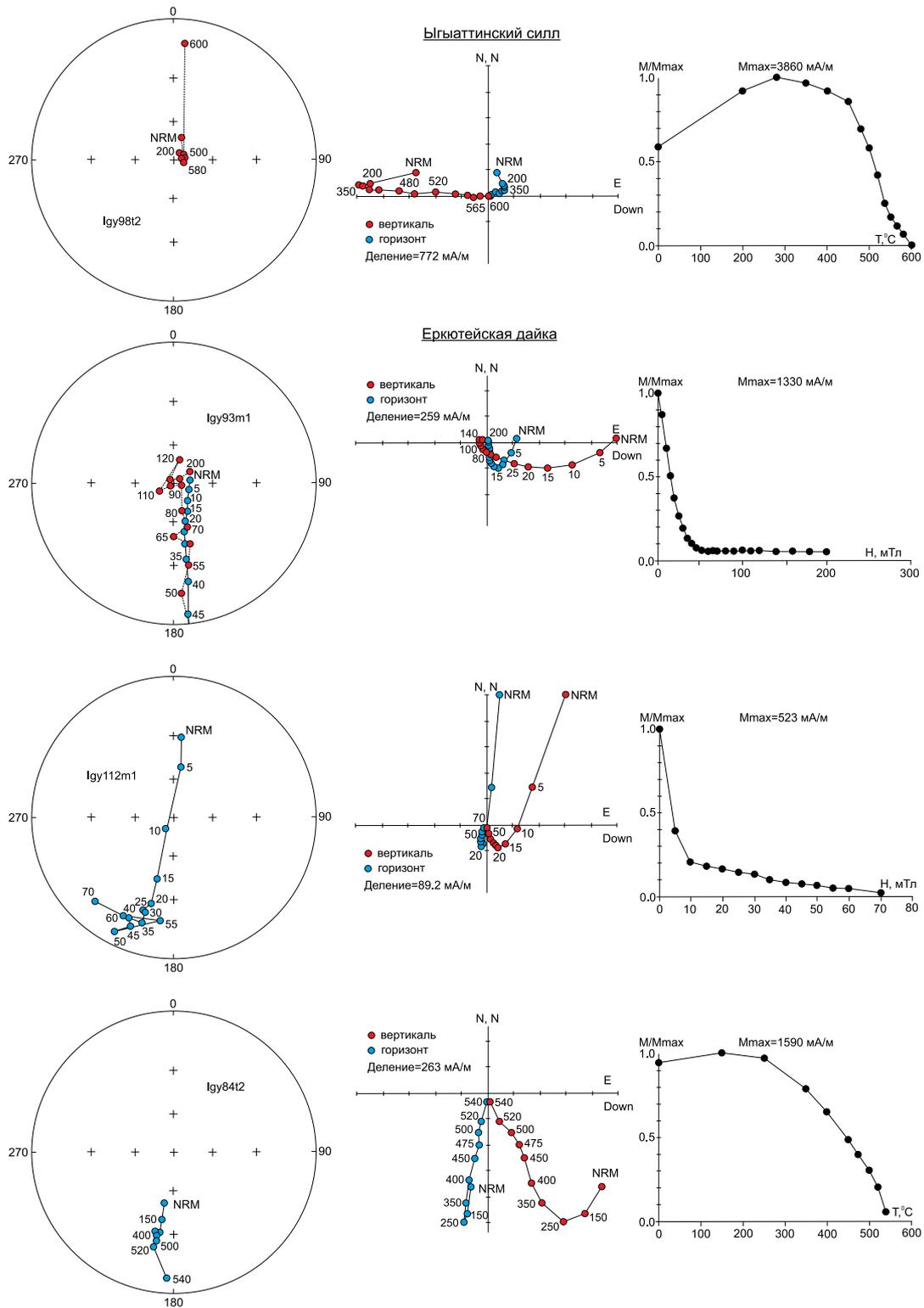


Рис. 9. Пример размагничивания долеритов катангского (Ыгыяттинский сипл, обн. 10/10 [Konstantinov et al., 2014a]) и вилуиско-мархинского (Еркютейская дайка, обнажения 9/10 и 11/10) интрузивных комплексов, р. Ыгыатта (см. рис. 2, А, рис. 3).

Стереогаммы: синие/красные кружочки – проекции векторов ЕОН на положительную/отрицательную полусферу. Диаграммы Зийдервелда: синие/красные кружочки – проекции векторов ЕОН на горизонтальную/вертикальную плоскости. Цифры – значения температуры или переменного магнитного поля.

Fig. 9. Demagnetization of dolerites. Katanga (Ygyatta sill, outcrop 10/10 [Konstantinov et al., 2014a]) and Vilyui-Markha (Erkyutei dyke, outcrops 9/10 and 11/10) intrusive complexes, Ygyatta river (see Fig. 2, A, and Fig. 3).

Stereograms: blue/red circles – projections of NRM vectors on the positive/negative hemisphere. Zijderveld diagrams: blue/red circles – projections of NRM vectors on the horizontal/vertical plane. Numbers – values of temperature or alternating magnetic field.

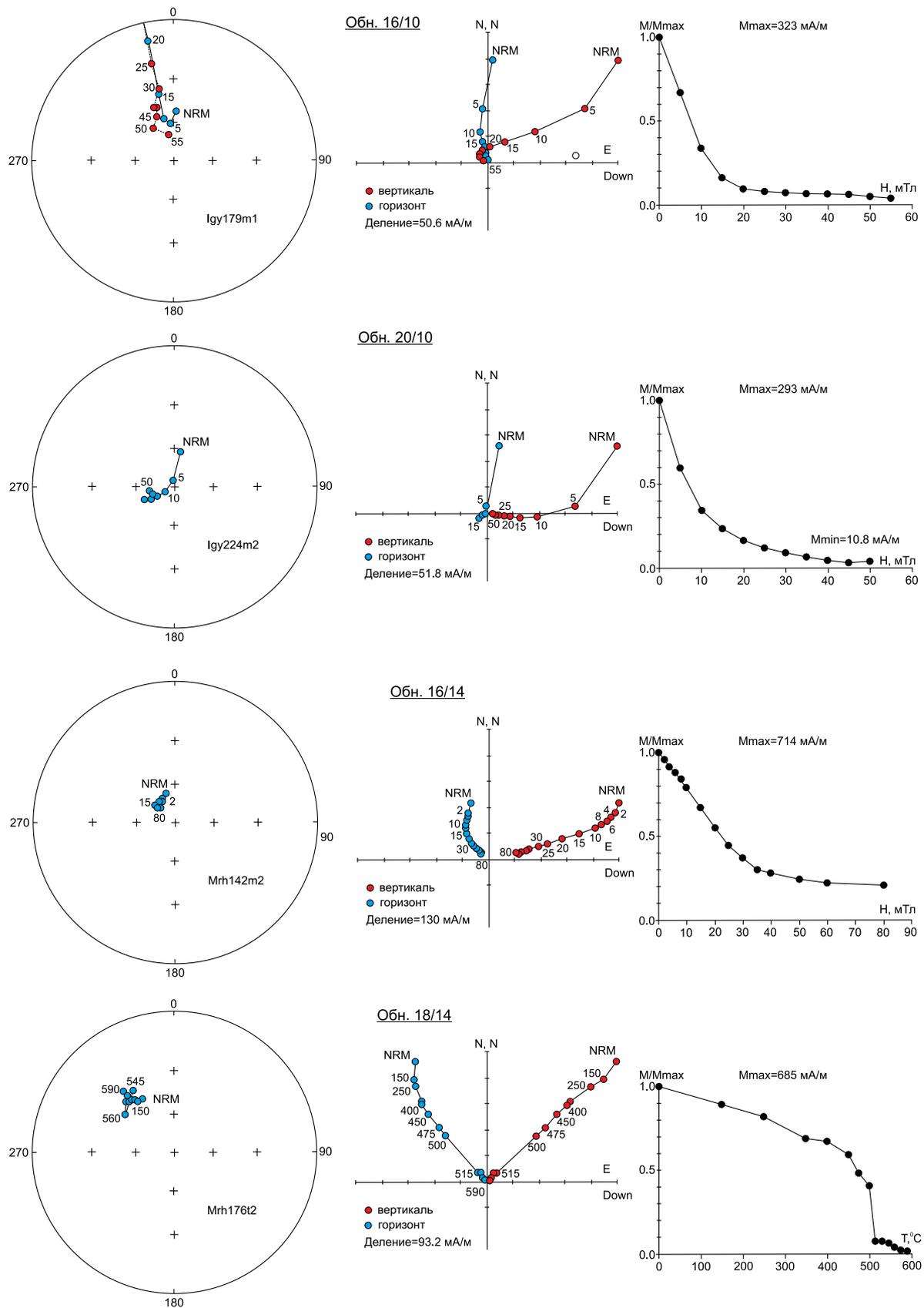


Рис. 10. Пример размагничивания базальтов аппаинской свиты, р. Ыгыатта (обн. 16/10 и 20/10) и р. Марха (обн. 16/14 и 18/14). Пояснения см. на рис. 9.

Fig. 10. Demagnetization of basalts. Appainskaya suite, Ygyatta (outcrops 16/10 and 20/10) and Markha (outcrops 16/14 and 18/14) rivers. Please find explanations in Fig. 9.

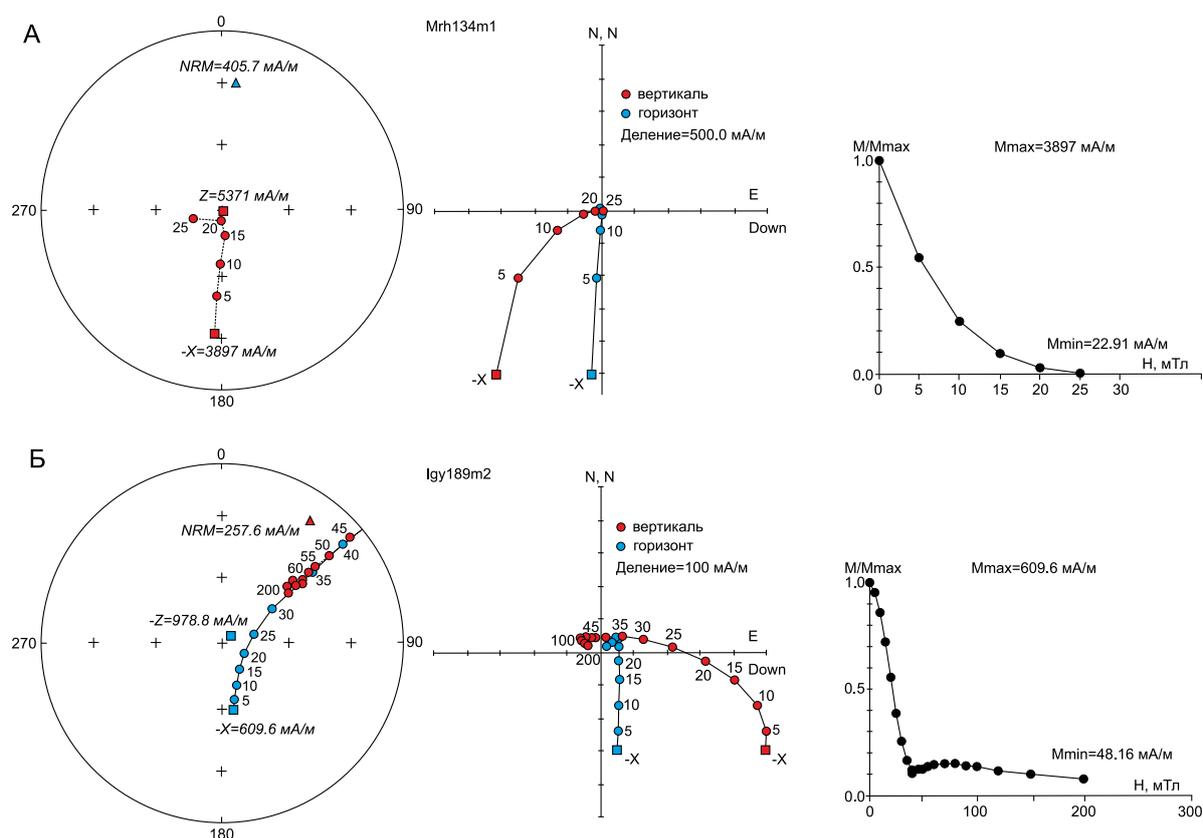


Рис. 11. Результаты «искусственного перемагничивания» [Khuzin, Konstantinov, 2015] при изучении магнитной стабильности базальтов аппайнской свиты. Треугольник – вектор **NRM**, квадратики – искусственно созданные векторы (**Z**, **-Z**, **-X**). Цифры – модули векторов. Другие пояснения см. на рис. 9.

Fig. 11. Results of the ‘artificial magnetization reversal’ experiments [Khuzin, Konstantinov, 2015] in the study of magnetic stability of basalts, Appainskaya suite. Triangle – **NRM** vector, boxes – artificial vectors (**Z**, **-Z**, **-X**). Numbers – modules of vectors. Please find explanations in Fig. 9.

Она обнаружена только в обн. 16/10, где установлены оливинифирующие палагонитовые базальты, по трем образцам из 12 размагниченных (табл. 2). Компонента *A* проявлена очень слабо и поэтому имеет достаточно большой радиус овала доверия – $\alpha_{95}=40.8^\circ$ и низкое значение кучности – $k=10.2$ (рис. 14, А). Плохая сохранность «магнитной памяти» базальтов вполне может объясняться высокой степенью окисления титаномагнетитов (см. рис. 8, обр. 179.). Вероятнее всего, компонента *A* – метасинхронная I_n^m , сформировалась за счет прогрева базальтов перекрывающими их долеритами Ыгыаттинского силла (см. рис. 2, А, рис. 3), на что указывает характер AMS «дайкового» типа: плоскость магнитного расслоения (оси эллипса *K1* и *K2*) субвертикальная, северо-восточного простирания (рис. 6, В). Аналогичный тип магнитной текстуры был установлен в зоне обжига (петромагнитная неоднородность 2-го типа) разнофазных силлов пермотриасовых долеритов месторождения кимберлитовой трубки Комсомольская [Konstantinov, Gladkov, 2009; Konstantinov, 2014; Konstantinov et al., 2014b].

2. Компонента *B* – крутые положительные векторы характеристической I_n^{ch} (см. рис. 10, образцы Igy224m2, Mrh142m2 и Mrh176t2). Всего таких образцов установлено 17 из 73 размагниченных, представляющих четыре обнажения плагинифирующих палагонитовых базальтов: 20/10 и 16–18/14 (табл. 2, рис. 14, А). С одной стороны, компонента *B* магнитожесткая – сохраняет направление на протяжении всего эксперимента (вначале возможно присутствие лабораторной ЕОН). Этот эффект, вероятнее всего, предопределен относительно повышенными значениями гистерезисных параметров (см. рис. 7). С другой стороны, она присуща обнажениям, в которых наблюдаются заметные отклонения осей эллипса AMS (см. рис. 6, Г, Д). Поскольку для изученных образований аппайнской свиты устанавливается субгоризонтальное залегание (см. рис. 3, обн. 24/10, 17/14), логично предположить, что причиной отклонения малой оси *K3* от вертикали являются эпигенетические изменения. Как результат – в изученных обнажениях произошли новообразования титаномагнетитов

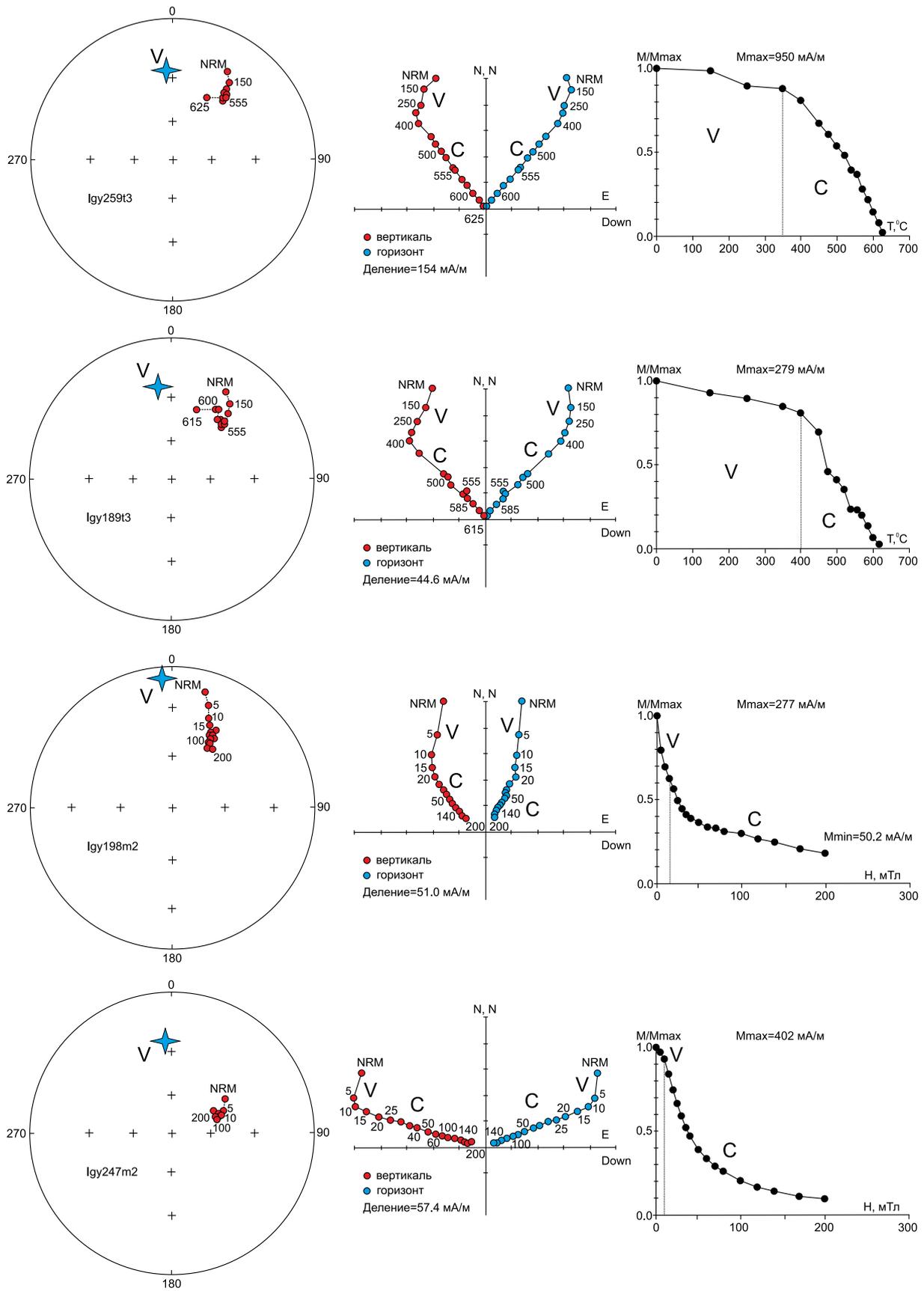


Рис. 12. Размагничивание базальтов аппайнской свиты, р. Ыгыатта. Звездочка – компонента V. Пояснения см. на рис. 9.

Fig. 12. Demagnetization of basalts. Appainskaya suite, Ygyatta river. Star – component V. Please find explanations in Fig. 9.

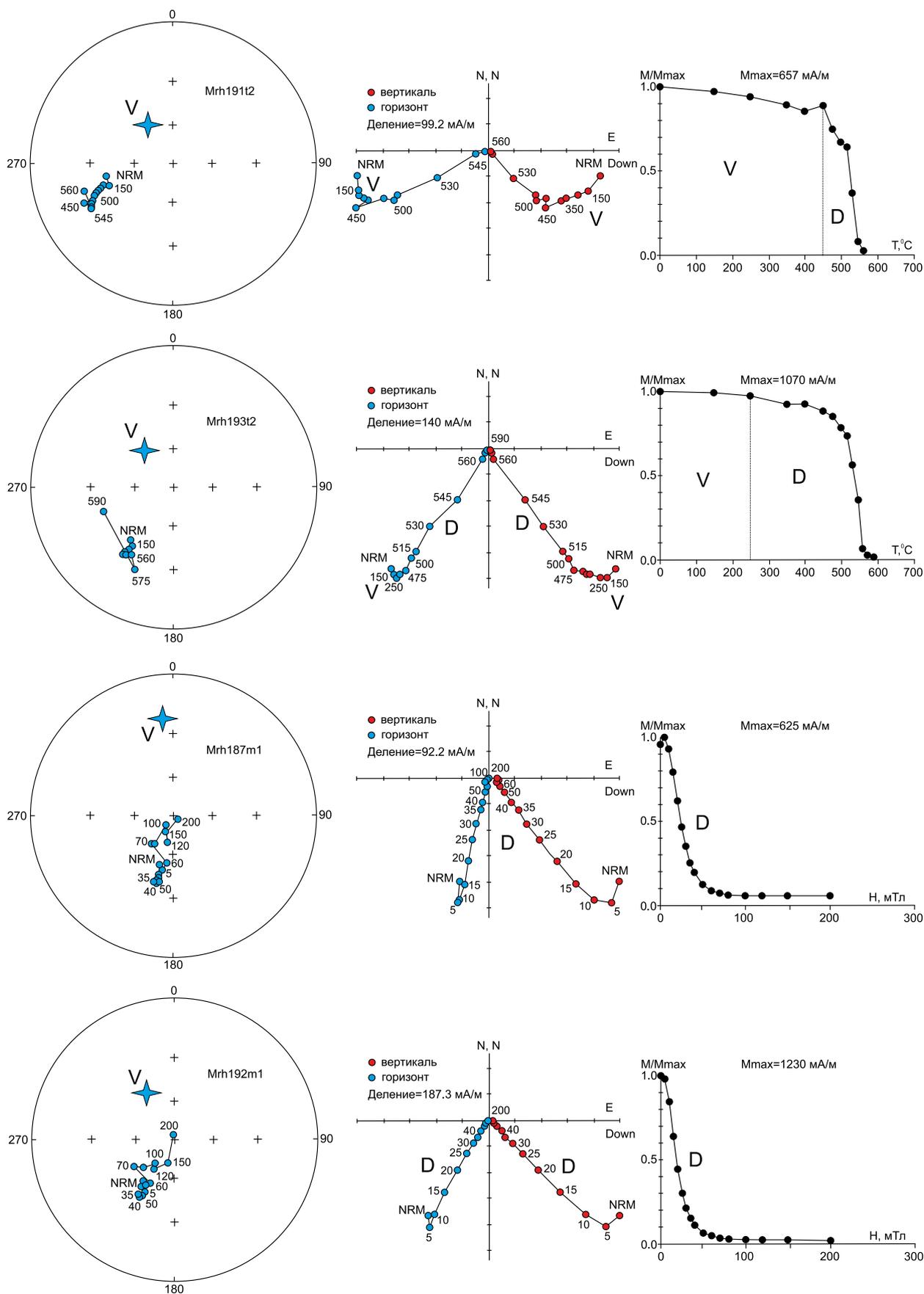


Рис. 13. Размагничивание базальтов аппайнской свиты, р. Марха. Пояснения см. на рис. 9 и 12.

Fig. 13. Demagnetization of basalts, Appainskaya suite, Markha river. Please find explanations in Fig. 9 and Fig. 12.

Т а б л и ц а 2. Палеомагнитные направления и виртуальные геомагнитные полюсы базальтов аппаинской свиты

Table 2. Paleomagnetic directions and virtual geomagnetic poles of basalts, Appainskaya suite

№ пп	Обнажение	N/n	Dcp, °	Jcp, °	k, ед.	α_{95} , °	φ , °	λ , °	dp/dm, °	fm, °
Сайты										
р. Ыгыатта, 2010										
1	16 ^A	3/12	303.3	-34.8	10.2	40.8				
2	17 ^C	14/14	23.5	-40.9	25.5	8.0				
3	20 ^B	8/16	255.8	67.0	80.4	6.2				
4	21 ^C	4+1c/15	27.0	-43.7	14.3	21.5				
5	22 ^C	6/12	10.8	-52.1	52.0	9.4				
6	23 ^C	10/11	26.4	-42.7	53.0	6.7				
7	Сводное ^C пп. 2, 4÷6	35+1c/80	22.9	-43.9	28.5	4.6				
р. Марха, 2014										
8	16-18 ^B	6+3c/57	273.9	61.6	40.3	8.4				
9	20A ^D	11/11	198.4	38.1	35.5	7.8				
10	20B ^D	9+1c/10	229.6	36.4	38.1	8.0				
11	20C ^D	10+2c/12	210.8	48.7	31.0	8.0				
12	Сводное ^D пп. 9-11	30+3c/33	208.9	41.4	26.0	5.0				
		68/170								
Участки ($\varphi=63.8^\circ$, $\lambda=116.0^\circ$)										
13	пп. 3+8 ^B	2S	265.7	64.6	146.4	20.8	38.9	54.1	26.8/33.4	46.5
14	пп. 2, 4-6 ^C	4S	22.4	-45.0	129.5	8.1	2.7	96.2	6.6/10.3	27.2
15	пп. 9-11 ^D	3S	213.2	41.8	34.4	21.3	1.7	86.0	16.0/26.1	24.1
16	Сводное пп. 14+15	7S	27.1	-43.8	60.3	7.8	1.9	91.7	6.1/9.7	25.6

П р и м е ч а н и е. N/n – количество образцов, участвующих в статистике/общее количество образцов, размагниченных температурой и переменным магнитным полем; c – круги перемагничивания; S – сайты. Параметры группировки векторов характеристической ЕОН: склонение – Dcp, наклонение – Jcp, кучность – k и радиус овала доверия – α_{95} . Палеомагнитный полюс: широта – φ , долгота – λ , доверительные интервалы – dp/dm и палеоширота – fm. ^{A, B, C, D} – характеристические компоненты ЕОН, соответственно, A, B, C и D.

Н o t e. N/n – number of samples involved in statistics / total number of thermally and alternating magnetic field demagnetized samples; c – magnetization reversal circles; S – sites. Parameters for grouping the vectors of characteristic NRM: declination – Dcp, inclination – Jcp, clustering – k, and confidence oval – α_{95} . Paleomagnetic pole: latitude – φ , longitude – λ , confidence intervals – dp/dm, and paleolatitude – fm. ^{A, B, C, D} – NRM characteristic components of NRM, respectively, A, B, C and D.

(см. рис. 8, обр. 228), что привело к почти полному уничтожению вектора \mathbf{In}^0 . Естественно, вместо них сформировались векторы вязкой ЕОН – \mathbf{In}^v , которые сориентировались по направлению, близкому к геомагнитному полю.

Если титаномаггемиты способны намагничиваться по заданному направлению магнитного поля, то направление компоненты *B* должно меняться во времени. Стабильность компоненты *B* проверена методом «искусственного перемагничивания» [Khuzin, Konstantinov, 2015]. На первом этапе образец Mrh134m1 был намагничен в установке LDA-5 постоянным полем разной величины сначала по направлению «Z» (D=50°, J=-89°, In=5371 мА/м), а затем по «-X» (D=183°, J=-32, In=3897 мА/м) (см. рис. 11, A). Таким образом, исходный вектор NRM (D=6°, J=30, In=405.7 мА/м) был «стерт» ложными (simulated) высокоинтенсивными компонен-

тами \mathbf{In}^s (вектор искусственной остаточной намагниченности), имитирующими воздействие магнитного поля Земли за сотни тысяч лет. На втором этапе проведено стандартное размагничивание переменным магнитным полем. В процессе эксперимента до 25 мТл наблюдается смещение вектора -X в направлении вектора Z и уменьшение его модуля до 23 мА/м (более чем в 150 раз). Свыше 15 мТл вектор ЕОН прочно принимает направление искусственно заданного вектора Z. К компоненте *B* мы так и не пришли. Полученный результат доказывает, что компонента *B* не может являться первичной, а ее природа, вероятнее всего, вязкая \mathbf{In}^v .

3. Компонента *C* – отрицательные векторы характеристической ЕОН, группирующиеся в первом секторе стереограммы с наклонениями от -50 до -40° (см. рис. 12, 14). Как правило, эта компонента

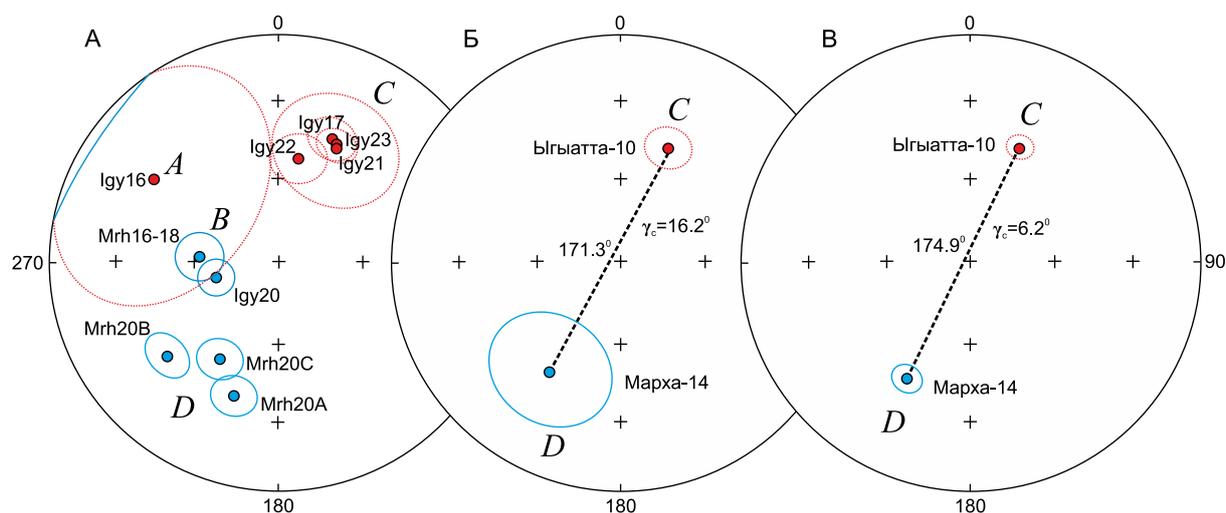


Рис. 14. Распределение характеристических компонент ЕОН базальтов аппайнской свиты. Стереогаммы: А – сводная по характеристическим компонентам (А, В, С и D); Б и В – компоненты С и D, соответственно, на уровне сайтов и образцов.

Fig. 14. Distribution of the characteristic components of NRM for basalts, Appainskaya suite. Stereograms: А – summary of the characteristic components (А, В, С and D); Б and В – components С and D at the levels of sites and samples, respectively.

обнаруживается при температуре от 400 до 625 °С или переменном магнитном поле от 10 до 200 мТл. Вначале может присутствовать вязкая компонента V, для которой характерны пологие положительные направления в северных румбах стереогаммы. Компонента С установлена у плагифирированных базальтов в четырех обнажениях р. Ыгыатта (обнажения 17/10, 21–23/10), где из 80 экспериментов удачными оказались 35, или примерно 50 % (табл. 2). Следует отметить, что в обн. 17/10 и 23/10 эта компонента сохранилась практически в «чистом виде» (см. табл. 1), что может объясняться относительно повышенными значениями фактора Q и коэрцитивных сил (H_c и H_{cr}) по сравнению с аналогичными значениями базальтов из других обнажений р. Ыгыатта (см. рис. 5, рис. 7). С учетом того, что форма эллипсоида AMS базальтов близка к «осадочному» типу (см. рис. 6, E), это является косвенным доказательством первичности природы компоненты С. По данным ДТМА, минералом-носителем намагниченности этой компоненты является практически неизменный титаномагнетит с точкой Кюри ≈ 550 °С (см. рис. 8, обр. 254), что также может гарантировать сохранность векторов In^0 . Кроме того, петрографические исследования базальтов Г.Г. Камышевой [Khranov, 1975] свидетельствуют о хорошей сохранности рудных минералов и первичности их породе, что является одним из достаточно серьезных аргументов сингенетичности компоненты С.

4. Компонента D – положительные векторы характеристической ЕОН, группирующиеся в третьем

секторе стереогаммы с наклонениями от 40 до 50° (см. рис. 13, рис. 14). Вязкая составляющая у этих образцов (компонента V) снимается температурой до 450 °С или переменным магнитным полем до 150 мТл. Компонента D обнаружена у плагифирированных плагонитовых базальтов в трех обнажениях р. Марха (обнажения 20А, В, С/14). Результаты всех 33 экспериментов (100 %) используются в расчетах палеомагнитного направления (табл. 2). Это свидетельствует о достаточно хорошо сохранившейся магнитной «памяти» рассматриваемых базальтов, обусловленной слабой степенью выветривания (обн. 20А, В/14 находятся в строительном карьере, см. рис. 3). Отсутствие существенных эпигенетических изменений в базальтах также доказывается «осадочным» типом AMS (см. рис. 6, Ж), что подтверждает наши предположения о первичной природе компоненты D. Кроме того, у образцов 187, 192 и 194, отобранных в нижней части карьера, повышены значения ГП (см. рис. 7). В пользу первичности компоненты D также свидетельствуют и графики ДТМА, которые аналогичны титаномагнетитам с компонентой С – титаномагнетит с точкой Кюри ≈ 550 °С (см. рис. 8, обр. 204).

Однако доказательств первичности природы компонент С и D базальтов аппайнской свиты, базирующихся только на хорошей сохранности базальтов и на данных AMS, ДТМА и ГП (геологические и петромагнитные признаки [Pechersky, Sokolov, 2010]), явно недостаточно. В этом случае нами также были задействованы палеомагнитные (геофизические) признаки – метод «искусственного

Т а б л и ц а 3. Результаты теста обращения характеристических компонент *C* и *D* базальтов аппаинской свиты по [McFadden, McElhinny, 1990]Table 3. Results of the reversal test of characteristic components of *C* and *D* of basalts of the Appainskaya suite, according to [McFadden, McElhinny, 1990]

Компонента	<i>D</i> (33 образца)	<i>D</i> (3 сайта)
<i>C</i> (35 образцов)	$\gamma/\gamma_c=5.1/6.2$ «положительный»	–
<i>C</i> (4 сайта)	–	$\gamma/\gamma_c=8.7/16.2$ «положительный»

П р и м е ч а н и е. γ и γ_c – углы между средними направлениями группировок (кластеров) векторов ЕОН и максимально допустимый (критический), соответственно (см. рис. 14, Б, В).

N o t e. γ и γ_c – the angle between average directions of groups (clusters) of NRM vectors and the maximum allowable (critical) angle, respectively (see Fig. 14, B, V).

перемагничивания» [Khuzin, Konstantinov, 2015] и тест обращения² [McFadden, McElhinny, 1990].

Стабильность компоненты *C* проверена методом «искусственного перемагничивания» (см. рис. 11, Б). На первом этапе образец был намагничен сначала по направлению «–Z» ($D=62^\circ$, $J=85^\circ$, $I_n=978.8$ мА/м), а затем по «–X» ($D=170^\circ$, $J=59^\circ$, $I_n=609.6$ мА/м). Таким образом, исходный вектор **NRM** ($D=37^\circ$, $J=-18$, $I_n=257.6$ мА/м) был «стерт». На втором этапе проведено стандартное размагничивание переменным магнитным полем. В начале эксперимента до 20 мТл по кругу перемагничивания просматривается направление «–Z». Далее, в пределах от 25 до 60 мТл картина эксперимента резко меняется. Собственно характеристическая компонента *C* ($D=51^\circ$, $J=-46^\circ$, $\alpha_{95}=2.8^\circ$) проявилась свыше 70 мТл. Проведенный эксперимент доказывает, что базальты аппаинской свиты из обнажений 17/10 и 21–23/10 могут обладать хорошей магнитной памятью.

Характеристические компоненты *C* (р. Ыгыатта) и *D* (р. Марха) образуют антиподальные кластеры (рис. 14). Тест обращения, выполненный по методике [McFadden, McElhinny, 1990], оказался положительным как на уровне образцов $\gamma/\gamma_c=5.1/6.2$, так и на уровне сайтов $\gamma/\gamma_c=8.7/16.2$ (табл. 3, рис. 14, Б, В). Таким образом, природа характеристических компонент *C* и *D*, по комплексу критериев, является первичной I_n^0 .

На основе первичных компонент *C* и *D*, представляющих семь обнажений (сайтов), рассчитан виртуальный геомагнитный полюс (ВГП) с координатами: широта – $\Phi=1.9^\circ$, долготы – $\Lambda=91.7^\circ$, доверительные интервалы – $dp/dm=6.1/9.7^\circ$ (см. табл. 2). Согласно расчетам, изливание аппаинских базальтов происходило на палеошироте $fm=25.6^\circ$ с.ш.

² Тест обращения (инверсий, reversal test) – способ выделения и оценки направления древней компоненты I_n по прямо и обратно намагниченным одновозрастным породам одного объекта. Первичная остаточная намагниченность таких пород должна отличаться на 180° .

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Палеомагнитные исследования базальтов аппаинской свиты проводились и другими исследователями – Г.Г. Камышевой, С.Ю. Орловым, А.В. Шаццлло и др. [Khramov, 1973, 1975; Orlov, Shatsillo, 2011]. Рассмотрим, какие из этих данных можно использовать с целью повышения точности полученного нами ВГП и расчета общего ПМП для франского времени.

Исследования базальтов аппаинской свиты рек Вилюй и Марха [Orlov, Shatsillo, 2011] выполнены по современным технологиям, где 4 (MAR5, 7, 8 и 9) из 12 обнажений (табл. 4) соответствуют обн. 16–18/14 настоящей работы (см. табл. 2), в которых установлена компонента *B*. Однако доказательства природы выделенных в них векторов характеристической ЕОН, так же как и для сайтов (VIL4, 5, 6, 11), авторами не приводятся. В обн. MAR10 направление характеристической компоненты ЕОН близко к нашей компоненте *D*, установленной в обн. 20C/14 (берег реки). Этот сайт мы принимаем как независимое (выполненное другими авторами по другим образцам в другое время и на другом оборудовании) палеомагнитное определение для наших дальнейших расчетов ПМП (табл. 5). Палеомагнитные данные по двум сайтам из MAR12 совпадают с «дайковыми» направлениями векторов характеристической ЕОН [Konstantinov, 2014], в т. ч. и с установленными настоящими исследованиями в Еркютейской дайке (см. рис. 9, образцы Igy84t2 и Igy112m2).

Близкое к сайту MAR10 (см. табл. 4) направление первичной I_n^0 базальтов аппаинской свиты получено в 70-х годах прошлого века Г.Г. Камышевой в двух обнажениях р. Ыгыатта (№ 8-53) [Khramov, 1975]. Но, несмотря на то, что палеомагнитное определение Г.Г. Камышевой выполнено по устаревшей методике, мы все же принимаем его в качестве независимого для расчета ПМП (табл. 5), тем более что оно подтверждается настоящими исследованиями.

Т а б л и ц а 4. Палеомагнитные направления базальтов аппаинской свиты Ыгыаттинской впадины [Orlov, Shatsillo, 2011]

T a b l e 4. Paleomagnetic directions of basalts of the Appainskaya suite in the Ygyatta depression [Orlov, Shatsillo, 2011]

№	Обнажение	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	N/n	Dg, $^\circ$	Ig, $^\circ$	Ds, $^\circ$	Is, $^\circ$	k, ед.	$\alpha_{95}, ^\circ$
1	MAR5*	64.4	116.7	17/17	288.1	60.1	288.1	63.1	118.0	3.3
2	MAR7*	64.4	116.9	9/9	293.3	76.8	234.0	67.3	23.2	10.9
3	MAR8*	64.1	116.6	7/7	290.4	61	291.4	65.0	72.1	7.2
4	MAR9*	64.1	116.7	10/10	286.7	61.8	287.3	65.8	172.7	3.7
5	MAR10**	63.9	116.6	13/13	219.3	42.7	215.9	44.4	12.3	12.3
6	MAR12-1	63.8	116.4	24/17	3.6	-26.7	357.2	-22.6	6.7	12.3
7	MAR12-2	63.8	116.5	10/10	172	7.9	170.9	1.2	43.3	7.4
8	VIL4	63.1	115.1	10/5	297.4	25.2	296.5	25.6	139.7	9.5
9	VIL5	63.0	115.1	10/8	280.9	-0.2	280.9	-0.2	13.4	16.3
10	VIL6	63.0	115.0	10/17	286.1	10.1	286.1	10.1	21.3	8.0
11	VIL11-1	62.8	115.4	10/4+8c	286.3	12.1	286.0	16.3	16.1	11.5
12	VIL11-2	62.8	115.4	10/10+3c	289	-7.3	289.0	-2.3	53.5	5.8

П р и м е ч а н и е. φ и λ – широта и долгота места отбора. Параметры группировки векторов характеристической ЕОН: D – склонение: в современной (Dg) и древней (Ds) системе координат; I – наклонение: в современной (Ig) и древней (Is) системе координат; k – кучность; α_{95} – овал доверия; N/n – количество образцов: отобранных / использованных в расчетах; c – круги перемагничивания. Звездочками помечены общие сайты, а дублированной – сайт, принятый для расчета ПМП.

N o t e. φ и λ – latitude and longitude of sampling site. Parameters for grouping the vectors of characteristic NRM: D – declination: in the modern (Dg) and ancient (Ds) coordinate system; I – inclination: in the modern (Ig) and ancient (Is) coordinate system; k – clustering; α_{95} – confidence oval; N/n – number of samples selected/used for calculations; c – magnetization reversal circles. Common sites are marked by stars. The site selected for PMP calculations is marked by a double star.

Т а б л и ц а 5. Палеомагнитные полюсы среднепалеозойских кимберлитов и базитов Якутской алмазоносной провинции

T a b l e 5. Paleomagnetic poles of the Middle Paleozoic kimberlites and basites in the Yakutian diamondiferous province

№ пп	Тип пород, (№ по каталогу)	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	dm/dp, $^\circ$	fm, $^\circ$	Публикации
1	Кимберлиты, долериты	11	150	8.9	31	[Kravchinsky et al., 2002]
2	Кимберлиты, долериты	-13	126	4.3/8.2	11	[Konstantinov, Stegnitskii, 2012]
3	Долериты (9-36), р. Куойка	9	105	5.8/9	28	[Khramov, 1973; Konstantinov et al., 2013]
4	Базальты (8-53)	3	93	6/9	27	[Khramov, 1975]
5*	Долериты, р. Еркютей (8-54)	33	108	13/14	59	[Khramov, 1975]
6*	Базальты (9-42)	46	93	9/10	71	[Khramov, 1975]
7*	Базальты, долериты (9-43)	13	122	6/8	39	[Khramov, 1975]
8	Базальты, р. Марха, обн. MAR10	4.2	84.1	9.7/15.5	26	[Orlov, Shatsillo, 2011]
9**	Метахронная компонента в раннесилурийских и ордовикских породах, р. Нюя	-5.9	93.2	1.9/3.2	-	[Powerman et al., 2013]
10	Долериты трубки Мир	-0.4	96.6	8.3/13.3	26	[Konstantinov et al., 2016]
11*	Долериты трубки Нюрбинская	-18.1	111.8	4.9/9.6	7	[Konstantinov et al., 2016]
12	Базальты (N=7)	1.9	91.7	6.1/9.7	26	настоящие исследования
13	Сводное (пп. 3+4+8+9+10+12) N=12	1.7	92.8	3.7/5.9	26	настоящие исследования

П р и м е ч а н и е. Пояснения см. в табл. 2. * – исключены, как не удовлетворяющие настоящим исследованиям (пояснения см. в тексте). ** – приняты координаты без поправки за разворот Алданского блока Сибирской платформы.

N o t e. Please find explanations in Table 2. * – excluded as not satisfying the present study (please find explanations in the text). ** – accepted coordinates without corrections concerning the reversal of the Aldan block of the Siberian platform.

Полученные палеомагнитные направления (компоненты *C* и *D*) по базальтам аппаинской свиты неслучайны. Аналогичные направления обнаружены и на других объектах Западной Якутии, например:

1. Компонента *C* встречена в среднепалеозойской дайке долеритов на р. Куойка в Нижнеолекском районе ЯАП (полюс № 9-36, табл. 5) [Khramov, 1973]. Эта компонента подтвердилась современными исследованиями [Konstantinov et al., 2013].

2. Компонента *C* установлена в дайке долеритов (табл. 5) [Konstantinov et al., 2016] с возрастом 373.5 ± 3.9 млн лет [Tomshin et al., 2016], которая рвется кимберлитовой трубкой Мир фаменского возраста [Zaitsev, Smelov, 2010].

3. Метахронная компонента в раннесилурийских и ордовикских породах р. Нюя [Powerman et al., 2013], вероятнее всего, сформировалась в результате внедрения силлов жаровского комплекса, возраст которых U-Pb методом оценивается в 378–368 млн лет. Ее направление, без учета тектонической поправки³ за разворот Алданского блока относительно Ангаро-Анабарского блока Сибирской платформы (табл. 5), так же близко компоненте *D* базальтов аппаинской свиты. На этом основании полюс по метахронной компоненте принят для расчета ПМП франа.

В свете полученных данных следует внимательно отнестись к полюсам под № 5–7 и 11 (табл. 5). Первый (№ 5) представляет Еркютейскую дайку, по которой получены совершенно другие направления векторов характеристической ЕОН (см. рис. 9) по сравнению с ранним исследованием. Ее характеристическая ЕОН близка к компоненте *D*, однако возраст этой дайки может оказаться несколько древнее. Второй полюс (№ 6), вероятнее всего, является продуктом перемагничивания, аналогичен сайтам 20/10, 16–18/14 (авторские данные, табл. 2), MAR5, 7, 8 и 9 (см. табл. 4). Третий полюс (№ 7), согласно описанию каталога, соответствует эмяксинской свите, и по этой причине мы не можем использовать его в наших расчетах. Четвертый (№ 11) получен также по докимберлитовым дайкам щелочных базитов месторождения Нюрбинская [Konstantinov et al., 2016], возраст которых варьируется от 450 до 332 млн лет [Zaitsev, Smelov, 2010].

Таким образом, в расчете реперного ПМП франа участвуют 12 сайтов (табл. 5). Координаты ПМП составляют: широта $\varphi = 1.7^\circ$, долгота $\lambda = 92.8^\circ$, доверительные интервалы $dp/dm = 3.7/5.9^\circ$. Рассчитанный ПМП свиты имеет высокий индекс надеж-

ности 6 по [Van der Voo, 1993] или 0.9 по [Pechersky, Didenko, 1995], поэтому на данном этапе исследований его уже можно рассматривать в качестве реперного для франского времени (370 ± 5 млн лет).

Положение рассчитанного реперного ПМП (п. 12, табл. 5) является аномальным по отношению к среднепалеозойским интервалам ТКМП Сибирской платформы (рис. 15, А), разработанным в [Khramov, 1991; Pechersky, Didenko, 1995; Torsvik et al., 2012]. Однако к нему тяготеют позднесилурийские – раннедевонские полюсы [Khramov, 1991; Torsvik et al., 2012], что повышает надежность полученного нами ПМП. Разница во времени, возможно, является следствием отсутствия валидных геохронологических привязок объектов палеомагнитных исследований, неоднозначности интерпретации природы присутствующих в них векторов ЕОН и т.п. Коррелируя своему возрасту, полученный ПМП франа должен занимать положение между полюсами № 1 и № 2 (табл. 5), относящимися, соответственно, к позднедевонской–раннекарбоновой (D_3-C_1) и позднесилурийской–раннедевонской (S_2-D_1) эпохам кимберлитовнедрения Сибирской платформы [Konstantinov, 2014]. Согласно этой последовательности выполнены палеомагнитные реконструкции, которые позволяют уточнить характер движения Сибирской платформы в период с 420 до 325 млн лет (рис. 15, Б). В течение этого периода, продолжительностью примерно 95 млн лет, дрейф Сибирской платформы не был однонаправленным и равномерным. Общий путь, пройденный платформой в девоне, можно разбить на два самостоятельных отрезка. Первый охватывает поздний силур – фран включительно (420–375 млн лет) и характеризуется широтным движением (с 11° до 25° с.ш.) с небольшим северо-западным смещением и разворотом против часовой стрелки (\approx на 25°). Примерная длина пройденного за 45 млн лет отрезка составила 2000 км, а средняя скорость дрейфа – около 4.4 см/год.

Второй отрезок охватывает конец позднего девона – ранний карбон (375–325 млн лет) и характеризуется меридиональным дрейфом Сибирской платформы на восток с небольшим смещением по широте с 25° до 31° с.ш. и вращением по часовой стрелке на угол около 30° (рис. 15, Б). Примерная длина пройденного за 50 млн лет отрезка составила 3350 км, что соответствует средней скорости дрейфа Сибирской платформы около 6.7 см/год. Возможно, относительно ускоренное движение Сибирской платформы в конце позднего девона явилось следствием активизации глубинных тектономагматических процессов, которые привели к широкомасштабному магмообразованию, в том числе и кимберлитообразованию. Одновременно происходила деструкция платформы

³ Нет никаких доказательств структурно-тектонической принадлежности участка работ (Нюйско-Джербинская впадина) «жесткому» Алданскому блоку (примечание авторов).

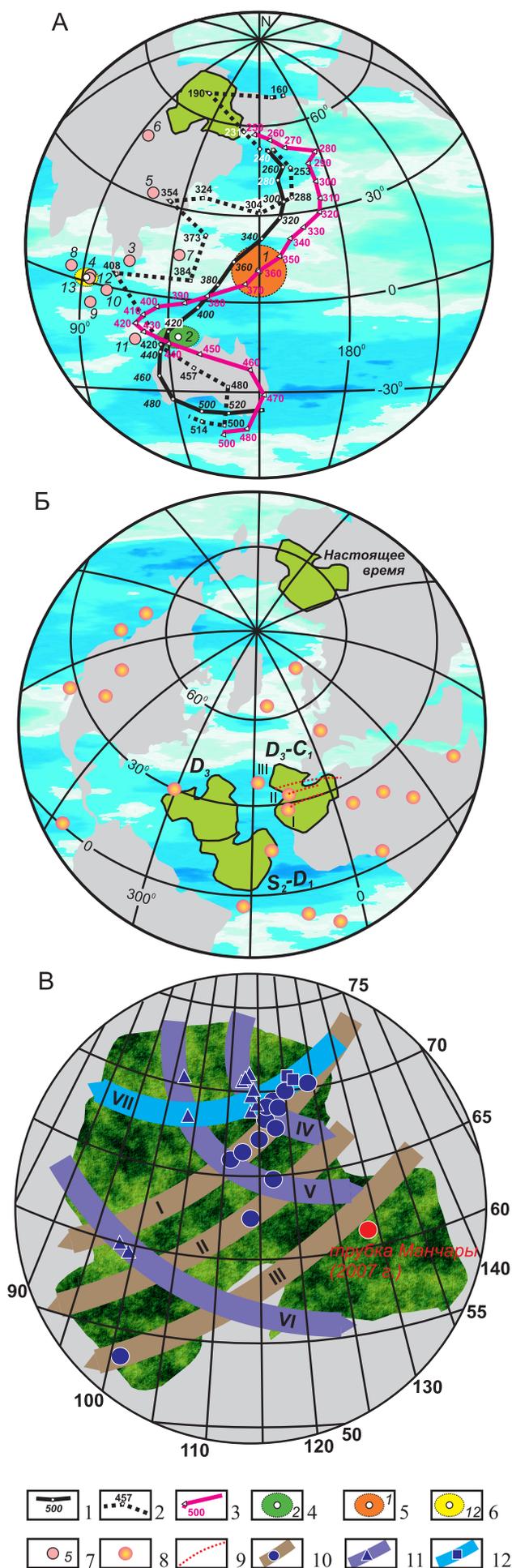


Рис. 15. Интерпретация палеомагнитных данных Сибирской платформы на период поздний силур – ранний карбон (420–325 млн лет).

А – положение среднепалеозойских палеомагнитных полюсов ЯАП; Б – палеомагнитные реконструкции Сибирской платформы; В – геодинамическая модель формирования кимберлитовых полей Сибирской платформы с позиции гипотезы горячих точек по [Zhitkov, 1995]. 1 – ТКМП по [Pechersky, Didenko, 1995]; 2 – ТКМП по [Khranov, 1991]; 3 – ТКМП по [Torsvik et al., 2012]; 4–7 – ПМП среднепалеозойских магматитов ЯАП (номера согласно табл. 5); 4 – ПМП для S₂-D₁ эпохи по [Konstantinov, Stegnitskii, 2012], 5 – ПМП для D₃-C₁ эпохи по [Kravchinsky et al., 2002], 6 – ПМП аппаинской свиты (авторские данные), 7 – прочие полюсы (пояснения см. в тексте); 8 – горячие точки по [Muller et al., 1993]: I – Канарские острова, II – острова Мадейра, III – Азорские острова; 9 – предполагаемый трек горячей точки (детально см. на рис. В); 10 – среднепалеозойские треки: I – Алакит-Куойский, II – Мирнинский, III – Окинский (номера соответствуют горячим точкам на рис. Б); 11 – раннемезозойские треки: IV – Восточно-Анабарский, V – Западно-Анабарский, VI – Чадобецкий; 12 – среднемеозойский трек: VII – Молодинский.

Fig. 15. Interpretation of paleomagnetic data on the Siberian platform for Late Silurian – Early Carbon (420–325 Ma).

A – positions of Middle Paleozoic paleomagnetic poles of YDP; B – paleomagnetic reconstructions of the Siberian platform; B – geodynamic model of the kimberlite fields of the Siberian platform, which is based on the hotspot hypothesis, according to [Zhitkov, 1995]. 1 – APWP from [Pechersky, Didenko, 1995]; 2 – APWP from [Khranov, 1991]; 3 – APWP from [Torsvik et al., 2012]; 4–7 – PMP of Middle Paleozoic magmatites of YDP (numbers according to Table 5); 4 – PMP for S₂-D₁ epoch, according to [Konstantinov, Stegnitskii, 2012], 5 – PMP for D₃-C₁ epoch, according to [Kravchinsky et al., 2002], 6 – PMP of the Appainskaya suite (authors' data), 7 – other poles (please see explanation in the text); 8 – hotspots from [Muller et al., 1993]: I – Canary, II – Madeira, III – Azores Islands; 9 – assumed tracks of hotspots (see details in Fig. 15, B); 10 – Middle Paleozoic tracks: I – Alakit-Kuoysky, II – Mirninsky, III – Okinsky (numbers correspond to the hot spots in Fig. 15, B); 11 – Early Mesozoic tracks: IV – East Anabar, V – West Anabar, VI – Chadobetsky; 12 – Middle Mesozoic track: VII – Molodinsky.

(отделение крупных геоблоков, например Колымского) [Parfenov, Kuzmin, 2001], раскрытие Вилюйского палеорифта [Gurevich, 1984; Pavlov et al., 2008; Konstantinov et al., 2011] и формирование генеральных структур Байкальской складчатой области [Konstantinov, 1998; Kravchinsky et al., 2001; Shatsillo et al., 2014].

Согласно приведенным палеомагнитным реконструкциям (рис. 15, Б), Сибирская платформа в конце девона – начале карбона могла пройти сразу над тремя горячими точками: I – Канарские острова, II – острова Мадейра, III – Азорские острова [Muller et al., 1993]. Возможно, эти горячие точки (по модели [Zhitkov, 1995]) сформировали, соответственно, Мирнинский, Алакит-Куойский и Окинский треки, которые являются кимберлитоконтролирующими (рис. 15, В). Независимым фактом, подтверждающим гипотезу А.Н. Житкова, явилось то, что позднее, в 2007 г., на Алданском блоке была открыта кимберлитовая трубка Манчары (Хомпумайское поле) [Smelov et al., 2010; Mishnin et al., 2010], лежащая чуть южнее северо-восточного окончания Окинского трека. Вероятнее всего, такое отклонение связано с разворотом Алданского блока по часовой стрелке и вызвано раскрытием Вилюйского палеорифта в конце среднего палеозоя.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Палеомагнитными исследованиями в базальтах аппаинской свиты установлены четыре характеристические компоненты векторов ЕОН – А, В, С и D. На основе комплекса геолого-геофизических признаков для каждой из них удалось доказать время и природу образования. В итоге компоненты А (метахронная) и В (вязкая) в работе не рассматриваются, поскольку первая не обоснована ни статистической представительностью, ни геофизическими тестами, а вторая не несет геологической информации.

Компоненты С и D свойственны нижнему стратиграфическому горизонту – потоку палагонитовых плагиофировых базальтов. Природа их первичная, сингенетичная излиянию базальтов. Отличительными признаками их присутствия в базальтах является «осадочный» тип AMS, практически неокисленные титаномагнетиты, положительный тест обращения и др. Установлено, что поток базальтов включает интервалы, снизу вверх: прямой

(компонента D) и обратной (компонента С) полярности, причем нижний интервал потока базальтов (р. Марха) характеризуется относительно повышенными значениями петромагнитных параметров (χ , In, гистерезиса и др.), а верхний (р. Ыгыатта) – пониженными. Все это может указывать на то, что поток плагиофировых палагонитовых базальтов аппаинской свиты должен состоять как минимум из двух разделенных во времени лавовых пачек, образованных разными вулканическими аппаратами. Таким образом, с помощью петро- и палеомагнитных данных уточнено стратиграфическое строение аппаинской свиты, которое, в силу разных причин, не было зафиксировано другими методами геологической съемки.

Полученный в ходе исследований базальтов аппаинской свиты реперный ПМП позволил уточнить палеогеографическое положение Сибирской платформы в позднем девоне (385–375 млн лет). В совокупности с опубликованными реперными ПМП удалось реконструировать дрейф Сибири в среднем палеозое. Характер ее движения в этот период не был однонаправленным и равномерным: преимущественно широтное перемещение платформы с 11 до 25° с.ш. после аппаинского времени сменилось на преимущественно меридиональное восточного направления, а средняя скорость возросла с 4.4 до 6.7 см/год. Не исключено, что после формирования аппаинской свиты (фран) Сибирская платформа могла пройти над тремя горячими точками, представляющими современные атлантические острова у северо-западного побережья Африки: Канарские, Мадейра и Азорские (или северный фланг Африканского суперплюма). Возможно, с воздействием именно этих горячих точек на сибирскую литосферу связано внедрение щелочно-ультраосновных расплавов и формирование кимберлитов в позднедевонскую-раннекарбонную эпоху.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность директору НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) А.В. Герасимчуку за оказанную помощь в проведении исследований. Совершенствованию работы способствовали замечания рецензентов: В.А. Кравчинского, А.В. Шацилло и С.В. Писаревского. Работы выполнены при финансовой поддержке АК «АЛРОСА» (ПАО).

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Akimoto S., 1962. Magnetic properties of FeO-Fe₂O₃-TiO₂ system as a basis of rock magnetism. *Journal of the Physical Society of Japan* 17 (Suppl. B-1.), 84–97.

- Borovikov V.P., 2001. STATISTICA: The Art of Data Analysis by Computer. For Professionals. Piter, St. Petersburg, 658 p. (in Russian) [Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 658 с.].
- Burov B.V., Yasonov P.G., 1979. Introduction to Differential Thermomagnetic Analysis of Rocks. Publishing House of Kazan University, Kazan, 231 p. (in Russian) [Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во Казанского университета, 1979. 231 с.].
- Chumakov N.M., 1959. Stratigraphy and tectonics of the southwestern part of the Vilyui depression. In: Tectonics of the USSR. Vol. 4. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, p. 345–451 (in Russian) [Чумаков Н.М. Стратиграфия и тектоника юго-западной части Вилюйской впадины // Тектоника СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 4. С. 345–451].
- Courtillot V., Kravchinsky V.A., Quidelleur X., Renne P.R., Gladkochub D.P., 2010. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? *Earth and Planetary Science Letters* 300 (3–4), 239–245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.045>.
- Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and composition dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 13 (4), 260–267. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
- Enkin R.J., 1994. A Computer Program Package for Analysis and Presentation of Paleomagnetic Data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, Sidney, 16 p.
- Fisher R.A., 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 217 (1130), 295–305. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
- Gaiduk V.V., 1988. The Viluyi Middle Paleozoic Rift System. Yakutian Branch of SB AS USSR, Yakutsk, 128 p. (in Russian) [Гайдук В.В. Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. 128 с.].
- Giniyatullin I.M., Blazhkun D.V., Ivashina E.I., Korobkov G.V., 1989. The Reference Legend of the Botuoba Series of Sheets of the USSR State Geological Map, Scale 1:500000. Materials for the Legend of the Botuoba Series of Geological Map Sheets, Scale 1:500000. Ed. E.K. Kovrigin. Publishing House of Botuoba GPE, Yakutskgeologia, the USSR Ministry of Geology, Mirny, 70 p. (in Russian) [Гиниятуллин И.М., Блажкун Д.В., Ивашина Е.И., Коробков Г.В. Опорная легенда Ботуобинской серии листов Государственной геологической карты СССР масштаба 1:500000. Материалы к легенде Ботуобинской серии листов геологических карт масштаба 1:500000 / Ред. Е.К. Ковригин. Мирный: Изд-во Ботуобинской ГРЭ ПГО «Якутскгеология» Министерства геологии СССР, 1989. 70 с.].
- Gurevich E.L., 1984. Paleomagnetism of Ordovician sediments in the cross-section at the Moiero river. In: A.N. Khramov (Ed.), *Paleomagnetic Methods in Stratigraphy*. VNIGRI Publishing House, Leningrad, p. 35–41 (in Russian) [Гуревич Е.Л. Палеомагнетизм ордовикских отложений в разрезе на р. Мойеро // Палеомагнитные методы в стратиграфии / Ред. А.Н. Храмов. Л.: Изд-во ВНИГРИ, 1984. С. 35–41].
- Ibragimov Sh.Z., Yasonov P.G., 1999. Thermomagnetic Constraints on the Composition of Titanomagnetites with Exsolution Structures of Magnetite-Ulvospinel. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 35 (11), 962–966.
- Jelínek V., 1997. Measuring Anisotropy of Magnetic Susceptibility on a Slowly Spinning Specimen – Basic Theory. *Agico Print*, № 10, Brno, 27 p.
- Khramov A.N. (Ed.), 1973. *Paleomagnetic Directions and Paleomagnetic Poles. MCD-B Materials. The USSR Reference Data. Vol. 2.* Moscow, 90 p. (in Russian) [Палеомагнитные направления и палеомагнитные полюса. Материалы МЦД-Б. Справочные данные по СССР / Ред. А.Н. Храмов. Вып. 2. М., 1973. 90 с.].
- Khramov A.N. (Ed.), 1975. *Paleomagnetic Directions and Paleomagnetic Poles. MCD-B Materials. The USSR Reference Data. Ed. A.N. Khramov. Vol. 3.* Moscow, 44 p. (in Russian) [Палеомагнитные направления и палеомагнитные полюса. Материалы МЦД-Б. Справочные данные по СССР / Ред. А.Н. Храмов. Вып. 3. М., 1975. 44 с.].
- Khramov A.N., 1991. Standard Series of Paleomagnetic Poles for Plates of Northern Eurasia: Relation to Problems of Paleogeodynamics of the USSR Territory. In: *Paleomagnetism and Paleogeodynamics of the USSR Territory (VNIGRI Proceedings)*. Leningrad, 125 p. (in Russian) [Храмов А.Н. Стандартные ряды палеомагнитных полюсов для плит Северной Евразии: связь с проблемами палеогеодинамики территории СССР // Палеомагнетизм и палеогеодинамика территории СССР (Труды ВНИГРИ). Л., 1991. 125 с.].
- Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevsky S.A., Pogarskaya I.A., Rzhnevsky Yu.S., Rodionov V.P., Slautsits I.P., 1982. *Paleomagnetology*. Nedra, Leningrad, 312 p. (in Russian) [Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.П. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.].
- Khuzin M.Z., Konstantinov K.M., 2015. The artificial magnetic reversal test to determine the magnetic memory of a rock sample. In: *Paleomagnetism and Rock Magnetism: Theory, Practice, Experiment. Proceedings of the International Workshop (Borok, 9–12 November 2015)*. Filigran, Yaroslavl, p. 235–239 (in Russian) [Хузин М.З., Константинов К.М. Тест искусственного перемагничивания по определению магнитной памяти в образце горной породы // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: Материалы международной школы-семинара (Борок, 9–12 ноября 2015 г.). Ярославль: Филигрань, 2015. С. 235–239].
- Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Ivanov A.V., Egorov K.N., 2014. Middle Paleozoic basaltic and kimberlitic magmatism in the northwestern shoulder of the Vilyui Rift, Siberia: relations in space and time. *Russian Geology and Geophysics* 55 (2), 144–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.003>.

- Kolodez'nikov K.E., 1982. Devon and Lower Carbon of the Western Segment of the Vilyui Syncline. Nauka, Moscow, 101 p. (in Russian) [Колодезников К.Е. Девон и нижний карбон западной части Виллюйской синеклизы. М.: Наука, 1982. 101 с.].
- Konstantinov I.K., Khuzin M.Z., Konstantinov K.M., 2011. Paleomagnetic studies of rocks of the Upper Cambrian Verkholensk suite (southern Siberian craton). *Nauka i obrazovanie (Science and Education)* (3), 10–15 (in Russian) [Константинов И.К., Хузин М.З., Константинов К.М. Палеомагнитные исследования пород верхоленьской свиты верхнего кембрия (юг Сибирского кратона) // *Наука и образование*. 2011. № 3. С. 10–15].
- Konstantinov I.K., Konstantinov K.M., Yakovlev A.A., 2013. Petrophysical and paleomagnetic studies of the major structural-material complexes in the Molodo-Popigai fault zone. In: *Paleomagnetism and Magnetism of Rocks: Proceedings of the International Summer School-Workshop*. Kazan, p. 108–113 (in Russian) [Константинов И.К., Константинов К.М., Яковлев А.А. Петрофизические и палеомагнитные исследования основных структурно-вещественных комплексов Молодо-Попигайской зоны разломов // *Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: Материалы международной школы-семинара*. Казань, 2013. С. 108–113].
- Konstantinov K.M., 1998. The Dynamic Physical-Geological Model of the Baikal Folded Region Based on Paleomagnetic Data. Candidate of Sciences Thesis (Geology and Mineralogy). Irkutsk, 18 p. (in Russian) [Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1998. 18 с.].
- Konstantinov K.M., 2006. Solution of problems of geodynamics and volcanism of the Siberian platform based on paleomagnetic data. In: *Volcanism and Geodynamics: Proceedings of the 3rd All-Russia Symposium on Volcanology and Paleovolcanology*. Vol. 1. Publishing House of the Buryatian Scientific Center SB RAS, Ulan Ude, p. 30–33 (in Russian) [Константинов К.М. Решение вопросов геодинамики и вулканизма Сибирской платформы на основе палеомагнитных данных // *Вулканизм и геодинамика: Материалы III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии*. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2006. Т. 1. С. 30–33].
- Konstantinov K.M., 2014. Magnetism of Kimberlites and Trappes in the Junction Zone of the Vilyui and Tunguska Synclines in the Siberian Platform. PhD Thesis (Geology and Mineralogy). Irkutsk State University, Irkutsk, 34 p. (in Russian) [Константинов К.М. Магнетизм кимберлитов и траппов зоны сочленения Виллюйской и Тунгусской синеклиз Сибирской платформы: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2014. 34 с.].
- Konstantinov K.M., Bazhenov M.L., Fetisova A.M., Khutorskoy M.D., 2014a. Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo-Triassic crisis of biosphere. *Earth and Planetary Science Letters* 394, 242–253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>.
- Konstantinov K.M., Gladkov A.S., 2009. Petromagnetic heterogeneities in sintering zones of Permian-Triassic traps of Komsomolsk pipe deposit (Yakutsk diamond province). *Doklady Earth Sciences* 427 (1), 880–886. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09050365>.
- Konstantinov K.M., Ibragimov S.Z., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Artemova E.V., Monkhorov R.V., 2016. Paleomagnetism of pre-kimberlite dykes of dolerites in the Vilyui-Markha fault zone (Yakutian diamondiferous province). *Nauka i Obrazovanie (Science and Education)* (1), 13–20 (in Russian) [Константинов К.М., Ибрагимов Ш.З., Константинов И.К., Яковлев А.А., Артемова Е.В., Монхоров Р.В. Палеомагнетизм докимберлитовых даек долеритов Виллюйско-Мархинской зоны разломов (Якутская алмазоносная провинция) // *Наука и образование*. 2016. № 1. С. 13–20].
- Konstantinov K.M., Khuzin M.Z., Kuz'menok A.N., Savrasov D.I., Tomshin M.D., Kiselev A.I., Gladkochub D.P., 2007. Paleomagnetism of the Middle Paleozoic basites in the zones of influence of the Vilyui and Kyutyungda paleorifts, Siberian platform (the first stage). In: *Paleomagnetism and Rock Magnetism: Theory, Practice, Experiment*. Proceedings of the Workshop (Borok, 18–21 October 2007). GEOS, Moscow, p. 72–76 (in Russian) [Константинов К.М., Хузин М.З., Кузьменок А.Н., Саврасов Д.И., Томшин М.Д., Киселев А.И., Гладкоhub Д.П. Палеомагнетизм среднепалеозойских базитов из зон влияния Виллюйского и Кютюндинского палеорифтов Сибирской платформы (первый этап) // *Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: Материалы семинара (Борок, 18–21 октября 2007 г.)*. М.: ГЕОС, 2007. С. 72–76].
- Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Kovalchuk O.E., 2014b. Petromagnetic heterogeneities of the Permo-Triassic traps of the Daldyn-Alakit diamond province (Western Yakutia). *Litosfera (Lithosphere)* (2), 77–98 (in Russian) [Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермотриасовых траппов Далдыно-Алаakitского алмазоносного района (Западная Якутия) // *Литосфера*. 2014. № 2. С. 77–98].
- Konstantinov K.M., Stegnitskii Y.B., 2012. The late Silurian-Early Devonian natural remanent magnetization of kimberlites and traps in the Yakutian diamondiferous province. *Doklady Earth Sciences* 442 (1), 152–158. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X12010254>.
- Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Cogne J.-P., 2001. Palaeomagnetic study of Vendian and Early Cambrian rocks of South Siberia and Central Mongolia: was the Siberian platform assembled at this time? *Precambrian Research* 110 (1–4), 61–92. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00181-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00181-4).
- Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J.-P., Cherniy S.D., Mishenin S.G., Parasotka B.S., 2002. Paleomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and paleogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma. *Geophysical Journal International* 148 (1), 1–33. <http://dx.doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01548.x>.

- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A., 2010. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province. *Earth-Science Reviews* 102 (1–2), 29–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.004>.
- Macmillan S., Maus S., Bondar T., Chambodut A., Golovkov V., Holme R., Langlais B., Lesur V., Lowes F., Lühr H., Mai W., Manda M., Olsen N., Rother M., Sabaka T., Thomson A., Wardinski I., 2003. The 9th-Generation International Geomagnetic Reference Field. *Geophysical Journal International* 155 (3), 1051–1056. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2003.02102.x>.
- Masaitis V.L., Mikhailov M.V., 1968. The Middle Paleozoic volcano-sedimentary series of the Ygyatta depression (the eastern segment of the Siberian platform). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (4), 43–53 (in Russian) [Масайтус В.Л., Михайлов М.В. Среднепалеозойская вулканогенно-осадочная серия Ыгыаттинской впадины (восточная часть Сибирской платформы) // *Геология и геофизика*. 1968. № 4. С. 43–53].
- Mashchak M.S., Naumov M.V., 2004. The Middle Paleozoic basite magmatism of the Nakyn kimberlite field and the problem of the age of kimberlites. In: Effectiveness of prediction and prospecting of diamond deposits: past, present, and future (ALMAZY-50): Proceedings of the scientific-practical conference dedicated to the 50th anniversary of the discovery of Zarnitsa, the first diamond pipe. RF MNR, VSEGEI, ALROSA, St. Petersburg, p. 224–226 (in Russian) [Мащак М.С., Наумов М.В. Среднепалеозойский базитовый магматизм Накынского кимберлитового поля и проблема возраста кимберлитов // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (АЛМАЗЫ-50): Материалы научно-практической конференции, посвященной пятидесятилетию открытия первой алмазоносной трубки «Зарница». СПб.: МПР РФ, ВСЕГЕИ, «АЛРОСА», 2004. С. 224–226].
- McFadden P.L., McElhinny M.W., 1990. Classification of reversal test in paleomagnetism. *Geophysical Journal International* 103 (3), 725–729. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>.
- Mishnin V.M., Andreev A.P., Bekrenev K.A., Altukhova Z.A., 2010. The Yakutian buried uplift: injected kimberlites and their tectonic frame. *Nauka i Obrazovanie (Science and Education)* (2), 11–15 (in Russian) [Мишин В.М., Андреев А.П., Бекренев К.А., Алтухова З.А. Якутское погребенное поднятие: инъецированные кимберлиты и их тектоническая рама // *Наука и образование*. 2010. № 2. С. 11–15].
- Muller R.D., Royer J.-Y., Lawver L.A., 1993. Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hotspot tracks. *Geology* 21 (3), 275–278. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0275:RPMRTT>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0275:RPMRTT>2.3.CO;2).
- Oleinikov B.V., 1973. Features of the composition and facies conditions of formation of basalts in the Ygyatta depression. In: V.V. Kovalsky, B.V. Oleinikov (Eds.), *Geology and geochemistry of basites in the Eastern segment of the Siberian platform*. Nauka, Moscow, p. 87–91 (in Russian) [Олейников Б.В. Особенности состава и фациальные условия образования базальтов Ыгыаттинской впадины // *Геология и геохимия базитов восточной части Сибирской платформы* / Ред. В.В. Ковальский, Б.В. Олейников. М.: Наука, 1973. С. 87–91].
- Orlov S.Yu., Shatsillo A.V., 2011. Paleomagnetic data on the Middle Paleozoic magmatic complexes of the Appainskaya and Emyaksinskaya suites in the Ygyatta depression (Siberian platform). In: *Paleomagnetism and rock magnetism: theory, practice, experiment. Proceedings of the Workshop (Borok, 27–30 October 2011)*. GEOS, Moscow, p. 146–151 (in Russian) [Орлов С.Ю., Шацилло А.В. Палеомагнитные данные по среднепалеозойским магматическим комплексам в составе аппайнской и эмяксинской свит Ыгыаттинской впадины (Сибирская платформа) // *Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. Материалы семинара (Борок, 27–30 октября 2011 г.)*. М.: GEOS, 2011. С. 146–151].
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I. (Ed.), 2001. *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Republic of Sakha (Yakutia)*. MAIK Nauka/Interperiodika, Moscow, 517 p. (in Russian) [Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 517 с.].
- Pavlov V., Bachtadse V., Mikhailov V., 2008. New Middle Cambrian and Middle Ordovician palaeomagnetic data from Siberia: Llandelian magnetostratigraphy and relative rotation between the Aldan and Anabar–Angara blocks. *Earth and Planetary Science Letters* 276 (3–4), 229–242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.021>.
- Pechersky D.M., Didenko A.N., 1995. *The Paleoasian Ocean: Petro-magnetic and Paleomagnetic Information on Its Lithosphere*. UIPE RAS, Moscow, 298 p. (in Russian) [Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 298 с.].
- Pechersky D.M., Sokolov D.D., 2010. *Paleomagnetology, petromagnetologiya and geology. Reference Dictionary for neighbors in the specialty*. IPE RAS, Moscow (in Russian) [Печерский Д.М., Соколов Д.Д. Палеомагнитология, петромагнитология и геология. Словарь-справочник для соседей по специальности. М.: ИФЗ РАН, 2010]. Available at <http://paleomag.ifz.ru>.
- Powerman V., Shatsillo A., Coe R., Zhao X., Gladkochub D., Buchwaldt R., Pavlov V., 2013. Palaeogeography of the Siberian platform during middle Palaeozoic Times (~450–400 Ma): new palaeomagnetic evidence from the Lena and Nyuya rivers. *Geophysical Journal International* 194 (3), 1412–1440. <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggt197>.
- Ricci J., Quidelleur X., Pavlov V., Orlov S., Shatsillo A., Courtillot V., 2013. New ⁴⁰Ar/³⁹Ar and K-Ar ages of the Viluy traps (Eastern Siberia): Further evidence for a relationship with the Frasnian-Famennian mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386, 531–540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.020>.
- Shatsillo A.V., Fedyukin I.V., Powerman V.I., 2014. Paleomagnetism of the Late Paleozoic granites of the Angara-Vitim batholith and the host rocks of the Baikal-Patom folded area: tectonic implications. *Russian Geology and Geophysics* 55 (7), 864–880. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2014.06.006>.

- Shipunov S.V., 1988. Identification of components of multicomponent NRM in paleomagnetic studies. In: Paleomagnetism and accretion tectonics. VNIIGRI, Leningrad, p. 173–185 (in Russian) [Шипунов С.В. Выделение компонент многокомпонентной естественной остаточной намагниченности при палеомагнитных исследованиях // Палеомагнетизм и аккреционная тектоника. Л.: ВНИГРИ, 1988. С. 173–185].
- Smelov A.P., Andreev A.P., Altukhova Z.A., Babushkina S.A., Bekrenev K.A., Zaitsev A.I., Izbekov E.D., Koroleva O.V., Mishnin V.M., Okrugin A.V., Oleinikov O.B., Surnin A.A., 2010. Kimberlites of the Manchary pipe: a new kimberlite field in Central Yakutia. *Russian Geology and Geophysics* 51 (1), 121–126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.012>.
- Tarling D.H., Hrouda F., 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman & Hall, London, 217 p.
- Tomshin M.D., 2000. Features of deep differentiation of basites in the Vilyui paleorift (Siberian platform). In: Petrography at the Turn of the 21st Century. Results and Prospects. Vol. I. Syktyvkar, p. 203–205 (in Russian) [Томшин М.Д. Особенности глубинной дифференциации базитов Вилюйского палеорифта (Сибирская платформа) // Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Сыктывкар, 2000. Т. I. С. 203–205].
- Tomshin M.D., Brahfogel F.F., Oleinikov B.V., Kopylova A.G., 1973. The facies composition of trappe xenoliths from kimberlite breccia and the age of pipes in the Malobotuobinsk region. In: Geology and geochemistry of basites in the Eastern segment of the Siberian Platform. Nauka, Moscow, p. 96–104 (in Russian) [Томшин М.Д., Брахфогель Ф.Ф., Олейников Б.В., Копылова А.Г. Фациальный состав ксенолитов траппов из кимберлитовых брекчий и возраст трубок Малоботуобинского района // Геология и геохимия базитов восточной части Сибирской платформы. М.: Наука, 1973. С. 96–104].
- Tomshin M.D., Konstantinov K.M., Prokopiev A.V., 2016. Middle Paleozoic Vilyui paleorift and sequence of magmatic events. In: Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from ocean to continent). Issue 14. Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, p. 277–279 (in Russian) [Томшин М.Д., Константинов К.М., Прокопьев А.В. Среднепалеозойский вилюйский палеорифт и последовательность магматических событий // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 14. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 277–279].
- Tomshin M.D., Travin A.V., Konstantinov K.M., 2015. The sequence of magmatic events within the Nakyn kimberlite field. In: Large igneous provinces, mantle plumes and metallogeny in the Earth's History (Abstract Volume) (Irkutsk – Listvyanka, September 1–8, 2015). Publishing House of V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, p. 128–129.
- Tomshin M.D., Zaitsev A.I., Zemnukhov A.L., Kopylova A.G., 2004. The origin of basites in the Nakyn kimberlite field in Yakutia. *Otechestvennaya Geologiya (Russian Geology)* (5), 44–49 (in Russian) [Томшин М.Д., Зайцев А.И., Земнухов А.Л., Копылова А.Г. Характер становления базитов в Накыньском кимберлитовом поле Якутии // Отечественная геология. 2004. № 5. С. 44–49].
- Torsvik T.H., van der Voo R., Preeden U., Niocaill C.M., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks R.M., 2012. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews* 114 (3–4), 325–368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
- Van der Voo R., 1993. Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys, and Iapetus oceans. Cambridge University Press, Cambridge, 411 p.
- Vinarsky Ya.S., Zhitkov A.N., Kravchinsky A.Ya., 1987. Automated Paleomagnetic Data Processing System OPAL. Algorithms and Software. Issue 10 (99). VIEMS, Moscow, 86 p. (in Russian) [Винарский Я.С., Житков А.Н., Кравчинский А.Я. Автоматизированная система обработки палеомагнитных данных ОПАЛ. Алгоритмы и программы. Вып. 10(99). М.: ВИЭМС, 1987. 86 с.].
- Zaitsev A.I., Smelov A.P., 2010. Isotope Geochronology of Kimberlite Rock Formation in Yakutian Province. Offset, Yakutsk, 108 p. (in Russian) [Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск: Офсет, 2010. 108 с.].
- Zhitkov A.N., 1995. Paleokinematics and pattern of kimberlite fields location on the Siberian platform based on the hypothesis of hot spots. In: Extended abstracts Sixth International kimberlite conference. Novosibirsk, p. 692–694.
- Zijderveld J.D.A., 1967. Demagnetization of rocks, analysis of results. In: D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn (Eds.), *Methods in paleomagnetism*. Elsevier, Amsterdam, p. 254–286.



Константинов Константин Михайлович, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО) 678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: 8(411-36)91029; e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru

Konstantinov, Konstantin M., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: 8(411-36)91029; e-mail: KonstantinovKM@alrosa.ru



Томшин Михаил Дмитриевич, канд. геол.-мин. наук, с.н.с., зав. лабораторией
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН
677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия
e-mail: tmd@diamond.ysn.ru

Tomshin, Mikhail D., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Head of Laboratory
Institute of Diamond and Precious Metals Geology, Siberian Branch of RAS
39 Lenin prospect, Yakutsk 677980, Russia
e-mail: tmd@diamond.ysn.ru



Ибрагимов Шамиль Зарифович, канд. геол.-мин. наук, доцент кафедры геофизики
Институт геологии и нефтегазовых технологий
Казанский (Приволжский) федеральный университет
420111, Казань, ул. Кремлевская, 4/5, Россия
Тел.: 89600347640; e-mail: Shamil.Ibragimov@kpfu.ru

Ibragimov, Shamil Z., Candidate of Geology and Mineralogy, assistant professor department of Geophysics
Institute of Geology and Petroleum Technologies
Kazan (Volga Region) Federal University
4/5 Kremlyovskaya street, Kazan 420111, Russia
Tel.: 89600347640; e-mail: Shamil.Ibragimov@kpfu.ru



Хузин Марат Зинурович, ведущий инженер
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
e-mail: risa_mara@mail.ru

Huzin, Marat Z., Leading Engineer
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: risa_mara@mail.ru



Константинов Иннокентий Константинович, старший лаборант
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
e-mail: geologiaforever@mail.ru

Konstantinov, Innokentiy K., senior laboratory assistant
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: geologiaforever@mail.ru



Яковлев Андрей Андреевич, м.н.с.
Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия
e-mail: Yandrey1989@mail.ru

Yakovlev, Andrey A., junior researcher
Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia
e-mail: Yandrey1989@mail.ru



Артемова Елена Владимировна, инженер
Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО)
678174, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия
e-mail: ArtemovaEV@alrosa.ru

Artemova, Elena V., engineer
Geological Enterprise of Exploration, Public Joint Stock Company «ALROSA»
16 Chernychevskoe highway, Mirny 678174, Russia
e-mail: ArtemovaEV@alrosa.ru