УДК 550.38435:551.71 (470.22)

H.B. Лубнина¹, **B.C.** Захаров²

ОЦЕНКА ВКЛАДА ВТОРИЧНЫХ МЕТАХРОННЫХ КОМПОНЕНТ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ДОКЕМБРИЙСКИЕ ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ПОЛЮСЫ КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА³

Проанализированы вторичные (метахронные) компоненты намагниченности, выделенные в докембрийских комплексах Карельского кратона. Рассчитаны изменения среднего направления высокотемпературной компоненты (отклонения от истинного направления) в зависимости от вклада вторичных компонент намагниченности, возникших в результате разновозрастных тектоно-магматических событий. Показано, что докембрийские ключевые полюсы часто совпадают с векторной суммой разновозрастных фанерозойских компонент намагниченности. Вывод о первичной/вторичной природе докембрийских палеомагнитных полюсов необходимо устанавливать на основе комплексных петро-палеомагнитных и изотопных данных и геологических корреляций, а не только тестов палеомагнитной надежности.

Ключевые слова: докембрийский палеомагнитный полюс, Карельский кратон, палеомагнетизм, перемагничивание, ключевой полюс, вторичные компоненты намагниченности.

The secondary (metachronous) component of magnetization isolated in the Precambrian complexes of the Karelian craton have been analyzed. The mean directions of high temperature components (deviations from the true direction) depending on the contribution of secondary magnetization components resulting from uneven-aged tectono-magmatic events. It has been shown that the Precambrian key poles often coincide with the vector sum of the ages of Phanerozoic component of magnetization. The conclusion about the primary/secondary origin of the Precambrian paleomagnetic poles must be set on the basis of the integrated petro-paleomagnetic and isotopic data and geological correlations, not only tests of paleomagnetic reliability.

Key words: Precambrian paleomagnetic pole, Karelian craton, paleomagnetism, remagnetisation, key pole, overprint components.

Введение. Палеомагнитные полюсы традиционно используют для построения магнитно-тектонических реконструкций, а также для расчета кинематических параметров движения плит (скорость перемещения и вращение на сфере). При этом корректная корреляция магнитно-тектонических реконструкций с геологическими данными во многом зависит от качества используемых палеомагнитных данных. Разработаны критерии надежности палеомагнитных полюсов для фанерозоя [Van der Voo, 1990] и докембрия [Buchan et al., 2000]. Один из значимых критериев этих шкал доказательство времени приобретения породами различных по возрасту компонент намагниченности. В качестве базовой оценки качества палеомагнитного полюса взяты тесты палеомагнитной надежности. Для магматических комплексов это прежде всего тест контакта и тест обращения, а для осадочных пород, помимо теста обращения, применяются еще тесты складки и конгломератов. Положительные тесты контакта и конгломератов свидетельствуют, что высокотемпературная компонента намагниченности образовалась в момент формирования пород. Определив на основании независимых изотопных данных возраст пород, получаем достоверную информацию о времени приобретения породами компоненты намагниченности. А опробовав достаточное количество (не менее 10, согласно критериям палеомагнитной надежности) близких по возрасту комплексов (например дайковых тел), можно рассчитать надежный или ключевой палеомагнитный полюс [Buchan et al., 2000].

Сложнее обстоит дело с определением времени приобретения породами метахронной вторичной компоненты намагниченности. Отрицательный тест обращения свидетельствует о неполном разделении разновозрастных компонент намагниченности, т.е. о невозможности корректно вычленить вторичную, более позднюю компоненту намагниченности. Даже если компоненты корректно разделяются в ходе магнитных чисток, время образования вторичной компоненты намагниченности оценивается по сходству/близости с палеомагнит-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор; *e-mail*: natalia.lubnina@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии; университет «Дубна», кафедра общей и прикладной геофизики, профессор; *e-mail*: zakharov@geol.msu.ru

³ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 17-05-01270) и на приборах, закупленных по Программе развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

ными полюсами, полученными ранее для того же тектонического блока. Получается логическая круговая оценка, когда возраст намагниченности «датируется» по палеомагнитным полюсам. Но один из первых критериев надежности по Р. Ван дер Ву [1990] и К. Бакену — получение палеомагнитного полюса для пород, возраст которых определен изотопными методами. Для докембрийских магматических комплексов это в первую очередь U-Pb-датировки по магматическим цирконам и бадделеиту, а также Ar-Ar-датирование расслоенных интрузий.

В последнее время предприняты попытки оценить время приобретения породами вторичных компонент намагниченности на основании U-Pb-датировок по рутилам и сфенам, поскольку значения температуры закрытия изотопных систем этих минералов ниже значений температуры Кюри основных минералов-носителей намагниченности, а также с помощью Rb—Sr- и Ar—Ar-датирования пород (см. обзор в [Lubnina et al., 2015]). Однако прямая корреляция между временем закрытия какой-либо изотопной системы и образованием вторичной компоненты намагниченности пока не установлена.

Вместе с тем не менее важный критерий надежного палеомагнитного полюса — несовпадение с более молодыми палеомагнитными полюсами для того же тектонического блока. Такое ограничение отрицает наличие петель в траекториях кажущейся миграции полюса (ТКМП), поскольку самопересечение ТКМП означает одинаковое положение разновозрастных полюсов, а также - косвенно — образование устойчивых конфигураций, например NENA (North Europe-North Atlantic) для докембрия и Евроамерика (Лавруссия) для фанерозоя. Однако независимые геологические корреляции без привлечения палеомагнитных данных свидетельствуют об обратном. Возникают закономерные вопросы: какой вклад в первичную докембрийскую намагниченность вносят более поздние тектоно-магматические события; можно ли корректно их все разделить или какие-то из них затушевываются, и неизбежно приходится иметь дело лишь с их векторной суммой; возможно ли, что какие-то события не приводят хотя бы к частичному существенному перемагничиванию пород; насколько далеко распространяется в пределы кратона влияние тех или иных тектоно-магматических событий и насколько далеко перемагничиваются породы в результате таких изменений?

Анализ докембрийских «надежных» полюсов Карельского кратона и фанерозойских палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы (рис. 1). В настоящее время в Глобальной палеомагнитной базе данных [Pisarevsky, 2005; Vekkolainen et al., 2014] из докембрийских определений 432 получено для Восточно-Европейского (Карельского) кратона (BEK), из них для Украинского щита — 38 единичных определений, Воронежского массива — 2, Южного и Полярного Урала — 56, из них лишь для 7 определений первичная природа вектора естественной остаточной намагниченности подтверждена полевыми тестами палеомагнитной надежности.

Выполненная в 2000 г. ревизия всех накопленных к тому моменту палеомагнитных данных для ВЕК и Лаврентии позволила К. Бакену с соавторами предложить концепцию ключевых полюсов [Buchan et al., 2000]. Кроме того, были выделены неключевые, но надежные полюсы, которые в случае отсутствия ключевых полюсов в интервале, превышающем 50 млн лет, также можно использовать для построения реконструкций.

Фанерозойские палеомагнитные полюсы Восточно-Европейской платформы. В системе глобальных палеотектонических реконструкций положение Восточно-Европейской платформы (ВЕП или Балтики) в венде-палеозое определяется на основании единичных палеомагнитных полюсов, полученных по осадочным объектам, возраст которых (а соответственно, и время приобретения породами характеристических компонент намагниченности) определен стратиграфически [Smethurst et al., 1998]. Большинство отрезков ТКМП было построено на основе интерполяции, при этом их геометрия во многом определялась набором использованных данных и способом осреднения (метод скользящего окна, сплайнов или наиболее надежных полюсов с учетом их веса или значимости). Выполненный С.В. Шипуновым с соавторами анализ палеозойских частей ТКМП ВЕП показал, что вне зависимости от количества использованных данных и способа построения ТКМП все траектории пересекаются в узловых точках, образуя четыре кластера: 370-402, 330-350, 262-283 и 240-261 млн лет [Шипунов и др., 2007]. При этом возраст палеомагнитных полюсов коррелирует по времени с тектоно-магматическими событиям в пределах ВЕП и основными этапами перемагничивания пород ВЕП в фанерозое [Лубнина, 2009; Bazhenov et al., 2016].

Разновозрастные вторичные компоненты намагниченности, выделенные в докембрийских и фанерозойских комплексах Фенноскандии. Многолетние палеомагнитные исследования докембрийских и фанерозойских комплексов одного из сегментов Восточно-Европейского кратона — Фенноскандии — показали присутствие в породах помимо современной вязкой еще как минимум одной метахронной вторичной компоненты намагниченности (см. обзор в [Лубнина, 2009]). Для большинства докембрийских и фанерозойских объектов эта компонента выделяется в средне- или высокотемпературном интервале. Вторичная природа метахронных компонент определена на основании отрицательных тестов палеомагнитной надежности и/или совпадения с более молодыми полюсами



Рис. 1. Палеоширотное положение Карельского кратона на различных этапах его неоархейско-неопротерозойской истории. Цифрами показан возраст докембрийских ключевых полюсов. Буквенные обозначения ключевых полюсов см. в табл. 1

ВЕП (рис. 2). При этом предполагается, что в ходе перемагничивания первичная компонента намагниченности либо полностью разрушается, либо присутствует в виде неразделимой суммы компонент намагниченности в высокотемпературном интервале.

Традиционно различают термовязкое и химическое перемагничивание пород, зависящие от сочетания *P*–*T*-режима и наличия флюидов, приводящих либо к частичному, либо к полному распаду минерала-носителя и/или к образованию новой минеральной фракции. В пределах Фенноскандии такие условия перемагничивания связывают либо с миграцией флюидов при посторогенном коллапсе, либо с воздействием мантийных суперплюмов [Лубнина, 2009].

Перемагничивание, связанное с действием мантийных суперплюмов. Проявление мантийного суперплюма на поверхности в настоящее время реконструируется по радиальным, преимущественно долеритовым роям дайковых тел [Ernst, Buchan, 1997]. В целом режим мантийного суперплюма характеризуется высокими температурными воздействиями (значительно превышающими точки Кюри магнитных минералов) при низких значениях давления, присутствием флюидов CO₂, CH₄ и отсутствием H₂O. Возникающая при этом монополярная компонента намагниченности имеет тер-



Рис. 2. Сопоставление докембрийских ключевых полюсов Карельского кратона и палеопротерозойских—фанерозойских полюсов перемагничивания с референтной фанерозойской Траекторией кажущейся миграции полюса Восточно-Европейского кратона, по [Smethurst et al., 1998]: 1 — фанерозойская траектория кажущейся миграции полюса для Восточно-Европейского кратона, по [Smethurst et al., 1998]; 2 — докембрийские ключевые полюсы Карельского кратона; 3 — палеомагнитные полюсы, пересчитанные с палеопротерозойских — палеозойских вторичных компонент намагниченности Карельского кратона; 4 — палеомагнитные полюсы глобальных фанерозойских перемагничиваний пород Восточно-Европейского кратона; 4 — палеомагнитные полюсы глобальных фанерозойских перемагничиваний пород Восточно-Европейского кратона. Цифры в кружках — возраст палеомагнитных полюсов. Буквенные обозначения ключевых полюсов для Карельского кратона см. табл. 1, вторичных компонент и глобального перемагничивания — в табл. 2 и 3 соответственно

мовязкую природу, а в зависимости от сочетания длительности и температуры воздействия она может быть как средне-, так и высокотемпературной.

Выделяются характерные времена проявления суперплюмового магматизма в пределах ВЕП: 2,50–2,45 и 1,27–1,20 млрд лет назад (л.н.), 380–360 и 250–245 млн л.н. (рис. 3, 4). Рассмотрим влияние мантийных суперплюмов на намагниченность пород Фенноскандии.

Период 2,50–2,45 млрд л.н. Перемагничивание пород этого возраста достаточно широко распространено в Фенноскандии (рис. 3) и наиболее характерно для архейских комплексов Водлозерского блока Карельского кратона, где чаще всего выражено в виде низко-среднетемпературной компоненты намагниченности [Fedotova et al., 1999; Mertanen et al., 2006]. Вторичная компонента в изученных породах монополярна и имеет юго-восточное склонение и умеренно положительное наклонение (рис. 4). Указание на возможное вторичное перемагничивание в интервале 2,5–2,4 млрд лет подтверждается данными ⁴⁰Ar/³⁹Ar-датирования, свидетельствующими о метаморфизме вмещающих архейских гнейсов в районе Бураковской интрузии Карельского кратона около 2,4 млрд лет [Mertanen et al., 2006].

Период 1,27–1,25 млрд л.н. Компонента северовосточного склонения и умеренно отрицательного наклонения часто выделяется только при исследованиях докембрийских комплексов Фенноскандинавского сегмента Восточно-Европейского кратона [Арестова и др., 2007; Лубнина, 2009; Fedotova et al., 1999]. Монополярная компонента разрушается при средних значениях температуры и





Рис. 4. Корреляция времени перемагничивания пород с главными сооытиями тектонической эволюции Восточно-Европейского кратона, по [Bogdanova et al., 2016] с дополнениями: 1-4 — тектонические события: 1 — аккреция и рост континентальной коры; 2 — главные коллизионные события; 3 — постколлизионный магматизм (AMCG, А-тип, бимодальный); 4 — главные рифтогенные и плюмовые события; 5-8 — перемагничивание пород: 5 — полное перемагничивание, одна полярность; 6 — полное перемагничивание, две полярности; 7 — частичное перемагничивание, две полярности; 8 — частичное перемагничивание, одна полярность

переменных полей при магнитных чистках. Палеомагнитные полюсы, пересчитанные с направлений этих компонент, лежат на тренде докембрийских полюсов ВЕК и различаются по долготе на ~30° (рис. 2). Время образования этой компоненты намагниченности в докембрийских комплексах Фенноскандии коррелирует с проявлением мантийного суперплюма Маккензи 1,27–1,25 млрд л.н. [Ernst, Buchan, 1997] и оценивается по ключевым полюсам ВЕК, полученным при изучении даек Центрально-Скандинавской долеритовой группы [Buchan et al., 2000].

Период 380—360 млн л.н. Компонента восток-северо-восточного склонения и низкого положительного наклонения выделена в девонских щелочных дайках Кольского п-ова [Веселовский и др., 2013]. Вместе с тем при изучении докембрийских и палеозойских комплексов ВЕК, расположенных преимущественно в центральной части кратона, в среднетемпературном интервале выделяется компонента аналогичного направления (рис. 3). Ее образование связывают с девонской тектоно-магматической активизацией в Днепрово-Донецком, Среднерусском, Пачелмском и Кандалакшском авлакогенах в результате действия мантийного суперплюма в период 380—360 млн л.н. [Лубнина, 2009].

Период 150-145 млн л.н. Компонента северовосточного склонения и крутого положительного наклонения широко распространена в пределах ВЕП (рис. 2, 3). Она выделяется в среднетемпературном интервале и монополярна, присутствует практически во всех осадочных разрезах Ленинградской области, Эстонии, Подолии, магматических комплексах Северного Приладожья, мезопротерозойских дайках Центральной Швеции и др. (см. обзор в [Lubnina et al., 2015]). Образование этой компоненты связывают с образованием и распадом суперконтинента Пангея вследствие воздействия мантийного суперплюма (рис. 4) [Лубнина, 2009; Веселовский и др., 2013] и ссылки в этих работах.

Перемагничивание, возникшее в результате посторогенного коллапса. Коллапс коллизионных систем возникает вследствие гравитационной неустойчивости аномально мощной континентальной коры, возникающей в процессе коллизии. В результате происходит коллапс в режиме растяжения при резком понижении давления и температуры в течение небольшого промежутка времени. Возникающая при таком режиме намагниченность имеет термовязкую природу (резкое падение температуры ниже точки Кюри минералов-носителей намагниченности за короткий интервал времени) и полностью уничтожает первичную намагниченность, образованную в момент формирования пород. Новообразованная вторичная компонента монополярна и чаще всего единственная при компонентном анализе, за исключением вязкой (современной) компоненты намагниченности. В пределах Восточно-Европейского кратона вторичная компонента намагниченности такого генезиса установлена в пределах Беломорского подвижного пояса, вдоль фронта каледонид и уралид и имеет локальное распространение (рис. 3).

Вместе с тем коллапс сопровождается большим количеством флюидов, воздействие которых может продолжаться в течение десятков миллионов лет после основного этапа коллизии. Воздействие флюидов различного состава приводит к образованию новых минералов-носителей намагниченности в результате окисления первичных минералов и приобретению породами вторичной (метахронной) компоненты намагниченности. Новообразованная компонента может быть как моно-, так и биполярна (рис. 3, 4). При этом направление векторов естественной остаточной намагниченности, отвечающих различным минералам-носителям, практически совпадают между собой. Вторичная компонента может образовываться до-, в процессе и после складчатости. Подчеркнем, что время приобретения вторичной (метахронной) компоненты намагниченности может «запаздывать» на несколько десятков миллионов лет по сравнению с главной фазой посторогенного коллапса.

Образование вторичной намагниченности в ходе посторогенного коллапса и воздействия флюидов рассмотрено на примере Беломорского подвижного пояса и Уральского складчатого пояса (рис. 3).

Период 1,95–1,85 млрд л.н. Палеомагнитные определения, в которых возраст вторичной намагниченности оценивается в 1,95–1,70 млрд л.н., образуют два кластера (рис. 3). К первому относятся определения, в которых выделяемая в высокотемпературном интервале вторичная компонента северо-западного склонения и умеренно положительного наклонения — единственная. Компонента монополярна, основной ее носитель представлен магнетитом. Средние направления этой компоненты достаточно кучно группируются на докембрийской ТКМП Карельского кратона (рис. 2).

В среднетемпературном интервале, помимо высокотемпературной компоненты, выделяется компонента близкого направления, но несколько «размазанная» на тренде докембрийских полюсов Восточно-Европейского кратона (рис. 2). При этом среднее направление для Лапландско-Кольского орогена отличается от среднего направления для Карельского кратона [Fedotova et al., 1999; Lubnina et al., 2015]. На обоих трендах для Лапландско-Кольского орогена и Карельского кратона отмечается также закономерное смещение палеомагнитных полюсов с севера-востока на юго-запад [Lubnina et al., 2015].

Перемагничивание этого возраста связывают с миграцией орогенных гидротермальных флюидов во время коллизионных событий основного этапа (рис. 3, 4). Также отметим, что большинство ятулийских (2,3–2,1 млрд лет) пород в Фенноскандии полностью перемагничено именно в этот этап эволюции Карельского кратона. Период 300–250 млн л.н. Длительность образования вторичной компоненты в докембрийских породах при коллапсе и последующем воздействии флюидов оценено на основании палеомагнитных результатов для разновозрастных комплексов западного склона Южного Урала (Башкирский антиклинорий) [Лубнина, 2009]. Показано, что образование вторичной высокотемпературной компоненты намагниченности происходило в интервале 300–250 млн л.н., при этом фронт перемагничивания мигрировал с юго-востока на северо-запад [Шипунов и др., 2007].

Компьютерное моделирование. Для оценки влияния вклада различных компонент на результирующее значение и направление намагниченности была создана специальная компьютерная программа. Она позволяет по заданным значениям нескольких компонент намагниченности (длина компоненты (J), ее склонение (D) и наклонение (I)) определить итоговый (суммарный) вектор намагниченности.

При определении результирующей намагниченности применяется следующий подход. Поскольку намагниченность представляет собой вектор, для получения суммарной величины необходимо провести векторное сложение отдельных компонент [Шипунов, 2000]. Для этого

1) нужно перейти от представления всех компонент намагниченности в локальной сферической системе координат (J, D, I) к декартовой прямоугольной (X, Y, Z):

$$X_i = J_i \cos I_i \cos D_i,$$

$$Y_i = J_i \cos I_i \cos D_i,$$

$$Z_i = J_i \sin I_i,$$

где i = 1, 2, ..., N — номера суммируемых компонент;

2) необходимо суммировать компоненты. Суммарный вектор $R_S = (x_S, y_S, z_S)$ будет иметь длину, которая находится по формуле

$$R_{S}^{2} = x_{S}^{2} + y_{S}^{2} + z_{S}^{2}$$

,

где

$$x_{S} = \sum_{i=1}^{N} X_{i}, y_{S} = \sum_{i=1}^{N} Y_{i}, z_{S} = \sum_{i=1}^{N} Z_{i}$$

декартовы координаты векторной суммы, также необходимо выделить направление, определяемое результирующим склонением (D_S) и наклонением (I_S):

$$D_s = \operatorname{arctg} \frac{y_s}{x_s}, \ I_s = \operatorname{arcsin} \frac{z_s}{R_s}$$

Программа позволяет варьировать вклад абсолютной величины каждой компоненты (при фиксированном значении склонения и наклонения), что дает возможность наглядно выявить влияние этих вариаций на результирующий вектор намагниченности.

Для оценки вклада в результирующую намагниченность наиболее распространенных в докембрийских и фанерозойских комплексах ВЕК разновозрастных вторичных компонент намагниченности (табл. 1, 2 и 3), проводилось тестовое исследование их взаимного влияния от 0 до 100% с шагом 5% во всевозможных комбинациях. Кроме того, для определения степени и характера влияния разновозрастных вторичных фанерозойских компонент намагниченности на первичные ключевые направления докембрийского возраста предпринята попытка определить возможные комбинации (суммы компонент) методом простого перебора: считалось, что в результате вторичных процессов могла частично сохраниться первичная компонента намагниченности (их средние направления взяты из табл. 1), на которую наложена одна из вторичных фанерозойских компонент намагниченности (средние направления взяты из табл. 3).

Результаты сложения наиболее характерных разновозрастных вторичных компонент намагниченности в зависимости от вклада каждой компоненты представлены на рис. 5.

Результаты исследований и их обсуждение. Разновозрастные вторичные компоненты намагниченности образуют на стереограмме два кластера (рис. 5): к первому кластеру были отнесены направления, «размазанные» в первом и четвертом квадрантах (склонение 300–80°) и имеющие положительное наклонение от 20° до 70°, ко второму — направления юг-юго-восточного склонения (80–200°) и умеренного положительного наклонения.

В первый кластер попали направления, полученные при суммировании девонского (D), уральского (UR), мезозойского (MZ) и/или современного (Q) перемагничивания. Установлено, что при сохранности в породах только девонского перемагничивания результирующий вектор NRM имеет восток-северо-восточное направление с низким положительным наклонением (рис. 5). Если, помимо девонского, в породах присутствует еще и уральское перемагничивание, результирующий вектор смещается в северо-западном направлении по дуге большого круга (рис. 5). В случае, если к неразделимой сумме девонского и уральского перемагничивания добавляется направление мезозойского и/или современного перемагничивания, то увеличивается наклонение результирующего вектора.

Вместе с тем в первый кластер попали направления, полученные при суммировании первичных компонент намагниченности в Ропручейском силле, Ладожских интрузиях и йотнийских долеритах (компоненты RS, LA и JD в табл. 1 соответ-

Таблица 1

0	Объект	ение	Координаты точек отбора φ, λ, град. град.		Па	леомаг	нитное	направ	ление	Пале	еомагнит				
Номер п порядку		Обознач сайта			N	Dec, град.	Inc, град.	К	α ₉₅ , град.	Plat, °N	Plong, °E	<i>d_p</i> , град.	<i>d_m</i> , град.	Возраст, млн лет	Ссылка
Ключевые палеомагнитные полюсы															
1	Шальская и Авде- евская неоархей- ские дайки	SHN	61,8	35,9	8	174,6	3,6	64,2	7,0	-26,2	41,9	3,5	7,0	2504	1
2	Бураковская рас- слоенная интрузия	BU	61,9	36,1	8	139,1	56,5	54,9	7,5	14,3	68,5	7,9	10,9	2449±1	2
3	Людиковийские долеритовые ин- трузии	LI	61,8	36,9	3	77,3	58,6	216,4	8,4	39,8	114,7	9,3	12,5	1980	3
5	Ропручейский силл	RS	61,3	35,5	12	9,7	5,3	61,2	5,6	30,9	204,0	4,7	4,7	1752±3	4
8	Ладожские интру- зии	LA	61,7	30,5	278	32,5	-16,7	168,6	7,1	15,2	177,1	3,8	7,3	1452±12	5
9	Йотнийские до- лериты	JD	64,4	27,5	41	51,0	-24,0	20,1	5,1	04,0	158,0	4,0	4,0	1264±12	6
10	Эгерсундские дайки	ED	58,0	6,0	82	120,0	69,0	28,0	10,0	31,4	44,1	14,5	17	616±3	7

«Ключевые» палеомагнитные полюсы, полученные на неоархейских—неопротерозойских породах Карельского кратона

Примечания. N — число образцов; Dec°, Inc° — склонение и наклонение средних направлений компонент в географической системе координат; К — кучность векторов; α_{95} — радиус круга доверия при 95%-ной вероятности для среднего направления; палеомагнитный полюс в пересчете на координаты точек отбора: Plat, Plong — широта и долгота палеомагнитного полюса; *dp* и *dm* — отношение минимальной и максимальной осей овала 95% доверия соответственно.

Ссылки: 1 — [Scherbakova et al., 2017]; 2 — [Mertanen et al., 2006]; 3 — [Lubnina et al., 2017]; 4 — [Lubnina et al., 2016]; 5 — [Lubnina et al., 2010]; 6 — [Buchan, 2000]; 7 — [Walderhaug et al., 2007].

Рис. 5. Кластеры перемагничивания, образованные при различном вкладе разновозрастных вторичных компонент намагниченности: *1* — кластер, образованный при суммировании направлений уральского, девонского и современного перемагничивания; 2 — кластер, образованный при суммировании каледонского, уральского, девонского и мезозойского перемагничивания; 3 — первичные направления, выделенные в неоархейских-неопротерозойских комплексах Карельского кратона и использованные при расчете ключевых полюса с положительным (a) и отрицательным (δ) наклонением; 4 — вторичные компоненты намагниченности, выделенные в докембрийских комплексах Карельского кратона; 5 направления фанерозойских направлений перемагничивания с положительным (а) и отрицательным (б) наклонением. Буквенные обозначения палеомагнитных направлений см. в табл. 1-3



Таблица 2

Вторичные компоненты намагниченности, выделенные в докембрийских комплексах Карельского кратона

р по КV		Буквенное	Пале	еомагни	гное нап	равлен	ие	Палеон	магнитн	Воз-	ка		
Номе	Перемагничивание	вторичной компоненты	N	Dec, град.	Inc, град.	К	α ₉₅ , град.	Plat, °N	Plong, °E	<i>d_p</i> , град.	<i>d_m</i> , град.	раст, млн лет	Ссыл
Вторичные компоненты, связанные с действием мантийных суперплюмов													
1	Раннепалеопротерозойское	SU	67	146,1	55,4	63,2	11,6	-12,3	243,5	11,8	16,5	2450	1, 2
2	Людиковийское	LDR	153	83,8	66,7	8,4	4,2	44,4	101,5	5,7	6,9	1970	3, 4
3	Мезопротерозойское (Йотнийское)	MJR	41	51,0	-24,0	20,1	5,1	04,0	158,0	4,0	4,0	1270	5, 6
	Вторичные компоненты, возникшие в ходе посторогенного коллапса												
4	Лапландско-Кольское	LKR	62	28,6	58,5	11,0	5,7	58,7	169,2	6,3	8,5	1900	7
5	Свекофеннское	SFR	67	334,6	47,9	5,2	8,4	49,9	250,4	7,2	11,0	1800	7, 8
6	Каледонское	CDR	15	74,2	-29,3	163,4	3,2	-1,4	320,0	2,0	3,5	400	9

Примечания. N — число образцов; Dec^o, Inc^o — склонение и наклонение средних направлений компонент в географической системе координат; К — кучность векторов; α_{95} — радиус круга доверия при 95%-ной вероятности для среднего направления; палеомагнитный полюс в пересчете на координаты точек отбора: Plat, Plong — широта и долгота палеомагнитного полюса; d_n и d_m — отношение минимальной и максимальной осей овала 95%-ного доверия соответственно.

Ссылки: 1 — [Scherbakova et al., 2017]; 2 — [Mertanen et al., 2006]; 3 — [Lubnina et al., 2017]; 4 — [Fedotova et al., 1999]; 5 — [Луб-нина, 2009]; 6 — [Buchan et al., 2000]; 7 — [Lubnina et al., 2015]; 8 — [Mertanen, 1995]; 9 — [Smethurst et al., 1998].

Таблица 3

Фанерозойские палеомагнитные полюсы, использованные для расчета вклада вторичных компонент намагниченности

Номер по порядку	Компонента	Бук- венное	Направление					Палеомагнитный полюс			φ _m ,	Возраст намагни-	<u> </u>	
		обозна- чение	N	Dec, град.	Inc, град.	К	α ₉₅ , град.	Plat, град.	Plong, град.	A95	град.	ченности, млн лет	Ссылка	
1	Современная	Q	-	12,6	74,5	_	_	_	_	_	_	0	[Thébault et al., 2015]*	
2	Мезозойская	MZ	297	72,6	84,8	26,1	5,2	68,8	60,9	10,0	79,7	150	[Веселовский и др., 2013]	
3	Пермская (уральское перемагничивание)	UR	31	229,1	-20,0	82,9	5,1	30,0	173,0	6,0	30,0	290	[Lubnina et al,, 2014]	
4	Девонская	D	64	76,4	15,8	12,3	19,8	12,5	132,3	22,8	8,1	380	[Веселовский и др., 2013]	

Примечания. N — число образцов; Dec, Inc — склонение и наклонение средних направлений компонент в географической системе координат; К — кучность векторов; α_{95} — радиус круга доверия при 95%-ной вероятности для среднего направления; палеомагнитный полюс в пересчете на координаты точек отбора: Plat, Plong — широта и долгота палеомагнитного полюса; А95 — радиус круга 95%-ного доверия; φ_m — палеоширота; * — направление современного магнитного поля в районе работ, пересчитанного на координаты 61° с.ш., 35°в.д.

ственно), а также свекофеннского перемагничивания (SFR в табл. 2) с вторичными фанерозойскими направлениями из табл. 3.

Кроме того, в этот же кластер попадают докембрийские вторичные компоненты, возникшие в ходе посторогенного коллапса 1,80 млн л.н. и 1,90 млн л.н. в докембрийских комплексах Беломорского подвижного пояса и Лапландско-Кольского орогена (полюсы SFR и LKR в табл. 2 соответственно) [Fedotova et al., 1999; Lubnina et al., 2015], и палеозойские вторичные среднетемпературные компоненты, выделенные в палеозойских комплексах Ленинградской области, Эстонии (см. обзор в [Лубнина, 2009]) и на Кольском п-ове [Веселовский и др., 2013].

Второй кластер образован суммированием направлений каледонского (CDR), уральского (UR), девонского (D), мезозойского (MZ) и/или современного (Q) перемагничивания (рис. 5). Основные вариации наблюдаются при суммировании каледонского и девонского перемагничивания: результирующее направление варьирует от востокюго-восточного (при преобладании девонского перемагничивания) до юг-юго-западного (при вкладе более 70% каледонского перемагничивания). Если в неразделимую сумму каледонского и девонского перемагничивания добавляется направление уральского перемагничивания, то наклонение результирующего вектора изменяется с +30° (при вкладе UR 80%) до +65° (при вкладе UR <20%).

В этот же кластер попадают ключевые сумийские (2,45 млрд лет) и людиковийские (1,98 млрд лет) полюсы Карельского кратона (BU и LI в табл. 1, рис. 5), неоархейский полюс, полученный по Шальской и Авдеевской дайкам Карельского кратона, а также первичный ордовикский полюс, полученный по осадочным породам Швеции, Ленинградской области и Эстонии [Лубнина, 2009; Smethurst et al., 1998].

В результате исследований установлено, что «размазывание» по склонению древней докембрийской намагниченности, как в первом кластере, так и во втором, происходит из-за недоучета вклада либо девонской (увеличение склонения), либо пермской (соответственно, уменьшение склонения) вторичных компонент намагниченности (рис. 5). Различие в наклонениях в обоих случаях связано с некорректным выделением либо мезозойской (MZ), либо современной (Q) компонент намагниченности. Показано, что чем больше вклад MZ и Q компонент в суммарную намагниченность, тем более крутое наклонение наблюдается в породах, при этом попадание в кластеры 1 и 2 происходит при 55-70%-ном вкладе вторичных компонент намагниченности (рис. 5).

Выводы. 1. Установлены закономерные изменения направлений докембрийских компонент намагниченности в зависимости от вклада вторичных фанерозойских компонент. Показано, что изменение наклонения происходит из-за невозможности выделения/недоучета вклада девонской и пермской вторичных компонент, а наклонения мезозойской и современной.

 Полученные корреляции позволяют более обоснованно подойти к выделению первичной компоненты намагниченности в структурах коры со сложной тектонической эволюцией и в районах тектоно-магматической активизации.

3. Только комплексное использование палеомагнитных полюсов, изотопных данных и геологических корреляций одновозрастных комплексов позволяет корректно разделять разновозрастные компоненты намагниченности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арестова Н.А., Гуськова Е.Г., Храмов А.Н., Иосифиди А.Г. Палеомагнетизм позднеархейских интрузий санукитоидов и его значение для геодинамических реконструкици Балтийского щита в раннем докембрии // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения Северо-Запада России: Мат-лы Всеросс. конф. Петрозаводск, 2007. С. 19–22.

Веселовский Р.В., Арзамасцев А.А., Демина Л.И. и др. Палеомагнетизм, геохронология и магнитная минералогия даек Кольской девонской магматической провинции // Физика Земли. 2013. № 4. С. 82–104.

Лубнина Н.В. Перемагничивание пород Восточно-Европейского кратона: тектоническое районирование и геодинамические индикаторы // Вестн. КРАУНЦ. 2009. № 2. С. 325–353.

Шилунов С.В. Статистика палеомагнитных данных. М.: ГЕОС, 2000. 80 с.

Шипунов С.В., Шацилло А.В., Орлов С.Ю. Валидность палеомагнитных полюсов и принципы построения их кривых миграции (на примере Восточно-Европейской платформы) // Физика Земли. 2007. № 11. С. 59–65.

Bazhenov M.L., Levashova N.M., Meert J.G. How well do Precambrian paleomagnetic data agree with the Phanerozoic apparent polar wander path? A Baltica case study // Precambr. Res. 2016. Vol. 285. P. 80–90.

Bogdanova S.V., Gorbatschev R., Garetsky R.G. EU-ROPE. East European Craton, Reference Module in Earth // Systems and Environmental Sci, Elsevier, 2016. P. 1–17.

Buchan K.L., Mertanen S., Park R.G. et al. Comparising the drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: The importance of key paleomagnetic poles // Tectonophysics. 2000. Vol. 319, N 3. P. 167–198.

Ernst R.E., Buchan K.L. Giant radiating dyke swarms: their use in identifying pre-Mesozoic large igneous provinces and mantle plumes // Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism. 1997. Vol. 100. P. 297–333.

Fedotova M.A., Khramov A.N., Pisakin B.N., Priyatkin A.A. Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield // Geop. J. Int. 1999. Vol. 137. P. 691–712. *Lubnina N., Mertanen S., Soderlund U.* et al. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: Palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia) // Precambr. Res. 2010. Vol. 183 (3). P. 442–462.

Lubnina N., Pasenko A., Novikova M. et al. The East European craton at the end of the Paleoproterozoic: A new paleomagnetic pole of 1.79–1.75 Ga // Moscow Univ. Geol. Bull. 2016. Vol. 71, N 1. P. 18–27.

Lubnina N.V., Pisarevsky S.A., Puchkov V.N. et al. New paleomagnetic data from Late Neoproterozoic sedimentary successions in Southern Urals, Russia: implications for the Late Neoproterozoic paleogeography of the Iapetan realm // Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch). 2014. Vol. 103. P. 1317–1334.

Lubnina N.V., Pisarevsky S.A., Stepanova A.V. et al. Fennoscandia before Nuna: paleomagnetism of 1.98-1.96 Ga mafic rocks of the Karelian craton and paleogeographic implications // Precambr. Res. 2017. Vol. 292. P. 1-12.

Lubnina N.V., Zakharov V.S., Novikova M.A., Vorontsova V.P. Paleoproterozoic Remagnetization in the White Sea Mobile Belt, Karelia: Petro-Paleomagnetic Evidence and Supercomputer Modeling // Moscow Univ. Geol. Bull. 2015. Vol. 70, N 2. P. 84–96.

Mertanen S. Multicomponent remanent magnetizations reflecting the geo-logical evolution of the Fennoscandian Shield — a palaeomagentic study with emphasis on the Svecofennian orogeny // Ph.D. thesis with original articles (I–IV). Geol. Surv. Finland, Espoo, 1995. 46 p.

Mertanen S., Vuollo J.I., Huhma H. et al. Early Paleoproterozoic–Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield – New paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations // Precambr. Res. 2006. Vol. 144. P. 239–260.

Pisarevsky S.A. New edition of the Global Paleomagnetic Database // EOS Transactions. 2005. Vol. 86, N 17. 170 p.

Shcherbakova V.V., Lubnina N.V., Shcherbakov V.P. et al. Paleointensity Determination on Paleoarchaean Dikes within the Vodlozerskii Terrane of the Karelian Craton // Izvestiya Phys. of the Solid Earth. 2017. Vol. 53, N 5. P. 714–732.

Smethurst M.A., Khramov A.N., Pisarevsky S. Palaeomagnetism of the Lower Ordovician Orthoceras Limestone, St. Petersburg, and a revised drift history for Baltica in the early Palaeozoic // Geophys. J. Int. 1998. Vol. 133. P. 44–56.

Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P. et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Plan. and Space. 2015. Vol. 67. P. 79.

Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data // Tectonophysics. 1990. Vol. 184. P. 1–9.

Vekkolainen T., Pesonen L.J., Evans D. PALEOMA-GIA—An online resource of Precambrian paleomagnetic data // Stud. Geophys. Geod. 2014. Vol. 58. P. 425–441.

Walderhaug H.J., Torsvik T.H., Halvorsen E. The Egersund dykes (SW Norway): a robust Early Ediacaran (Vendian) palaeomagnetic pole from Baltica // Geophys. J. Int. 2007. Vol. 168. P. 935–948.

Поступила в редакцию 30.10.2017