

УДК 550.38435:551.71 (470.22)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-12-20

ДОКЕМБРИЙСКИЙ МЕГАКОНТИНЕНТ НЕНА: УСТОЙЧИВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ИЛИ ФАНЕРОЗОЙСКОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ?

Наталья Валерьевна Лубнина^{1✉}, Владимир Сергеевич Захаров²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; natlubnina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0594-672X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; zakharov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8888-4239>

Аннотация. Проведено тестирование совпадения ключевых полюсов, палеомагнитных полюсов, рассчитанных со вторичных разновозрастных компонент намагниченности, и референтных фанерозойских полюсов Восточно-Европейского и Лаврентийского кратонов. Выделены основные периоды таких совпадений. На основании корреляции угловых расстояний между парами разновозрастных полюсов Восточно-Европейского и Сьюпириор кратонов установлено перемагничивание полюсов 1,59–1,45 млрд лет, 580–550 млн лет назад и 250–200 млн лет назад в период распада суперконтинента Пангея. Показано, что совпадение докембрийского полюса с фанерозойским сегментом ТКМП не всегда является следствием перемагничивания, а может быть связано с «повторяемостью» положения одного и того же кратона в одной и той же области Земного шара в составе различных суперконтинентов. Оценка возможности такой «повторяемости» показала, что за период 2,5 млрд лет один и тот же блок может находиться в одной и той же области Земного шара более чем дважды, что может служить объяснением совпадения разновозрастных полюсов. Различие периодов существования мегаконтинента НЕНА и докембрийских суперконтинентов Родиния, Нуна/Колумбия и Кенорленд, возможно связано с их интроверсивным и экстровеерсивным механизмами образования соответственно.

Ключевые слова: палеомагнитные полюсы, докембрийские суперконтиненты, НЕНА, перемагничивание

Для цитирования: Лубнина Н.В., Захаров В.С. Докембрийский мегаконтинент НЕНА: устойчивая конфигурация или фанерозойское перемагничивание? // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. №6. С. 12–20.

PRECAMBRIAN MEGACONTINENT NENA: STABLE CONFIGURATION OR PHANEROZOIC REMAGNETIZATION?

Natalia V. Lubnina^{1✉}, Vladimir S. Zakharov²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; natlubnina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0594-672X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; zakharov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8888-4239>

Abstract. We tested the coincidence of key poles, paleomagnetic poles, recalculated from the secondary different-age components of NRM and the reference Phanerozoic poles of the East European and Laurentia cratons. The main periods of such coincidences are highlighted. Based on the correlation of angular distances between pairs of the same-age poles of the East European and Superior cratons, three times poles (1.59–1.45 Ga, 580–550 Ma and 250–200 Ma) was found as a result of remagnetization during distroy of the supercontinent Pangaea. It is shown that the coincidence of the Precambrian pole with the Phanerozoic part of the APWP is not always a consequence of remagnetization, but may be due to the “repeatability” of the position of the same craton at the same position of the Globe as part of various Precambrian supercontinents. The potential “repeatability” of the position of the same tectonic block in the same area of the globe at different times in geologic history was carried out.. The results show that over a period of 2.5 Ga, the same block can be found more than twice in the same area of the Globe, which can explain the coincidence of poles of different ages. Distingsions between time of existences of NENA megacontinent and the Precambrian supercontinents Rodinia, Nuna/Columbia and Kenorland may be associated with introversal and extroversal mechanisms of supercontinent formation, respectively.

Keywords: paleomagnetic poles, Precambrian supercontinent, NENA, remagnetization

For citation: Lubnina N.V., Zakharov V.S. Precambrian megacontinent NENA: stable configuration or Phanerozoic remagnetization? *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 12–20. (In Russ.).

Введение. Название мегаконтинента «НЕНА» (North Europe — North America) впервые предложено Чарли Говером с соавторами [Gower, et al., 1990]. Основываясь на геологических корреляциях между современной северной окраиной Восточно-Европейского кратона (Балтики) с Лаврентией и Гренланди-

ей, они предположили его существование в палеопротерозое (рис. 1). Именно мегаконтинент НЕНА стал ядром неопротерозойского суперконтинента Родиния [Li, et al., 2008].

Позднее устойчивая конфигурация НЕНА трансформировалась в период окончательного рас-

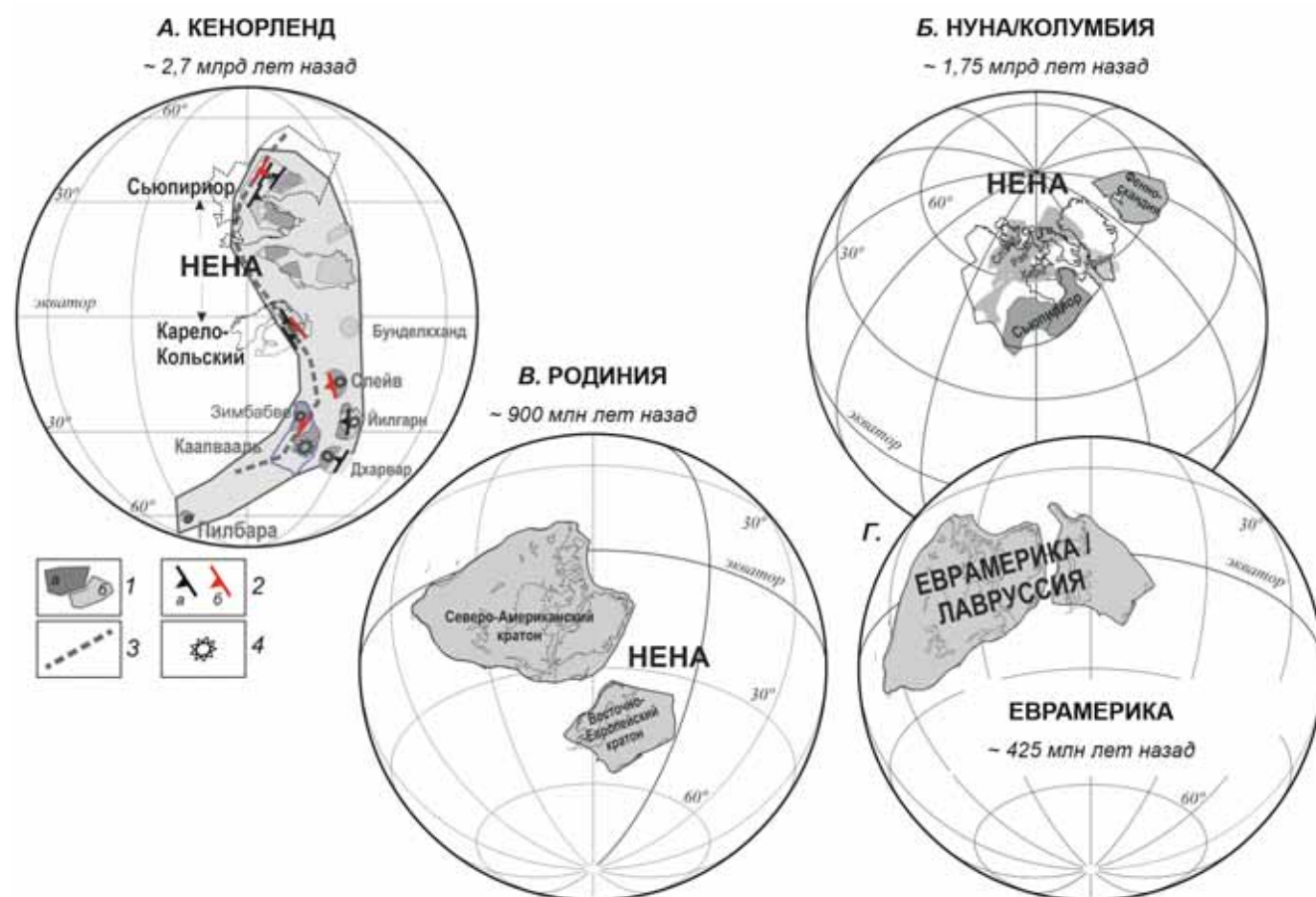


Рис. 1. Мегаконтинент НЕНА в составе суперконтинентов: А — Кенорленд по [Lubnina, Slabunov, 2011; Slabunov, et al., 2017]; Б — Нуна/Колумбия по [Pisarevsky et al, 2014; Lubnina et al, 2017]; В — Родиния по [Gower, et al., 1990; Li, et al., 2008]; Г — Евразия/Лавруссия по [Torsvik, et al., 1990, 1996]. 1 — >3,0 (а) и 3,0–2,8 (б) млрд лет континентальная кора; 2 — субдукционные (а) и коллизионные (б) системы ~2,7 млрд лет; 3 — коллизионные орогении ~2,7 млрд лет; 4 — плюмовая активность ~2,7 млрд лет

пада суперконтинента Родиния ~550 млн лет назад, когда между Балтикой и Лаврентией раскрылся океан Япетус [Torsvik, et al., 1990]. Однако, уже в среднем девоне (около 320 млн лет) эти два континентальных блока образовали новую конфигурацию — мегаконтинент Евразия (или Лавруссия), аналогичную мегаконтиненту НЕНА по взаимному положению Балтики и Лаврентии [Cocks, Torsvik, 2005].

Докембрийская конфигурация мегаконтинента НЕНА, кроме того, входила как составная часть в палеопротерозойский суперконтинент Нуна [Лубнина, 2009; Rogers, Santosh, 2002; Pisarevsky, et al., 2014] или Гудзонленд [Pesonen, et al., 2003], а также в состав неоархейского суперконтинента Кенорленд [Lubnina, Slabunov, 2011]. Согласно существующим палеомагнитным данным, Балтика (Восточно-Европейский кратон, а до 1,7 млрд лет — Фенноскандия) и Лаврентия (до ~1,7 млрд лет кратон Супериор) перемещались в пределах единой литосферной плиты, испытывая вращения друг относительно друга в периоды образования/распада суперконтинентов [Lubnina, Slabunov, 2011; Pisarevsky, et al., 2014].

Для того, чтобы такая долгоживущая, повторяющаяся несколько раз конфигурация мегаконтинента существовала, разновозрастные сегменты фанеро-

зойских траекторий кажущейся миграции полюсов (ТКМП) Балтики и Лаврентии должны совмещаться. В случае с докембрийскими конфигурациями мегаконтинента, согласно подходу Эванса–Писареvского [Evans, Pisarevsky, 2008], угловые расстояния между парами разновозрастных полюсов этих блоков оказываются одинаковыми для периодов «сборки» мегаконтинента и различаются в периоды распада.

Вместе с тем, докембрийские палеомагнитные полюсы, по которым строятся магнито-тектонические реконструкции, не должны совпадать с фанерозойскими участками ТКМП для Балтики и Лаврентии (рис. 2). Повторяемость положения разновозрастных палеомагнитных полюсов для одного и того же тектонического блока в определенной части сферы, согласно критериям Van der Voo [1990], свидетельствует о приобретении более древними породами молодой компоненты намагниченности, т. е. о перемагничивании более древних комплексов и частичном или полном разрушении первичной компоненты намагниченности.

В настоящее время разработаны критерии надежности палеомагнитных полюсов для фанерозоя [Van der Voo, 1990] и докембрия [Buchan, et al., 2000; Meert, et al., 2020]. Одним из значимых критериев

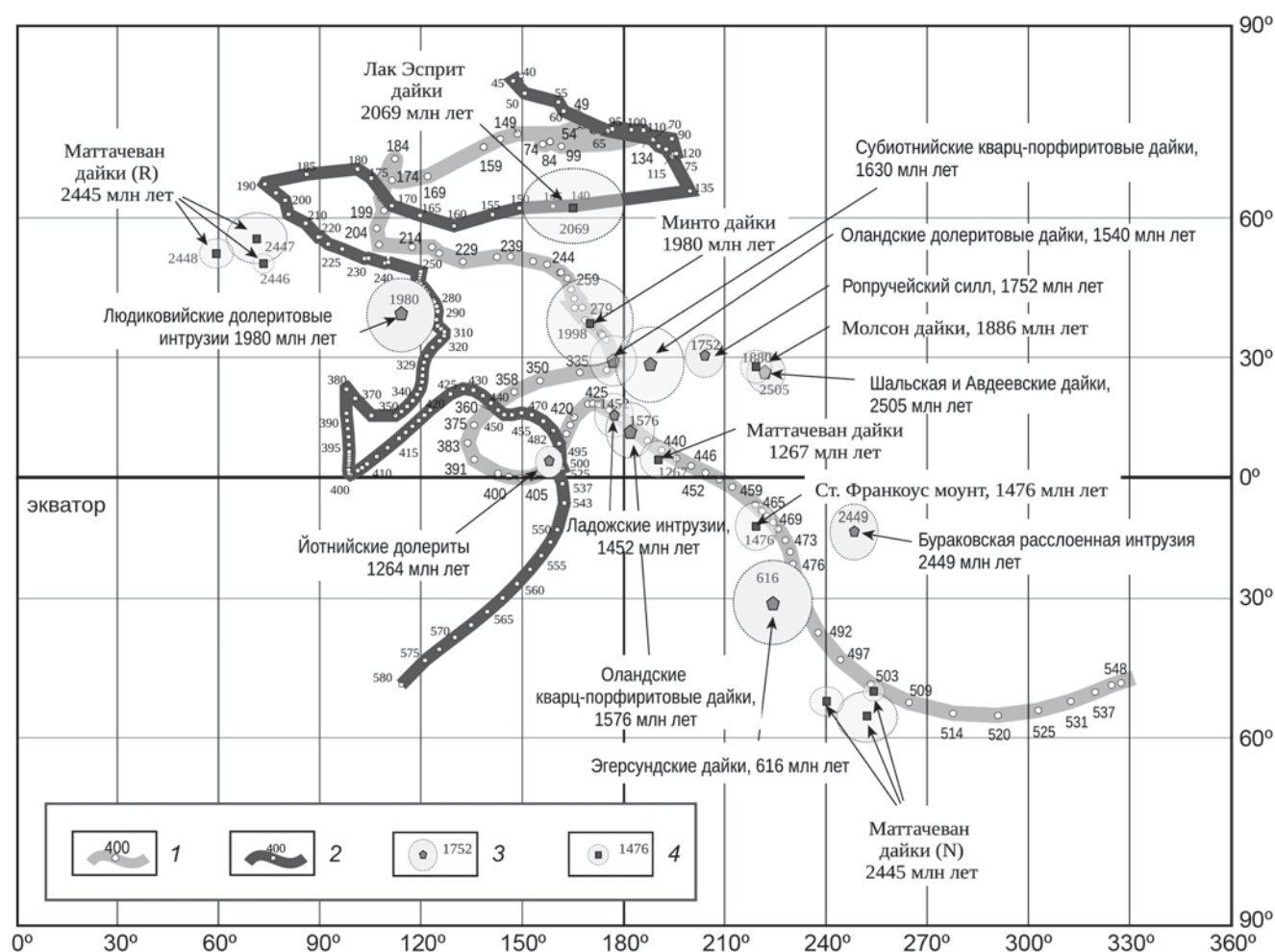


Рис. 2. Сопоставление докембрийских ключевых полюсов Карельского и Сьюпириор кратона с референтными фанерозойскими траекториями кажущейся миграции полюса Восточно-Европейского и Северо-Американского кратонов: 1 — фанерозойская ТКМП для Восточно-Европейского кратона по [Smethurst, et al., 1998]; 2 — фанерозойская ТКМП для Северо-Американского кратона по [Torsvik, et al., 1996]; 3 — докембрийские ключевые полюсы Карельского кратона по [Лубнина, 2009; Buchan, et al., 2000; Pisarevsky, et al., 2014]; 4 — докембрийские ключевые полюсы Сьюпириор кратона по [Buchan, et al., 2000; Pisarevsky, et al., 2014]. Цифрами в кружках обозначен возраст палеомагнитных полюсов

качества палеомагнитных данных является доказательство времени приобретения породами различных по возрасту компонент намагниченности. Для референтной оценки соответствия возраста пород времени приобретения ими различных компонент намагниченности, используются 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 о том, что выделенная компонента намагниченности образовалась в момент формирования пород.

Для Восточно-Европейского кратона (ВЕК) за последние 15 лет получен ряд ключевых докембрийских полюсов, первичность намагниченности для которых доказана на основании положительного теста контакта и/или обращения, а отсутствие более позднего перемагничивания устанавливалось на основании независимого изотопного датирования

[Lubnina, et al., 2017; Veselovskiy, et al., 2019; Shcherbakova, et al., 2017]. Вместе с тем, с накоплением большого количества кондиционных полюсов возникла противоречивая ситуация. С одной стороны, первичность выделенных компонент намагниченности подтверждена положительными тестами палеомагнитной надежности, а с другой — докембрийские палеомагнитные полюсы совпадают с фанерозойскими полюсами Восточно-Европейского кратона (рис. 2). В таком случае говорят о *перемагничивании* пород и коррелируют время приобретения породами этих компонент намагниченности с тектоническими событиями (см. обзор [Lubnina, Zakharov, 2018]). Совпадение докембрийских надежных полюсов трех сегментов Восточно-Европейского кратона (Балтики) с его фанерозойскими полюсами детально рассмотрено М.Л. Баженовым с соавторами [Bazhenov, et al., 2016]. Авторами показано, что совпадение между докембрийскими данными и более молодыми сегментами ТКМП Балтики не является случайным и может указывать на то, что намагниченность

в докембрийских породах не является первичной, а возникла в результате фанерозойских тектоно-термальных событий.

Кроме того, нами рассчитаны изменения среднего направления высокотемпературной компоненты (отклонения от истинного направления) в зависимости от вклада вторичных компонент намагниченности, возникших в результате разновозрастных тектоно-магматических событий [Lubnina, Zakharov, 2018]. Показано, что докембрийские ключевые полюсы часто совпадают с векторной суммой разновозрастных фанерозойских компонент намагниченности. Этот вывод полностью опровергает значимость тестов палеомагнитной надежности (в первую очередь теста контакта) для доказательства первичной/вторичной природы выделенных высокотемпературных компонент намагниченности.

Если докембрийские палеомагнитные полюсы Восточно-Европейского кратона (Балтики) являются лишь суммой фанерозойских компонент намагниченности, то на докембрийских реконструкциях кратон должен все время «возвращаться» в одну и ту же часть сферы в течение докембрия. Однако, периоды «совпадения» разновозрастных полюсов Восточно-Европейского кратона не всегда совпадают по времени с характерными эпохами перемагничивания (рис. 2). Возможно, это связано с повторным положением одного и того же кратона в ходе геологической истории в одном и том же месте Земного шара без перемагничивания пород (что противоречит одному из критериев надежности).

Для устранения отмеченного выше противоречия мы протестировали гипотезу о возможной «повторяемости» положений кратона в одной и той же точке Земного шара для долгоживущей конфигурации НЕНА. Выбор этой конфигурации не случаен. Во-первых, корреляции между кратонами Сьюпириор и Карельским (докембрийской частей Северо-Американского и Восточно-Европейского кратонов) установлены начиная с 2,7 млрд лет [Lubnina, Slabunov, 2011]. Во-вторых, докембрийские конфигурации (мегаcontinent) НЕНА изначально построены на основании геологических корреляций, а уже затем протестированы и уточнены с помощью кондиционных палеомагнитных полюсов [Gower, et al., 1990; Li, et al., 2008, 2019; Lubnina, Slabunov, 2011].

Если перемагничивание произошло в ходе последнего суперконтинентального цикла образования и распада суперконтинента Пангея, то разновозрастные вторичные компоненты и соответствующие «совпадающие» докембрийские полюсы должны быть одновременно выделены в пределах обоих кратонов.

Методика исследований. В качестве референтных выбраны фанерозойские ТКМП для Восточно-Европейского и Северо-Американского кратонов [Smethurst, et al., 1998 и Torsvik, et al., 1996], а также ключевые и надежные докембрийские полюсы для этих двух кратонов (таблица) [Buchan, et al., 2016; Lubnina, Zakharov, 2018 и ссылки в этих работах].

Между парами разновозрастных докембрийских «ключевых» полюсов для Восточно-Европейского (Карельского) и Северо-Американского (Сьюпириор) кратонов рассчитаны угловые расстояния (таблица, рис. 3). Согласно предложенному Д. Эвансом и С. Писаревским подходу, в случае совпадения угловых расстояний, кратоны перемещались в составе единой литосферной плиты в составе единого мегаконтинента в период совпадения полюсов [Evans, Pisarevsky, 2008]. Отличия угловых расстояний свидетельствует о распаде мегаконтинента в этом временном интервале.

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 метакронной вторичной компоненты намагниченности [Лубнина, 2009]. Для большинства докембрийских и фанерозойских объектов эта компонента выделяется в средне- или высокотемпературном интервале. Вторичная природа метакронных компонент определена на основании отрицательных тестов палеомагнитной надежности и/или совпадения с более молодыми полюсами ВЕК (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 в пределах Восточно-Европейского кратона как в докембрийских, так и в фанерозойских комплексах выделяется пять фанерозойских этапов перемагничивания: каледонское (~400 млн лет), девонское (~390–360 млн лет), пермское (уральское, ~290 млн лет), мезозойское (~150 млн лет) и эоценовое (~40 млн лет) [Lubnina, Zakharov, 2018]. Также в докембрийских комплексах выделяются широко распространенное Свекофеннское (~1,8 млрд лет) перемагничивание и ряд локальных: раннепалеопротерозойское (~2,45 млрд лет), лудиковийское (~1,98 млрд лет), Лапландско-Кольское (~1,92 млрд лет) и йотнийское (~1,27 млрд лет) [Fedotova, et al., 1999; Lubnina, Zakharov, 2018; Mertanen, 1995; Mertanen, et al., 2006].

Однако, среднее направление йотнийского перемагничивания близко к направлениям каледонского перемагничивания в пределах ВЕК, а полюсы 1,77, 1,63 и 1,54 млрд лет (Ропручейский силл, субйотнийские кварц-порфириновые дайки и Оландские долеритовые дайки соответственно) совпадают с направлением уральского (пермского) перемагничивания (рис. 2). При этом ключевой полюс 2,45 млрд лет (Бураковская расслоенная интрузия) и полюс 616 млн лет близки раннеордовикскому участку ТКМП Восточно-Европейского кратона,

Т а б л и ц а

Угловые расстояния между парами разновозрастных полюсов для Восточно-Европейского (Балтика) и Северо-Американского (Сьюпириор) кратонов

№ п/п	Интервал времени, млн лет	Суперконтинент	Распад/образование мегаконтинента НЕНА	Кратон Балтика Угловое расстояние (°)	Кратон Сьюпириор Угловое расстояние (°)
1	2680–2450	Кенорленд	Устойчивая конфигурация, фрагмент НЕНА	$46,7 \pm 14^1$	$60,3 \pm 11^1$
2	2450–2100		Начало распада	$68,8 \pm 11^2$	$95,1 \pm 9^3$
3	2100–1980		Распад, океан	$75,7 \pm 12^{2,4}$	$19,9 \pm 12^1$
4	1980–1860	Нуна/ Колумбия	Начало образования	$35,1 \pm 9^{2,4,9}$	$37,4 \pm 14^{1,3}$
5	1860–1770		Максимальная сборка	$52,2 \pm 11^{4,5}$	$53,5 \pm 13^{3,5}$
6	1750–1590		Максимальная сборка	$26,6 \pm 13^{1,5,6}$	$32,5 \pm 10^{3,5,6}$
7	1590–1450		Частичный распад, вращения?	$20,8 \pm 14^{5,6,7}$	$33,9 \pm 12^{3,5,6}$
8	1450–1270		Начало распада	$17,1 \pm 11^{5,6,7}$	$34,9 \pm 9^{3,5,6}$
9	1270–1100		Распад, океан	$78,7 \pm 8^{5,6}$	$47,9 \pm 11^{3,5,6}$
10	1100–980	Родиния	Максимальная сборка НЕНА	$104,8 \pm 9^{5,6}$	$108,9 \pm 7^{3,5,6}$
11	616–580		Устойчивая конфигурация НЕНА	$65,8 \pm 7^{6,8}$	$61,6 \pm 8^{6,8}$
12	580–550		Начало распада	$30,7 \pm 6^{6,8}$	$23,3 \pm 8^{6,8}$
13	550–400		Распад, океан	$41,9 \pm 9^8$	$66,5 \pm 16^8$
14	400–350	Пангея	Конфигурация Евразия/Лавруссия	$19,5 \pm 12^8$	$25,6 \pm 14^8$
15	350–300		Максимальная сборка	$23,8 \pm 11,5^8$	$31,3 \pm 13^8$
16	300–250		Максимальная сборка	$20,1 \pm 7^8$	$16,3 \pm 9^8$
17	250–200		Начало распада?	$35,9 \pm 6^8$	$23,2 \pm 8^8$
18	200–150		Начало распада	$39,9 \pm 7^8$	$30,3 \pm 6^8$

Примечание. Для расчета угловых расстояний палеомагнитные полюсы взяты из работ: ¹ [Buchan, et al., 2000]; ² [Fedotova et al., 1999]; ³ [Buchan, et al., 2016]; ⁴ [Lubnina, et al., 2017]; ⁵ [Pisarevsky, et al., 2014]; ⁶ [Li, et al., 2008]; ⁷ [Лубнина, 2009]; ⁸ [Torsvik, et al., 1996]; ⁹ [Psenko, Lubnina, 2014].

полюс 1,98 млрд лет (людиковийские долеритовые интрузии) — триасово-юрскому сегменту ТКМП Восточно-Европейского кратона. В тоже время, ключевой полюс 2,45 млрд лет кратона Сьюпириор близок триасово-юрскому сегменту ТКМП Лаврентии (полюс Маттачеван дайки), полюсы 2,2 млрд лет (Нипписинг силлы и Сеннетерр дайки) перекрывают девонский сегмент, а полюсы 2,90 и 2,06 млрд лет (Кошон и Лак Эсприт дайки соответственно) соответствуют юрско-меловому сегменту ТКМП Лаврентии (рис. 2). Кроме того, полюс 1,998 млрд лет Лаврентии (Минто дайки) совпадает с полюсом уральского (пермского) перемагничивания Восточно-Европейского кратона, а полюс 1,98 млрд лет ВЕК (людиковийские интрузии) соответствует участку 280–290 млн лет ТКМП Лаврентии (рис. 2). При этом если «закрыть» Атлантический океан и совместить соответствующие участки ТКМП ВЕК и Лаврентии, то эти полюсы совпадут. В классическом варианте такие совпадения свидетельствуют о более позднем перемагничивании пород.

Считается, что перемагничивание пород связано с суперконтинентальными циклами и коррелирует по времени с воздействием гидротермальных флюидов на стадии построенного коллапса при образовании суперконтинентов или с действием

мантийных суперплюмов при распаде таковых [Лубнина, 2009; Zwing, 2003]. В ходе этих событий первичные компоненты намагниченности могут полностью затухиваться (термовязкое перемагничивание), либо присутствовать вместе со вторичными компонентами (преимущественно химическое перемагничивание). Если перемагничивание произошло в ходе последнего суперконтинентального цикла образования и распада суперконтинента Пангея, то разновозрастные вторичные компоненты и соответствующие «совпадающие» докембрийские полюсы должны быть одновременно выделены в пределах обоих кратонов.

Корреляция пар разновозрастных докембрийских палеомагнитных полюсов Восточно-Европейского (Карельского) и Северо-Американского (Сьюпириор) кратонов. Для 18 временных срезов были взяты ключевые или надежные палеомагнитные полюсы Восточно-Европейского и Сьюпириор кратонов. Между парами разновозрастных полюсов этих кратонов были рассчитаны угловые расстояния согласно подходу Эванса-Писаревского [Evans, Pisarevsky, 2008] и сведены в таблице. Интервалы времени, где угловые расстояния практически полностью совпадают, коррелировались с периодами максимальной сборки суперконтинентов (рис. 3).

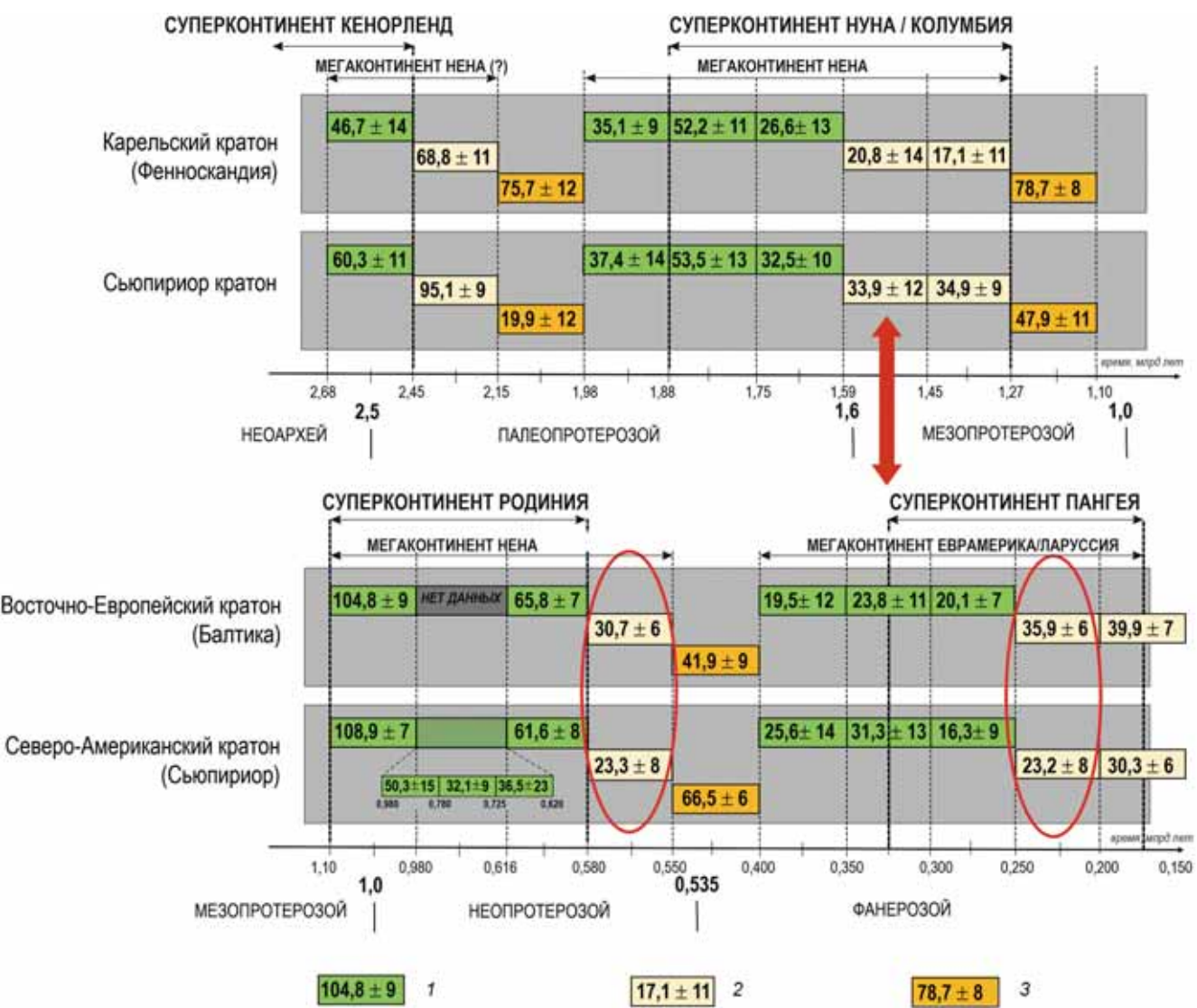


Рис. 3. Корреляция пар одновозрастных докембрийских палеомагнитных полюсов Восточно-Европейского (Карельского) и Северо-Американского (Сьюпириор) кратонов: 1 — угловые расстояния между парами одновозрастных полюсов совпадают полностью; 2 — угловые расстояния между парами одновозрастных полюсов совпадают на уровне доверительных интервалов; 3 — угловые расстояния между парами одновозрастных полюсов не совпадают (распад мегаконтинента)

Интервалы, когда угловые расстояния не совпадали (отмечены оранжевыми прямоугольниками на рис. 3) соответствуют времени распада мегаконтинента НЕНА и раскрыти океанов, в т.ч. Лапландско-Кольского (2,1–1,98 млрд лет), океана вокруг Лаврентии (1,27–1,10 млрд лет), океана Япетус (550–400 млн лет) и северной части Атлантического океана (~150 млн лет). Вместе с тем, конфигурация НЕНА вновь образовывалась на 50–100 млн лет раньше и полностью распадалась на 50–300 млн лет позже максимальной амальгамации или распада суперконтинентов соответственно (рис. 3). Такие различия, возможно, связаны с двумя конечными механизмами образования суперконтинентов: интroversии (например, суперконтинент Пангея), при которой погружается преимущественно внутреннее океаническое дно, и экстрaversии (например, образование суперконтинента Паннотия), при

которой погружается преимущественно внешнее океаническое дно [Murphy, Nance, 2013]. Также выделены интервалы, где угловые расстояния между парами одновозрастных полюсов совпадают на уровне доверительных интервалов (отмечены светлым цветом на рис. 3). Следует отметить, что пространственное положение палеомагнитных полюсов в трех из них (1,59–1,45 млрд лет, 580–550 млн лет и 250–200 млн лет) также совпадают (отмечены красными овалами и красной стрелкой на рис. 2). Такая «повторяемость» не является случайной и свидетельствует о перемагничивании более ранних полюсов в период начала распада суперконтинента Пангея. Вместе с тем совпадение мезопротерозойских полюсов (1,57–1,27 млрд лет) с палеозойскими фрагментами ТКМП кратонов Восточно-Европейского и Лаврентии говорит об отсутствии перемаг-

ничивания, поскольку угловые расстояния между парами их разновозрастных полюсов не совпадают (рис. 2; 3). Также не совпадают и угловые расстояния неоархейских-раннепалеопротерозойских полюсов (2,68–2,45 млрд лет) с парами более молодых полюсов этих кратонов (рис. 3).

Вероятность совпадения разновозрастных палеомагнитных полюсов в результате попадания тектонического блока в одну и ту же область.

Однако необходимо учитывать, что совпадение разновозрастных палеомагнитных полюсов для одного блока возможно не только в результате перемещения. Мы попытались оценить возможность совпадения разновозрастных палеомагнитных полюсов за 2,5 млрд лет и нахождения для тектонического блока в той же области на поверхности Земли в ходе геологической истории.

Для определения вероятности такого сценария проведем оценку площади полосы S , которую тектонический блок «заметает» на поверхности Земли при своем движении, с учетом характерных значений скорости горизонтальных движений, размеров блока и погрешности определения положения палеомагнитных полюсов, используемых при геодинамических реконструкциях. При этом сами траектории перемещения предполагаем в достаточной мере хаотичными. Отношение этой площади S к площади поверхности всей Земли S_E и позволит оценить степень повторяемости.

Рассмотрим возможные перемещения блока начиная с границы архей–палеопротерозоя, т. е. на протяжении $t = 2,5$ млрд лет. Скорости горизонтальных движений в докембрии были выше современных, поэтому для оценки примем диапазон значений $v = 5 \div 10$ см/год [Korenaga, 2008; Van Kranendonk, 2010]. Размер тектонического блока может быть весьма разным, от первых сотен километров для ядер кратонов до тысяч километров для уже сложившихся кратонов. Для наших оценок мегаконтинента НЕНА примем диапазон $d = 500 \div 5000$ км.

Общую длину пути L , пройденного блоком за 2,5 млрд лет, можно оценить как

$$L = v \cdot t = (5 \div 10) \text{ см/год} \times 2,5 \text{ млрд лет} = (125 \div 250) \text{ тыс. км.}$$

При этом площадь полосы, которую такой блок «заметает» на поверхности Земли составляет

$$S = d \cdot L = (500 \div 5000) \text{ км} \times (125 \div 250) \text{ тыс. км} = (0,63 \div 12,5) \cdot 10^8 \text{ км}^2.$$

Площадь поверхности Земли $S_E = 5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2$. Тогда отношение найденной площади полосы к площади поверхности Земли составляет

$$S/S_E = (0,63 \div 12,5) \cdot 10^8 \text{ км}^2 / 5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2 = 0,12 \div 2,45.$$

Таким образом, в случае наибольших значений принятых параметров полоса, «заметаемая» тектоническим блоком может превышать площадь

поверхности Земли почти в 2,5 раза. Т.е. даже если не учитывать погрешность палеомагнитных реконструкций, вероятность для блока попасть в ту же область Земли достаточно высока, и такое событие может произойти более чем 2 раза. Если же принять размер блока 10000 км, то максимальная доля площади будет 4,9.

Учтем теперь погрешность определения положения реконструируемого блока. При палеомагнитных реконструкциях положение палеомагнитного полюса определяется с доверительным интервалом α_{95} . Эта же величина фактически является мерой точности определения положения конкретных реконструируемых блоков [Метелкин, Казанский, 2014]. Для дальнейших оценок принимаем характерное значение $\alpha_{95} = 10^\circ$, погрешность определения древнего положения блока составляет порядка 1000 км. В этом случае ширина полосы, в которой может двигаться блок, увеличивается до $d = 1500 \div 6000$ км. Тогда с учетом погрешности площадь полосы, которую блок «заметает» на поверхности Земли, можно оценить как

$$S = (1,5 \div 6) \cdot 10^3 \text{ км} \times (1,25 \div 2,5) \cdot 10^5 \text{ км} = (1,88 \div 15) \cdot 10^8 \text{ км}^2.$$

Отношение площади такой полосы от общей площади поверхности Земли составляет

$$S/S_E = (1,88 \div 15) \cdot 10^8 \text{ км}^2 / 5,1 \cdot 10^8 \text{ км}^2 = 0,37 \div 2,94.$$

В этом случае вероятность для тектонического блока попасть в ту же область Земли еще выше.

Таким образом, несмотря на приблизительный характер проведенных оценок, мы показали, что при обоснованных значениях принимаемых параметров (размеров блоков, скорости их перемещений и погрешностей палеомагнитных определений) такое событие может повторяться до 3 раз за 2,5 млрд лет.

Выводы. Проведено тестирование совпадения докембрийских «ключевых» полюсов, палеомагнитных полюсов, рассчитанных со вторичных разновозрастных компонент намагниченности Восточно-Европейского и Сьюпириор кратонов, и референтных фанерозойских полюсов Восточно-Европейского и Лаврентийского кратонов. Выделены основные интервалы совпадения разновозрастных полюсов двух блоков мегаконтинента НЕНА.

Корреляции угловых расстояний разновозрастных полюсов Восточно-Европейского и Сьюпириор кратонов позволили выделить три этапа «повторений», связанных с перемещением: 1,59–1,45 млрд лет, 580–550 млн лет и 250–200 млн лет.

Показано, что совпадение докембрийского полюса с фанерозойским сегментом ТКМП не всегда является следствием перемещения, а может быть связано с «повторяемостью» положения одного и того же кратона в одной и той же области Земного шара в составе различных суперконтинентов.

Проведена оценка возможной «повторяемости» положения одного и того же кратона в одной и той же области Земного шара в разные моменты геологической истории. Показано, что за период 2,5 млрд лет один и тот же блок может находиться в одной и той же области Земного шара более чем дважды, что может служить объяснением совпадения разновозрастных полюсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лубнина Н.В. Восточно-Европейский кратон в мезопротерозое: новые ключевые палеомагнитные полюсы // ДАН. 2009. Т. 428, № 2. С. 252–257.
- Метелкин Д.В., Казанский А.Ю. Основы магнитотектоники: Учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2014. 127 с.
- 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 // Precambrian Research. 2016. Vol. 25. P. 80–90.
- 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, No. 3. P. 167–198.
- Buchan K.L., Mitchell R.N., Bleeker W., et al. Paleomagnetism of ca. 2.13–2.11 Ga Indin and ca. 1.885 Ga Ghostdyke swarms of the Slave craton: Implications for the Slave craton APW path and relative drift of Slave, Superior and Siberian cratons in the Paleoproterozoic // Precambrian Research. 2016. Vol. 275. P. 151–175.
- Cocks R.L., Torsvik T.H. Baltica from the late Precambrian to mid-Palaeozoic times: The gain and loss of a terrane's identity // Earth-Science Reviews. 2005. Vol. 72. P. 39–66.
- Evans D.A.D., Pisarevsky S.A. Plate tectonics on the early Earth?—weighing the paleomagnetic evidence // Condie K., Pease V. (Eds.) When did Plate Tectonics Begin? Geological Society of America. 2008. Special Paper 440. P. 249–263.
- 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 // Geophys. J. Int. 1999. Vol. 137. P. 691–712.
- Gower C.F., Ryan A.F., Rivers T. Mid-Proterozoic Laurentia–Baltica: an overview of its geological evolution and a summary of the contributions made by this volume // Gower C.F., Rivers T., Ryan B. (Eds.), Mid-Proterozoic Laurentia–Baltica. Geological Association of Canada, St. John's Newfoundland, 1990. P. 23–40.
- Korenaga J. Urey ratio and the structure and evolution of Earth's mantle // Rev. Geophys. 2008. Vol. 46. P. 1–32.
- Li Z.-X., Bogdanova S.V., Collins A.S., et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis // Precam. Res. 2008. Vol. 160. P. 179–210.
- Li Z.-X., Mitchell R.N., Spencer C.J., et al. Decoding Earth's rhythms: Modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes // Precam. Res. 2019. Vol. 323. P. 1–5.
- 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 // Precam. Res. 2017. Vol. 292. P. 1–12.
- Lubnina N.V., Slabunov A.I. Reconstruction of the Kenorland supercontinent in the Neoproterozoic and paleomagnetic and geological data // Moscow University Geol. Bull. 2011. Vol. 66, No. 4. P. 242–249.
- Lubnina N.V., Zakharov V.S. Assessment of the Contribution of Secondary Metachronous Magnetization Components to the Precambrian Paleomagnetic Poles of the Karelian Craton // Moscow University Geol. Bull. 2018. Vol. 73, No. 6. P. 473–483.
- Meert J.G., Pivarunas A.F., Evans D.A.D., et al. The magnificent seven: A proposal for modest revision of the Van der Voo (1990) quality index // Tectonophysics. 2020. Vol. 790. 228549.
- Mertanen S. Multicomponent remanent magnetizations reflecting the geo-logical evolution of the Fennoscandian Shield—a palaeomagnetic 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 // Precamb. Res. 2006. Vol. 144. P. 239–260.
- Murphy J.B., Nance R.D. Speculations on the mechanisms for the formation and breakup of supercontinents // Geoscience Frontiers. 2013. Vol. 4. P. 185–194.
- Pasenko A.M., Lubnina N.V. The Karelian craton in the Paleoproterozoic: New paleomagnetic data // Moscow University Geol. Bull. 2014. Vol. 69, No. 4. P. 189–197.
- Pisarevsky S.A., Elming S.-A., Pesonen L.J., Li Z.-X. Mesoproterozoic paleogeography: Supercontinent and beyond // Precam. Res. 2014. Vol. 244. P. 207–225.
- Rogers J.J.W., Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent // Gondwana Res. 2002. Vol. 5(1) P. 5–22.
- Shcherbakova V.V., Lubnina N.V., Shcherbakov V.P., et al. Paleointensity Determination on Paleoarchaeal Dikes within the Vodlozerskii Terrane of the Karelian Craton // Izvestiya — Phys. of the Solid Earth. 2017. Vol. 53, No. 5. P. 714–732.
- Slabunov A.I., Guo J., Balagansky V.V., et al. Early Precambrian crustal evolution of the Belomorian and Trans-North China orogens and supercontinents reconstruction // Geodynamics & Tectonophysics, 2017. Vol. 8, № 3. P. 569–572.
- 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.
- Torsvik T.H., Olesen O., Ryan P.D., Trench A. On the palaeogeography of Baltica during the Palaeozoic: new paleomagnetic data from the Scandinavian Caledonides // Geophys. J. Int. 1990. Vol. 103. P. 261–279.
- Torsvik T.H., Smethurst M.A., Meert J.G., et al. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and

Palaeozoic — a tale of Baltica and Laurentia // *Earth Sci. Rev.* 1996. Vol. 40. P. 229–258.

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

Van Kranendonk M.J. Two types of Archean continental crust: plume and plate tectonics on Early Earth // *Amer. J. Sci.* 2010. Vol. 310. P. 1187–1209.

Veselovskiy R.V., Samsonov A.V., Stepanova A.V., et al. 1.86 Ga key paleomagnetic pole from the Murmansk craton

intrusions—Eastern Murman Sill Province, NE Fennoscandia: Multidisciplinary approach and paleotectonic applications // *Precam. Res.* 2019. Vol. 324. P. 126–145.

Zwing A. Causes and Mechanism of Remagnetisation in Paleozoic rocks—a multidisciplinary approach: PhD thesis. München: Ludwig-Maximilian University, 2003. 159 p.

Статья поступила в редакцию 04.09.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 25.01.2025