

Палеомагнетизм и источники сноса нижнекембрийских отложений Уджинского поднятия (север Сибирской платформы)*

А. М. Пасенко¹, С. В. Малышев², С. Э. Дюфрейн³, А. В. Шацилло¹

¹ Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук,
Российская Федерация, 123242, Москва, Большая Грузинская ул., 10

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

³ Университет Альберты,
Канада, Эдмонтон, Альберта, T6G 2E9

Для цитирования: Пасенко А. М., Малышев С. В., Дюфрейн С. Э., Шацилло А. В. (2020). Палеомагнетизм и источники сноса нижнекембрийских отложений Уджинского поднятия (север Сибирской платформы). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (3), 552–576. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.308>

В последнее время стало появляться все больше данных, свидетельствующих о необычном, аномальном состоянии магнитного поля на рубеже докембрия и фанерозоя. Это накладывает существенные ограничения на возможности применения палеомагнитного метода для построения различных палеореконструкций в этом временном интервале, однако позволяет лучше понять эволюцию магнитного поля Земли. До последнего времени точная привязка нижнекембрийских разрезов, несущих аномальную палеомагнитную запись к геохронологической шкале отсутствовала, что не позволяло получить адекватные оценки длительности существования аномального состояния магнитного поля. В настоящей статье представлены результаты палеомагнитного исследования нижнекембрийских терригенно-карбонатных пород Уджинского и Анабарского поднятий (эмяксинская и медвежинская свиты) севера Сибирской платформы. Получены новые свидетельства аномального характера палеомагнитной записи в этих породах. Показано, что «аномальность» палеомагнитной записи проявляется в объективном существовании двух значительно различающихся по направлениям высокотемпературных компонент естественной остаточной намагниченности (ЕОН), формирование которых не может быть объяснено более поздним перемагничиванием. На основании U-Pb-датирования обломочных цирконов, установлен нижний возрастной предел накопления пород манькайской и эмяксинской свит нижнего кембрия Уджинского поднятия ~520 млн лет, что в совокупности с палеонтологическим данными указывает на их формирование в атдабанском веке. Полученные возрастные ограничения существенно уточняют стратиграфию нижнего кембрия Уджинского поднятия, а также свидетельствуют, что специфическая палеомагнитная запись, обусловленная особенностями генерации геомагнитного поля

* Изучение палеогеографии отложений района р. Уджа и интерпретация протерозойских возрастов обломочных цирконов производились при поддержке и в рамках реализации проекта РФФ № 19-77-10048. Обработка и интерпретация палеомагнитных данных были выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00285.

терминального докембрия — раннего кембрия, прослеживается вплоть до атдабанского века включительно.

Ключевые слова: палеомагнетизм, Восточно-Сибирская платформа, нижний кембрий, манькайская свита, обломочные цирконы, U-Pb-датирование, источники сноса.

1. Введение

В последнее время наблюдается интерес к вопросу поведения магнитного поля Земли в конце протерозоя — начале палеозоя. Ряд исследований указывают на то, что в это время оно могло находиться в необычном, аномальном (по сравнению с геомагнитным полем, существовавшим на протяжении большей части фанерозоя) состоянии, характеризующимся высокой степенью изменчивости направления, напряженности, амплитуды вековых вариаций и/или значительным отклонением поля от аксиально-дипольной геометрии (Abrajevitch and Van der Voo, 2010; Vazhenov et al., 2016; Evans et al., 2016; Pavlov et al., 2018, 2004; Shatsillo et al., 2005; 2019). Как показывают численные модели геодинамики, такое поведение геомагнитного поля связано с эволюцией внутренних геосфер нашей планеты и, в частности, с формированием твердого ядра (Driscoll and Evans, 2016). Уточнение возрастных границ интервала существования аномального состояния геомагнитного поля, может иметь большое значение не только для понимания эволюции магнитного поля Земли в конце докембрия — начале фанерозоя, но и для разработки теории геодинамики, а также для понимания эволюции внутренних оболочек нашей планеты.

В результате активного изучения раннекембрийских осадочных пород Сибирской платформы (Gallet et al., 2003; Shatsillo et al., 2005; Pavlov et al., 2018, 2004) были обнаружены разрезы, содержащие в себе специфический палеомагнитный сигнал, отражающий, в соответствии со взглядами авторов цитируемых работ, особенности геомагнитного поля обсуждаемого «аномального интервала». До последнего времени точная привязка разрезов к геохронологической шкале, несущих аномальную палеомагнитную запись, отсутствовала. Это обстоятельство не позволяло получить объективные оценки длительности обсуждаемого «аномального интервала». В настоящей работе мы представляем новые U-Pb-геохронологические и палеомагнитные данные нижнекембрийского разреза Уджинского поднятия, которые в значительной степени уточняют продолжительность интервала, в течение которого магнитное поле находилось в аномальном состоянии.

2. Геологическое положение объектов исследований

Уджинское поднятие располагается в северной части Сибирской платформы между Оленёкским поднятием и Анабарским массивом (рис. 1). В его пределах на отложениях рифея и венда с угловым несогласием залегает маломощная терригенно-карбонатная толща общей мощностью, не превышающая 200 м. Разрез толщи выходит на дневную поверхность в верхнем течении р. Уджа между р. Томтор и руч. Нюёкюлээх, где в ее составе выделяется четыре пачки. Базальная пачка сложена кварцевыми гравелитами и песчаниками с незначительным количеством

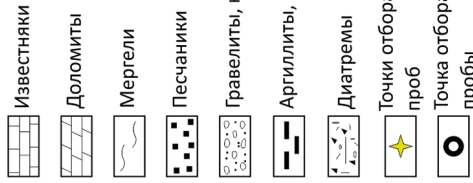
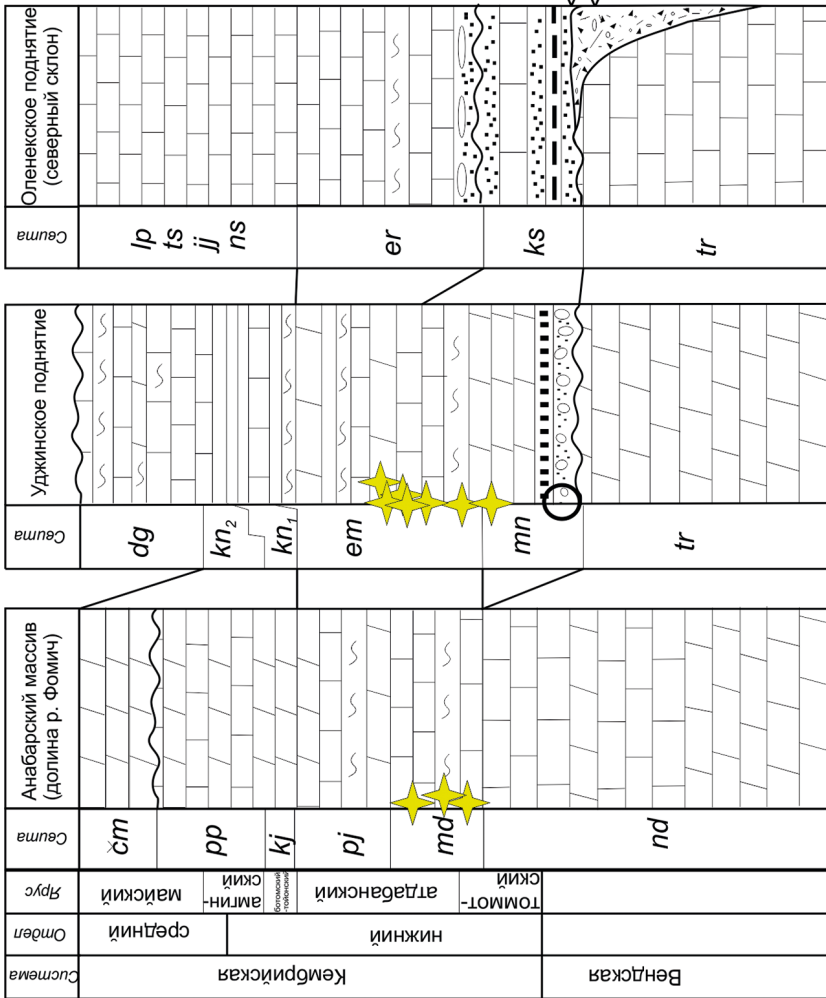
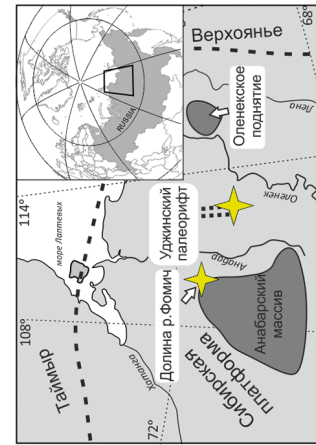


Рис. 1. Схема корреляции раннекембрийских разрезов севера Сибирской платформы (Гусев и др., 2016; Сметаникова и др., 2012)

Свиты Удзинского поднятия: *tr* — туркунская, *тп* — манькайская, *ет* — эмякская, *ки* — куонамская, *дг* — джаджарская; долины р. Фомич: *нд* — немакит-далдынская, *md* — мервежинская, *пж* — парфен-юрская, *кж* — киенг-юрская, *рр* — попитайская, *ст* — чумханская; Оленеокхокх поднятия: *tr* — туркунская, *кс* — кессюнская, *ет* — эркекетская, *нс* — ноуйская, *jj* — юнклюбит-юрская, *ts* — туссалинская, *lp* — лапарская.

* детритовые цирконы из основания кессюнской свиты (Vishnevskaya et al., 2017);

** цирконы из тубоок взрыва (Bowring et al., 1993).

угловатых зерен плагиоклаза. Верхние три пачки представлены переслаивающимися доломитистыми и пестроцветными глинистыми известняками и глинами.

Проблема возраста данной толщи и ее региональной корреляции с нижнекембрийскими отложениями Анабарского массива и Оленёкского поднятия является дискуссионной по настоящее время. В эпоху геологической съемки толща была разделена на чабурский — терригенный и куранахский — карбонатный горизонты. Оба горизонта были отнесены к существовавшему в то время в стратиграфической шкале алднскому ярусу раннего кембрия по остаткам кембрийских форм. Например, в верхней части куранахского горизонта были описаны *Pagetiellus lenaicus*, *Calodicus sp.*, *Hebediscus attleborensis*, которые относятся к зоне *Pagetiellus anabarus* (~518.5–517.5 млн лет) (Ogg et al., 2016; Межвилк и Марков, 1983; Эрлих и Степаненко, 1965). Более поздние исследования показали, что чабурский горизонт (терригенный) коррелируется с верхней частью манькайской, а куранахский (карбонатный) — с нижней частью эмяксинской свитами, выделенными в бассейне р. Куонамка. Возраст границы свит по различным данным оценивается либо в 531 млн лет (Kouchinsky et al., 2017), либо соответствует средней части томмотского яруса общей стратиграфической шкалы (ОСШ) (Гусев и др., 2016). Восточнее, на Оленёкском поднятии, данная толща коррелируется с кесюсинской свитой, возраст которой оценивается как поздний венд — томмот (Розанов и др., 1992).

С целью уточнения нижней возрастной границы накопления нижней части терригенной пачки и реконструкции источников сноса нижнекембрийских толщ Уджинского поднятия нами было выполнено U-Pb-датирование обломочных цирконов, содержащихся в песчаниках основания чабурского горизонта (обр. SM16-01, 70°43'14.30"С, 117°22'37.30"В).

Второй объект исследования, расположенный на северо-восточной окраине Анабарского массива в долине р. Фомич, соответствует верхней части немакитдалдынской свиты и медвежинской свите. Возраст данных свит по данным геологической съемки относится к томмотскому ярусу нижнего кембрия (Гусев и др., 2016), а по изучению органических остатков граница свит находится в верхней части позднего венда (Kouchinsky et al., 2017).

3. Отбор образцов и методы исследований

3.1. Палеомагнитные исследования

Для палеомагнитных исследований было отобрано 98 ориентированных образцов красноцветных известняков манькайской и эмяксинской свит из 7 отдельных обнажений (сайтов). Все сайты расположены в бортах р. Уджа в верхнем ее течении на расстоянии ~10 км выше устья р. Томтор (лев. приток р. Уджа). Расстояние между крайними точками отбора образцов — 7 км.

В долине р. Фомич из береговых обнажений терригенно-карбонатных красноцветных пород медвежинской свиты была отобрана рекогносцировочная палеомагнитная коллекция, включавшая 83 образца (отбор выполнялся при полевых работах в 2004 г. Р. В. Веселовским, А. В. Шацилло и П. Ю. Петровым).

Из каждого сайта отбиралось по 5–20 ориентированных штуфов по разрезу снизу-вверх в зависимости от мощности представленного обнажения. Впослед-

ствии из отобранных штучков изготавливались ориентированные образцы для проведения лабораторных исследований. Для выделения компонент намагниченности все образцы были подвергнуты ступенчатой магнитной чистке по стандартной методике (Храмов и др., 1982) в Лаборатории главного геомагнитного поля и палеомагнетизма Института физики Земли (ИФЗ РАН). Все образцы подвергались температурной чистке до полного размагничивания или же до того момента, когда величина намагниченности становилась соизмерима с уровнем чувствительности магнитометра ($\sim 1 \times 10^{-7}$ А/м). Число шагов чистки варьировалось от 14 до 24 (в зависимости от величины естественной остаточной намагниченности (ЕОН) образца и качества палеомагнитного сигнала). Для размагничивания использовалась немагнитная печь ММТD-80 (Великобритания) с величиной некомпенсированного поля не более 5–10 нТл. Измерения остаточной намагниченности производились на криогенном магнитометре 2G Enterprises (США). Все лабораторные исследования проводились в помещении, экранированном от внешнего магнитного поля. Обработка измерений выполнялась в пакете программ Энкина (Enkin, 1994), использующего при выделении компонент намагниченности метод PCA (Kirschvink, 1980).

Комплекс петромагнитных исследований проводился на термомагнитометре конструкции Ю.К. Виноградова (ГО «Борок») и на вибромагнитометре PMC MicroMag 3900 (Lake Shore, США). Анализ коэрцитивных спектров образцов по методу cumulative log-Gaussian analysis (CLGA) кривой нормального намагничивания (Kruiver et al., 2001) производился в онлайн-приложении MAX UnMIX (Maxbauer et al., 2016).

3.2. U-Pb геохронологические исследования

Обломочные цирконы были выделены в ИГГД РАН (Санкт-Петербург) по стандартной методике. U-Pb-исследования цирконов производилось в университете Эдмонтона (Канада) методом ICP-MS с лазерной абляцией. Использовалась аналитическая установка, состоящая из квадрупольного масс-спектрометра Thermo Scientific ICAP-Q и лазерной приставки New Wave UP-213. Частота лазера составляла 5 Гц при плотности энергии излучения 3–4 Дж/см² и диаметре пучка 40 мкм. Для учета фракционирования U-Pb и воспроизводительности использовались стандарты GJ-1 (Jackson et al., 2004), LH9415 (Ashton et al., 1999) и Plešovice (Sláma et al., 2008). Указанные погрешности представляют собой среднеквадратичное сочетание стандартных отклонений измерений и общей воспроизводимости стандартов во время аналитической сессии. Воспроизводимость 2σ для стандартов оценивается в ~ 1 –2 % для $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и 2–3 % для $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Данные, которые содержали значительное количество обыкновенного свинца, были скорректированы по методу Андерсона (Andersen, 2002).

При последующей обработке данных за время кристаллизации цирконов принимался возраст, рассчитанный по изотопным отношениям $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ или $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Возрастной рубеж для выбора изотопного отношения при расчете возраста принимался 1000 млн лет, рекомендованный Дж. Джерелсом (Gehrels, 2012). Критерием для разделения на «древние» и «молодые» цирконы является возраст, рассчитанный по изотопному отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; в случае его превышения зна-

чения 1000 млн лет за возраст кристаллизации принимался возраст, вычисленный по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, в противном случае принимался возраст, рассчитанный по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Расчет дискордантности (D) производился по тому же принципу с разделением возрастов на «древние» и «молодые». Для «древних» цирконов дискордантность оценивалась (при $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}_{\text{возраст}} > 1000$ млн лет):

$$D = \left(1 - \frac{^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U age}}{^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb age}} \right) * 100 \%,$$

и для «молодых» (при $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}_{\text{возраст}} < 1000$ млн лет) (Spencer et al., 2016):

$$D = \left(1 - \frac{^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U age}}{^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U age}} \right) * 100 \%.$$

Предельное значение дискордантности, при котором зерно исключалось из рассмотрения, принималось 10 %.

Для анализа распределения возрастов обломочных цирконов были построены диаграммы с KDE (kernel density estimation — ядерная оценка плотности) (Vermeesch, 2012). Максимальный возраст осадконакопления рассчитывался как средневзвешенное значение пика наиболее молодой популяции зерен (Spencer et al., 2016). Обработка данных, построение диаграмм и расчет пиков возрастов выполнялись в приложении IsoplotR (Vermeesch, 2018).

4. Результаты исследований

4.1. U-Pb-датирование обломочных цирконов

Из базальной пачки нижнекембрийских кварцевых песчаников (верхняя часть манькайской свиты, чабурский горизонт) было выделено и продатировано 130 обломочных зерен цирконов. Результаты датирования представлены на рис. 2 и в прил. 3.1¹.

Среди всей популяции обломочных цирконов выделяется две морфологические группы: изометричные и длиннопризматические кристаллы (рис. 3). Среди изометричных зерен практически все зерна не сохранили своей первичной огранки и несут на себе следы физической абразии. Для некоторых зерен характерна слабовыраженная внутренняя зональность, другие зерна характеризуются наличием метаморфических оторочек или однородной внутренней структурой. Среди призматических выделяются хорошо ограненные цирконы длиннопризматического габитуса, вплоть до игольчатого и слабоокатанные обломки призматических зерен. Зерна, не попадающие в эти группы, единичны и имеют угловатую форму.

¹ Приложение 3.1 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/6813/6140>. Приложение дано в авторской редакции.

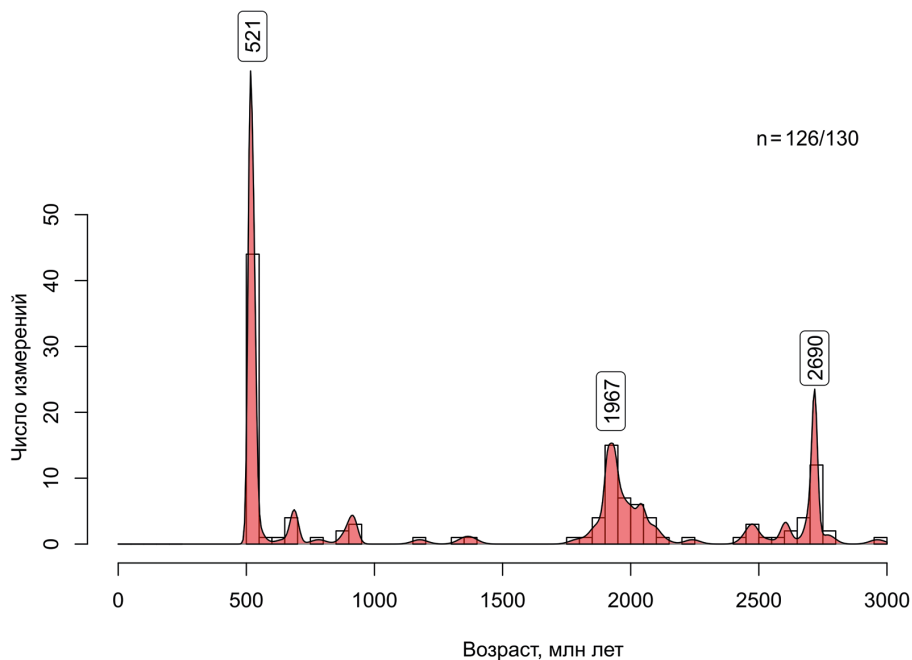


Рис. 2. График распределения возрастов обломочных цирконов из нижнекембрийских песчаников Уджинского поднятия (обр. SM16-01)

Вертикальные столбики — гистограмма; красным цветом показана кривая ядерной оценки плотности (KDE); n — число определений с $D < 10\%$ по отношению к общему числу измерений.

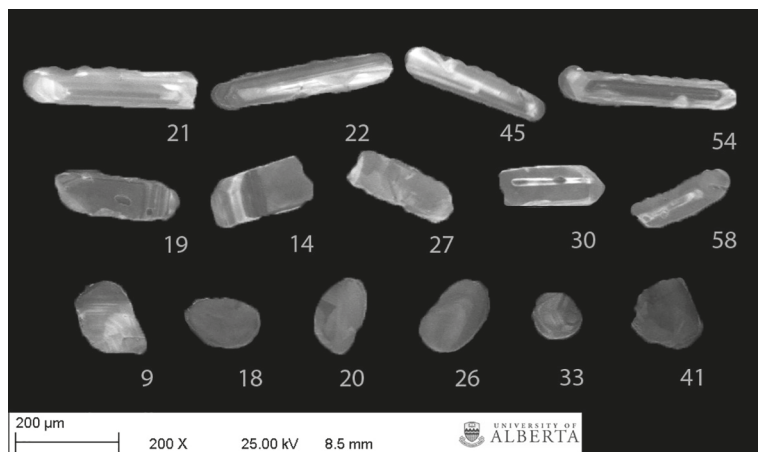


Рис. 3. Катодоллюминесцентное изображение обломочных цирконов из нижнекембрийских песчаников Уджинского поднятия

Индивидуальные возрасты 126 зерен с $D < 10\%$ распределяются в интервале от 502 до 2962 млн лет (рис. 2). Из них около 36 % выборки моложе границы кембрий — докембрий (~541 млн лет (Ogg et al., 2016)). Среди докембрийских зерен на диаграмме с KDE выделяется два крупных пика вокруг значений 2000 и 2500–2700 млн лет (32 и 21 % от всей выборки соответственно). Среди остальных цир-

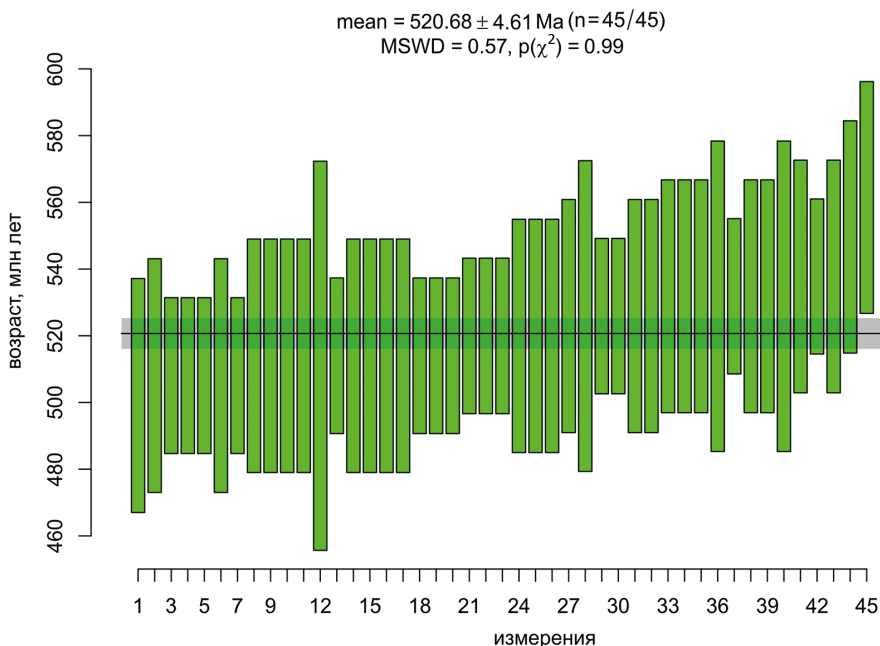


Рис. 4. Рассчитанное средневзвешенное значение наиболее молодой популяции обломочных цирконов из нижнекембрийских песчаников Уджинского поднятия (45 зерен, $D < 10\%$)

MSWD — значение критерия хи-квадрат; $p(\chi^2)$ — уровень значимости.

конов преобладают зерна неопротерозойского возраста с двумя отчетливыми максимумами 690 и 910 млн лет и малочисленная выборка с мезопротерозойскими значениями от 1170 до 1380 млн лет. Средневзвешенное значение возраста наиболее молодой когерентной группы цирконов с дискордантностью менее 10 % составило 521 ± 5 млн лет ($n = 45$, $MSWD = 0.57$, $p(\chi^2) = 0.99$) (рис. 4). Возрастные группы, выделенные на диаграмме с KDE, соотносятся с морфологическими группами зерен. Так, доминирующая группа цирконов со значением пика 521 млн лет состоит преимущественно из длиннопризматических и игольчатых зерен цирконов. В единичных случаях зерна представлены небольшими неокатанными обломками. Древние — раннепротерозойские и архейские зерна в основном хорошо окатаны и имеют округлую форму. Мезопротерозойские зерна так же, как и раннепротерозойские, хорошо окатаны, тогда как вендские зерна по морфологии больше похожи на зерна кембрийского возраста — представлены призматическими формами.

4.2. Палеомагнитные исследования

4.2.1. Манькайская и эмяксинская свиты Уджинского поднятия

В результате лабораторных исследований образцы известняков раннекембрийских манькайской и эмяксинской свит показали различное качество палеомагнитного сигнала: от очень «шумного» и неинтерпретируемого до стабильного.

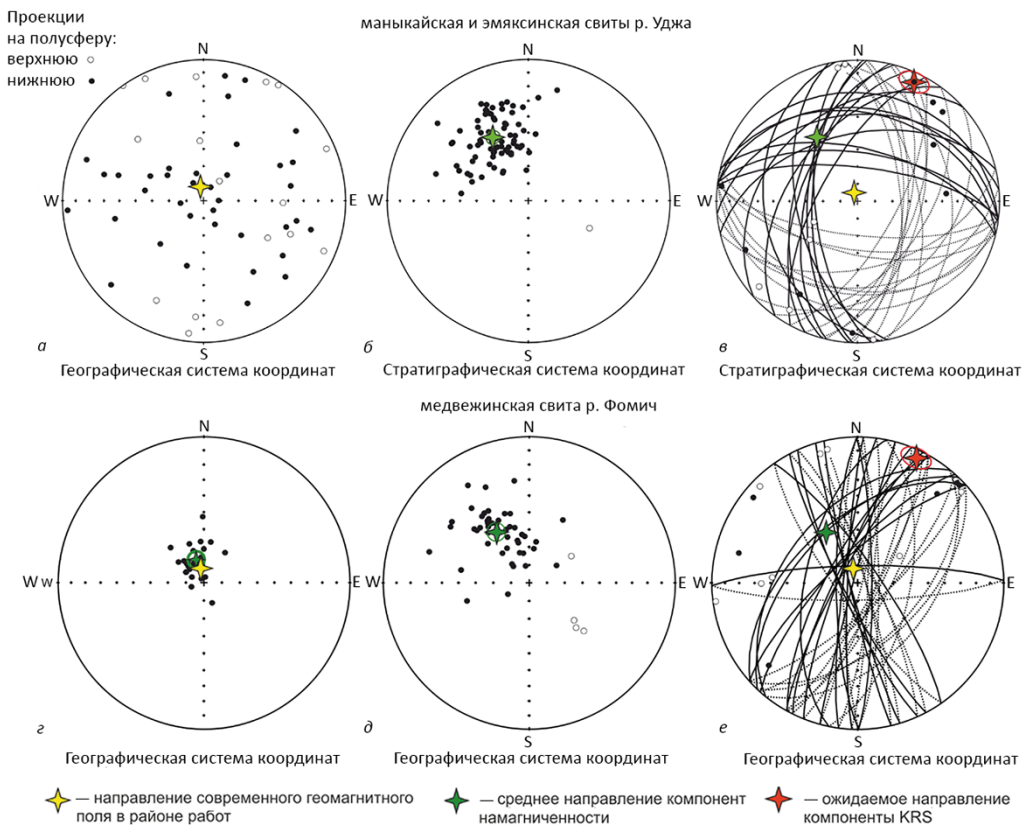


Рис. 5. Стереограммы направлений компонент намагниченности, выделенных в образцах раннекембрийских карбонатов севера Сибирской платформы

а, г — направления низкотемпературных компонент намагниченности; б, д — направление компоненты ht₁; в, з — круги перемагничивания, а также выделенные направления компоненты ht₂. Ожидаемое направление компоненты KRS см. в таблице.

Величина ЕОН образцов известняков варьирует от 6×10^{-3} до 3×10^{-2} А/м. В низкотемпературном интервале (120–300 °С) присутствует компонента намагниченности (It), направления которой распределены на сфере хаотически (рис. 5). Формирование данной компоненты мы связываем с частичным подмагничиванием образцов во время хранения коллекции, далее в тексте она не обсуждается.

В 75 образцах выделяется наиболее стабильная высокотемпературная (ht₁) компонента намагниченности (рис. 6). Зачастую она же и является характеристической (идущей в ноль на диаграмме Зийдervельда). Данная компонента полностью разрушается к 600–660 °С. Исходя из величин деблокирующих температур и результатов термомагнитного анализа (см. далее), можно предположить, что основным магнитным минералом в породе выступает гематит. Несмотря на то, что компонента ht₁ является наиболее стабильной, примерно в 20% образцов она не идет в начало координат диаграммы Зийдervельда в строгом смысле этого слова, а проходит мимо него (рис. 6), что указывает на присутствие в образцах другой, более стабильной (высокотемпературной) компоненты, отличной от ht₁ по направлению.

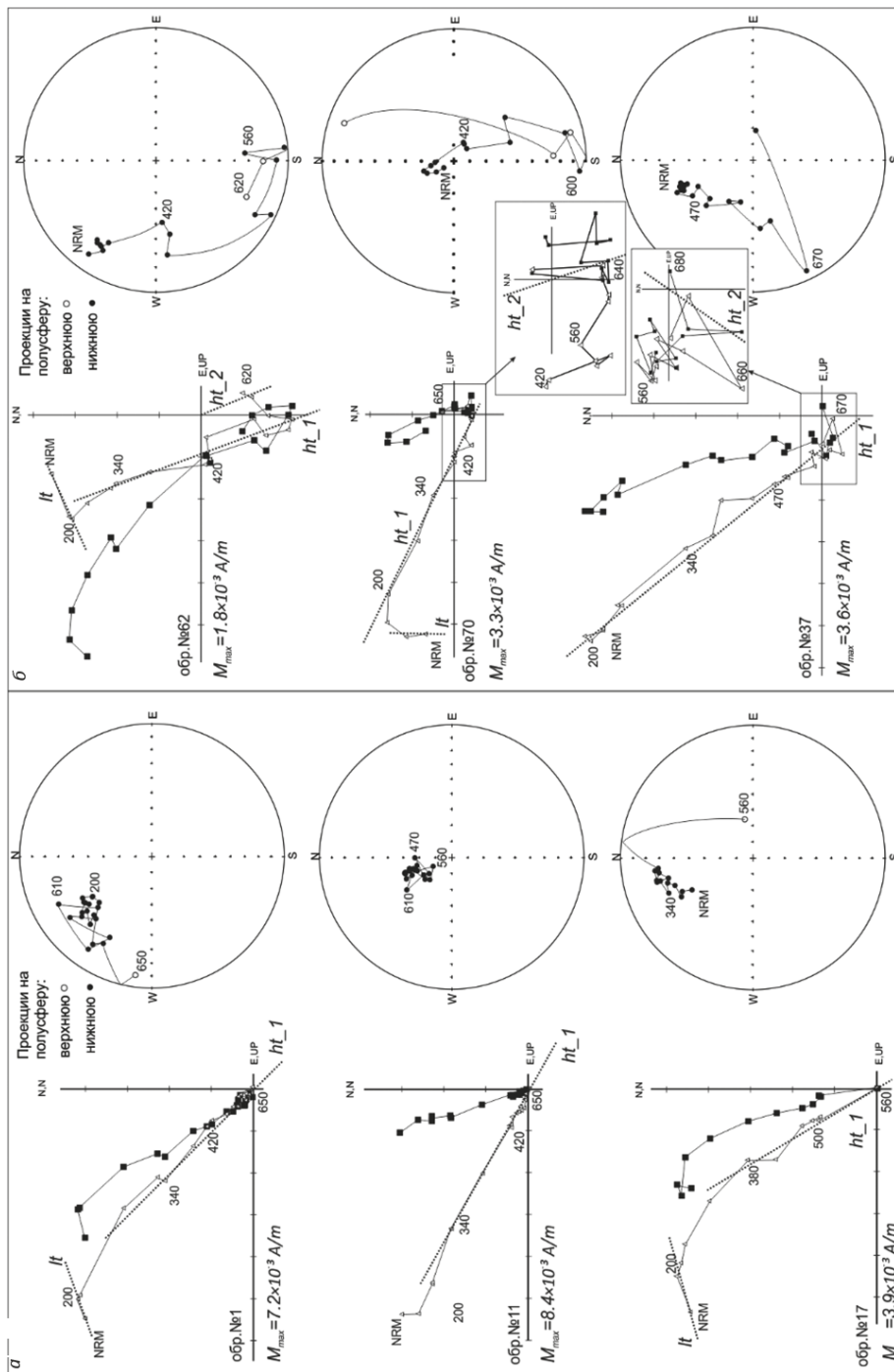


Рис. 6. Диаграммы Зейдверльда и стереограммы, представляющие результаты ступенчатого температурного размагничивания раннекембрийских карбонатов Удзюнского поднятия

a — результаты размагничивания образцов с единственной компонентой ht_1 ; *b* — результаты размагничивания образцов с компонентами ht_1 и ht_2 . Диаграммы приведены в географической системе координат.

В 14 образцах выделяется еще одна характеристическая компонента намагниченности, с блокирующими температурами 620–660 °С (рис. 6). Данная высокотемпературная компонента (ht_2) проявлена только в тех образцах, где ht_1 проходит мимо нуля, и именно компонента ht_2 в таких случаях и является характеристической. К сожалению, компонента ht_2 является крайне нестабильной и «шумной», что существенно затрудняет ее выделение. Присутствие этой компоненты в ряде образцов проявляется на стереограммах в виде кругов перемагничивания, уходящих от проекции компоненты ht_1 . К сожалению, используя круги перемагничивания мы можем лишь ограничить возможное направление компоненты ht_2 . На рис. 5 видно, что в расположении кругов перемагничивания, а также в направлениях компоненты ht_2 есть некоторая закономерность, которая состоит в том, что круги, как и компонента ht_2 , преимущественно ориентированы в СВ-ЮЗ направлениях. Стоит отметить, что направления компоненты ht_2 имеют биполярное распределение. Это подтверждается тем, что практически все круги расходятся из области, расположенной в районе концентрации направлений компоненты ht_1 в противоположных направлениях. При этом, смещаясь вдоль кругов в процессе магнитной чистки, проекции векторов естественной остаточной намагниченности движутся в сторону северо-восточных/юго-западных склонений (рис. 6).

В то же время направления компоненты ht_2 и круги перемагничивания (рис. 5) «тянутся» к направлению, полученному в работе (Kirschvink and Rozanov, 1984) (в дальнейшем будем называть эту компоненту KRS), которое отвечает аномальному направлению магнитного поля на рубеже протерозоя/фанерозоя (Pavlov et al., 2018).

4.2.2. Медвежинская свита долины р. Фомич

Породы медвежинской свиты долины р. Фомич, в целом, показывают характер палеомагнитной записи, аналогичный записи в породах Уджинского поднятия. Вектор ЕОН отличается крайне нестабильным поведением и достаточно «шумным» сигналом. Как и в раннекембрийских породах уджинского поднятия, в породах медвежинской свиты нами были выделены:

- низкотемпературная компонента намагниченности (lt) с деблокирующими температурами 150–300 °С, направление которой совпадает с направлением геомагнитного поля в районе работ (рис. 5);
- высокотемпературная компонента с деблокирующими температурами 400–680 °С, аналогичная компоненте ht_1 ;
- высокотемпературная компонента с деблокирующими температурами 610–680 °С, аналогичная компоненте ht_2 .

Направление высокотемпературной компоненты намагниченности (выделена в 51 образце) характеризуется северо-западным склонением и распределением положительных наклонений от умеренных до крутых (рис. 5). Подобные направления являются ожидаемыми для компоненты KHR в Прианабаре.

Направления высокотемпературных компонент с крутыми наклонениями крайне близки к направлению lt -компоненты и скорее всего могут быть суще-

ственно контаминированы современным геомагнитным сигналом (рис. 5). Помимо направлений компоненты ht_1 с ожидаемыми направлениями (KHR), отмечается наличие трех образцов, в которых оказалась записана обратная им компонента намагниченности (рис. 5). Следует отметить, что до настоящего времени записи обратных направлений компоненты KHR описано не было. В подавляющем большинстве случаев присутствие компоненты ht_2 проявляется в виде кругов перемагничивания, идущих от проекции компоненты ht_1 или от проекции направления низкотемпературной компоненты намагниченности (рис. 5). Как и в образцах Уджинского поднятия, большинство направлений данной компоненты характеризуются «шумным» распределением, тяготеющим к северо-восточным и юго-западным склонениям и пологим наклонениям обеих полярностей. В пользу первичности выделенных компонент намагниченности в раннекембрийских породах склона Анабарского и Уджинского поднятий свидетельствуют несколько факторов:

- выдержанность палеомагнитных направлений и компонентного состава намагниченности как по разрезу раннекембрийских толщ Уджинского поднятия, так и по их простиранию;
- отличие рассчитанных палеомагнитных направлений от известных более молодых фанерозойских направлений Сибирской платформы, в том числе и от наиболее близких по возрасту определений для тойонского, майского и амгинского веков (рис. 7);
- совпадение рассчитанного нами полюса с ожидаемыми направлениями для этого времени (рис. 7, таблица);
- биполярное распределение компонент KHR и KRS, свидетельствующее в пользу первичности намагниченности.

5. Магнитная минералогия и обоснование первичности направлений

Как было показано выше, деблокирующие температуры высокотемпературных компонент намагниченности варьируют в интервале 620–660 °С, что характерно для гематита, или же гемоильменита. Анализ зависимости намагниченности насыщения (I_s) от температуры образцов известняков показал, что в породе содержится некоторое количество парамагнитных минералов, а также магнитный минерал с температурой Кюри в районе 640 °С (рис. 8). Также показано, что и в образцах с единственной компонентой KHR (обр. № 11, 17, рис. 6), и в образцах, содержащих компоненту KRS (обр. № 70, рис. 6), магнитоминералогический состав в целом достаточно однотипен (рис. 8). Анализ коэрцитивных спектров кривой нормального намагничивания (Kuiver et al., 2001) также свидетельствует о наличии в исследованных образцах высококоэрцитивного магнитного минерала с величинами поля насыщения более 250 мТл (рис. 8).

Совокупность петромагнитных данных о величине блокирующих температур (620–660 °С), о точках Кюри (640 °С) и о величине полей насыщения магнитного минерала (> 250 мТл) свидетельствует о том, что основной магнитный минерал, содержащийся в изучаемых породах, по-видимому, представлен гематитом. Суще-

Таблица. Направления высокотемпературных компонент намагниченности, выделенных в раннекембрийских породах севера Сибирской платформы

Разрез/свита	N	Географическая система координат				Стратиграфическая система координат				Координаты полюса			Ссылки
		D°	I°	K	a95°	D°	I°	K	a95°	Plat°	Plong°	A95°	
Разрез р. Б. Куонамка, Эмяксинская свита (N70.6 E112.8)	47	342.3	57.6	57.2	3.9	342.3	57.6	57.2	3.9	-56.3	138.3	4.9	(Pavlov et al., 2018)
Чекуровская антиклиналь, Тюсерская свита (N71.1 E127.4)	25	79.1	65.7	21.8	6.3	333.4	56.6	25.1	5.9	-53.4	164.1	7.3	(Pavlov et al., 2004)
Разрез р. Хорбусунка, Туркутская свита (N71.4 E123.9)	12	337.6	55.4	43.7	6.6	337.6	55.4	43.7	6.6	-52.5	160.8	7.9	(Pavlov et al., 2004)
Разрез р. Уджа, Эмяксинская свита (N70.7 E117.3)													
сайт_1 (N70.728° E117.470°)	16	334.2	52.6	78.1	4.2	334.2	52.6	78.1	4.2				
сайт_2 (N70.730° E117.439°)	4	323.2	54.4	13.2	26.3	323.2	54.4	13.2	26.3				
сайт_3 (N70.728° E117.430°)	16	333.5	42.5	19.0	8.4	331.8	42.0	19.0	8.4				
сайт_4 (N70.726° E117.402°)	13	338.2	36.5	23.4	8.4	338.2	36.5	23.4	8.4				
сайт_5 (N70.717° E117.403°)	3	340.9	48.7	24.4	25.5	340.9	48.7	24.4	25.5				

сайт_6 (N70.716° E117.300°)	11	333.0	51.5	11.8	13.2	313.7	52.5	11.8	13.2				
сайт_7 (N70.721° E117.289°)	11	334.2	50.6	21.4	10.1	326.0	55.4	21.4	10.1				
Среднее по сайтам	7	335.7	48.3	108.8	5.8	330.4	49.2	75.2	7.0				
Среднее по образцам	73	335.2	46.6	22.0	3.6	330.3	47.4	20.7	3.7	-44.7	155.0	3.9	(Эта работа)
Разрез р. Фомич, Медвежинская свига (N71.9 E110.6)	51	327.3	56.2	17.7	4.9	327.3	56.2	17.7	4.9	-51.1	154.2	6.0	(Эта работа)
Полюс Храмова (N70.7 E117.3)						328.6	47.0		7.7	-44.0	157.0	8.0	(Храмов и др., 1982)
Полюс Киршвинка (N70.7 E117.3)						49.4	9.4		7.0	-17.0	65.0	5.0	(Kirschvink and Rozanov, 1984)
Тойонский ярус (ϵ_{1m})	35	171.6	-54.6	24.3	5.0	172	-54.5	24.0	5.1	-53.3	135.0	6.0	(Gallet et al., 2003)
Амгинский ярус (ϵ_{2am})	51	169.5	-46.5	21.1	4.4	170.1	-46.0	20.8	4.5	-45.5	136.6	4.6	(Gallet et al., 2003)
Майский ярус (ϵ_{2m})	107	165.2	-43.3	19.3	3.2	165.1	-43.0	19.3	3.2	-42.7	142.5	3.1	(Gallet et al., 2003)

Примечание: D, I, K, $\alpha 95$ — параметры фишеровского распределения; Plat, Plong, A95 — координаты палеомагнитных полюсов и радиус их овалов доверия.

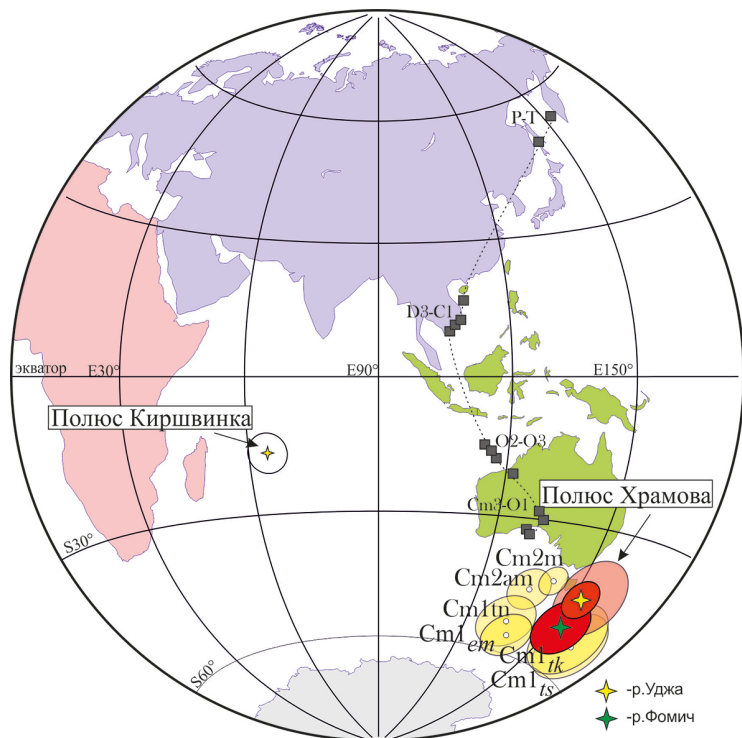


Рис. 7. Сравнение полученных раннекембрийских полюсов (желтая и зеленая звезды) с полюсами, полученными предшественниками (см. таблицу) и с палеозойскими полюсами (квадраты) Сибирской платформы (Smethurst et al., 1998)

Пунктирная линия маркирует кривую кажущейся миграции палеомагнитного полюса Сибирской платформы. Полюс Киршвинка — раннекембрийский полюс из работы (Kirschvink and Rozanov, 1984). Возрасты палеозойских полюсов: Cm1 — ранний кембрий, Cm2 — средний кембрий, Cm3-O3 — поздний кембрий–ранний ордовик, O2-O3 — средний–поздний ордовик, D3-C1 — поздний девон–ранний карбон, P-T — пермь–триас. Обозначения полюсов: Cm1_{em} — эмяксинская свита, Cm1_{ts} — тюсерская свита, Cm1_{tk} — туркутская свита. Желтая звезда — полюс, полученный в настоящей работе для атдабанского яруса.

ствование двух коэрцитивных компонент на соответствующем графике может говорить о том, что в породах имеется два высококоэрцитивных магнитных минерала ($V_c = 250\text{--}360$ мТл и $V_c > 1000$ мТл). Таким образом, мы имеем дело с двумя генерациями гематита с близкими точками Кюри (рис. 8), которые мы не можем разделить при традиционных термомагнитных исследованиях. В то же время подобная картина характерна для образцов как содержащих компоненту KRS, так и не несущих ее. Таким образом, наличие двух генераций гематита не находит своего отражения в палеомагнитной записи и связано, вероятнее всего, с природой терригенно-карбонатных пород. В качестве одной из версий их образования можно предположить, что одна генерация гематита имеет детритовую природу, а вторая — хемогенную. В этом случае обе генерации гематита могут нести идентичный палеомагнитный сигнал, что мы и наблюдаем.

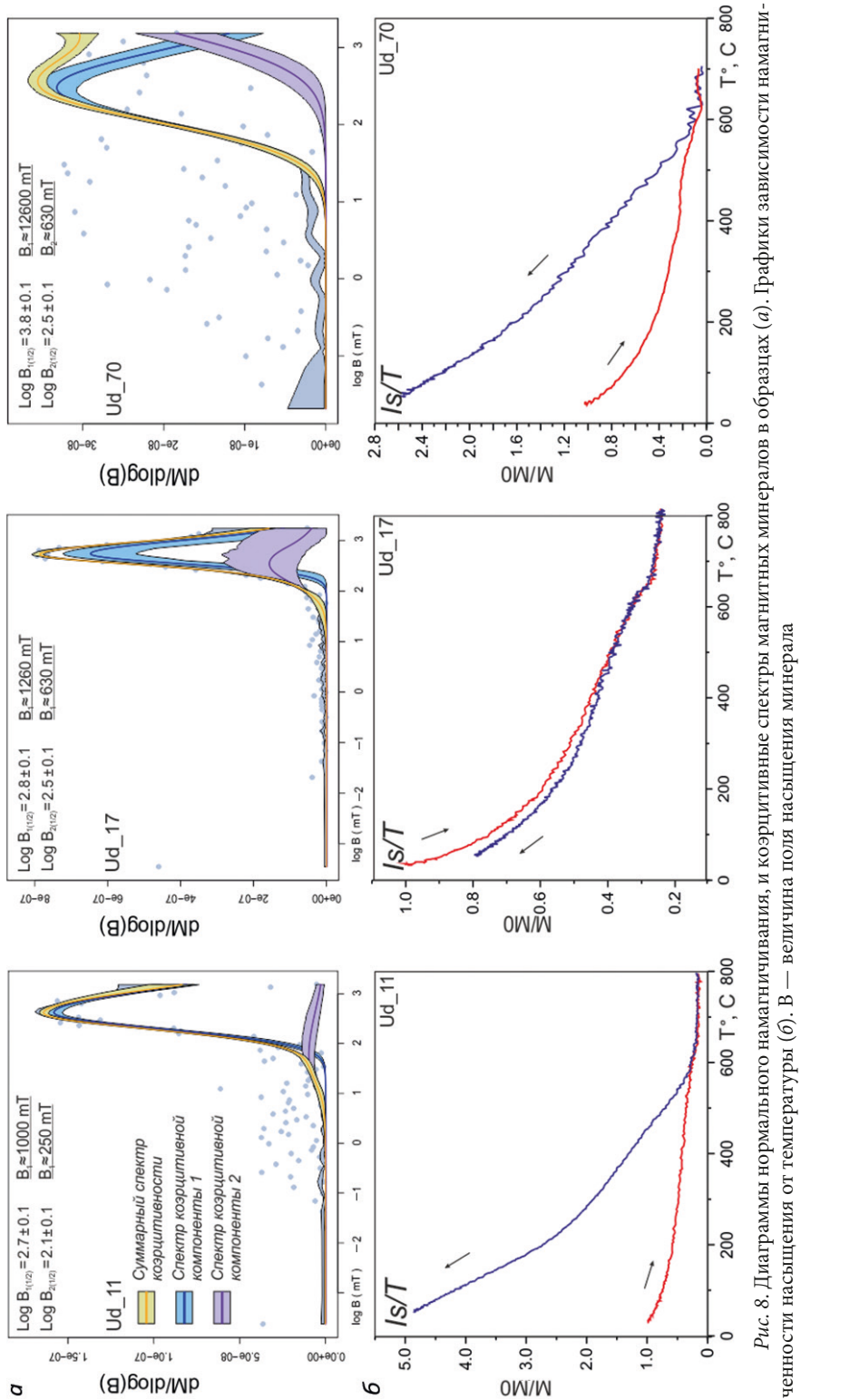


Рис. 8. Диаграммы нормального намагничивания, и коэрцитивные спектры магнитных минералов в образцах (а). Графики зависимости намагниченности насыщения от температуры (б). В — величина поля насыщения минерала

6. Обсуждение результатов

6.1. Геохронологические исследования

Мы провели анализ U-Pb-данных по обломочным цирконам в соответствии с алгоритмом, изложенным в работе (Spencer et al., 2016). В результате установлено, что в раннекембрийское время в регионе действовали разнообразные питающие провинции и нижнее возрастное ограничение на время накопления верхней части манькайской свиты (чабурский горизонт) составляет 521 млн лет. Таким образом, новые датировки не согласуются с существующими на данный момент региональными корреляциями нижнекембрийских отложений севера Сибири (Kouchinsky et al., 2017; Гусев и др., 2016), согласно которым изученные отложения р. Уджи относятся к томмотскому ярусу (525–521 млн лет) или даже немного древнее. Новые данные указывают на то, что исследуемые породы накапливались по меньшей мере в атдабанское время (моложе 521 млн лет), что не позволяет коррелировать терригенный отложения чабурского горизонта с манькайской свитой. Различие в возрасте нижней границы раннекембрийских отложений на территории северной Сибири возможно в случае существования на границе венда/кембрия локальных разновозрастных бассейнов, которые были объединены в один в результате раннекембрийской трансгрессии. Более древние (докембрийские) возрастные пики интерпретируются следующим образом.

2.0 и 2.5–2.7 млрд лет — возрасты типичные для Сибирского кратона, поэтому в качестве основного источника обломочного материала рассматривается древний фундамент Сибири. С учетом окатанной формы зерен цирконов данного возраста следует полагать, что обломочный материал многократно перемывался в локальных бассейнах.

1.1–1.3 млрд лет — возрастной интервал, нехарактерный для фундамента Сибири, но обломочные цирконы с такими возрастными известными на юго-восточной и восточной окраинах платформы в позднемезопротерозойских отложениях (крупильская и уйская серии Учуро-Майской плиты, хараютехская свита Хараулахского сегмента (Podkovyrov et al., 2007; Khudoley et al., 2015)), а также в юго-восточном Прианабарье (Kuptsova et al., 2015). Их природа объясняется размывом гренвильского орогена до распада Родинии. В дальнейшем время происходил рециклинг мезопротерозойских песчаников с транспортировкой обломочного материала в северную часть платформы.

Неопротерозойские возрасты детритовых цирконов характерны для позднекембрийских и нижнекембрийских отложений севера Сибири и их распространение связывается с магматическими и метаморфическими событиями в Центральном Таймыре (Khudoley et al., 2015; Priyatkina et al., 2017).

Наиболее молодые обломочные цирконы, составляющие выборку из 45 зерен, позволяют ограничить начало осадконакопления чабурского горизонта (верхняя часть манькайской свиты) возрастом пика в 521 млн лет. Кроме того, длиннопризматический облик зерен и высокий процент от общей выборки указывают на интенсивный размыв, магматического/вулканического комплекса, расположенного вблизи от Уджинского палеорифта. На территории северной Сибири вулканизм с определенным возрастом (520 млн лет) неизвестен, но существует близкие по

возрасту немного более древние комплексы. Наиболее близкими по возрасту комплексами являются риолитовые конгломераты фронтальной части Хараулахского сегмента, с возрастными цирконов от 540 до 525 млн лет и ассоциирующий с ними комплекс базитовых интрузий (Bowring et al., 1993; Prokoriev et al., 2016). Кроме того, между Уджинским и Хараулахским поднятиями известны многочисленные трубки взрыва, возраст которых определен в интервале 540–530 млн лет (Bowring et al., 1993; Kiselev et al., 2015; Межвилк и Марков, 1983). Близкие по возрасту, но более древние цирконы описаны в кесюсинской свите в районе Оленёкского поднятия — 543 млн лет (Vishnevskaya et al., 2017). Возможно, похожее проявление магматизма могло существовать на территории всей северной окраины Сибирской платформы, однако в других местах продукты извержения, скорее всего, погребены под поздне-палеозойским осадочным чехлом.

Тем не менее наличие представительной выборки цирконов длиннопризматического облика со средневзвешенным возрастом 521 млн лет указывает на магматическую активность в непосредственной близости от бассейна осадконакопления.

6.2. Палеомагнитные исследования

По итогам палеомагнитных исследований в изученных терригенно-карбонатных породах верхней части манькайской и эмяксинской свит (чабурского и куранахского горизонтов) Уджинского поднятия и медвежинской свиты северо-восточной окраины Анабарского поднятия было выделено две высокотемпературные компоненты намагниченности. Во всех изученных образцах уверенно выделяется характеристическая стабильная компонента намагниченности (KHR), направление которой совпадает с ожидаемым направлением для раннего кембрия Сибири (Храмов и др., 1982). В то же время, в части образцов из исследованных объектов, компонента KHR не является характеристической, и появляются намеки на наличие более высокотемпературной компоненты (KRS). Эти намеки проявлены в виде кругов перемагничивания на стереограмме уходящих от проекции компоненты KHR в СВ и ЮЗ направлениях и в виде достаточно «шумных» компонент KRS, имеющих пологие наклоны и СВ/ЮЗ склонения.

Подобное поведение векторов ЕОН ранее отмечалось и в других раннекембрийских толщах Сибирской платформы и рассматривалось как отражение аномального поведения геомагнитного поля в соответствующий период времени, что, в частности, отмечалось в породах:

- эмяксинской свиты на восточном склоне Анабарского поднятия (Pavlov et al., 2018);
- пестроцветной свиты Учуро-майского региона (Pavlov et al., 2018);
- трахидолеритовых силлов хр. Туор-Асис (Pavlov et al., 2018);
- туркутской свиты Оленёкского поднятия (Pavlov et al., 2004);
- тюссерской свиты Хараулахского поднятия (Pavlov et al., 2004).

Существование в осадочных раннекембрийских породах Сибири двух независимых компонент намагниченности (KHR и KRS) в той или иной степени может служить неким маркером для возрастной корреляции исследуемых толщ. Исходя из этого можно сказать, что чабурский и куранахский горизонты Уджинского под-

нятия (манькайская и эмяксинская свиты) и медвежинская свита Анабарского поднятия сформировались в ту же эпоху аномального состояния геомагнитного поля, что и приведенные выше свиты.

Следовательно, учитывая возраст детритовых цирконов из основания чабурского горизонта Уджинского поднятия (521 млн лет), можно сделать вывод о том, что нестабильное состояние геомагнитного поля, записанное в раннекембрийских породах Сибири, существовало и после 521 млн лет минимум до атдабана включительно (Gallet et al., 2003).

Ранее для томмот-атдабанского времени был предложен палеомагнитный полюс, полученный по породам эмяксинской свиты долины р. Б. Куонамка (Pavlov et al., 2018). Анализируя поведение вектора ЕОН в породах эмяксинской свиты р. Б. Куонамка, медвежинской свиты р. Фомич и эмяксинской свиты р. Уджа можно заметить, что средние направления наиболее стабильных компонент (КНР) и палеомагнитные полюсы, рассчитанные из них, значительно различаются (см. таблицу, рис. 7). Так, направления компоненты КНР в эмяксинской свите р. Б. Куонамка и р. Уджа различаются на 12.5° при критическом угле 5.1° ($\gamma/\gamma_c = 12.5^\circ/5.1^\circ$), а в медвежинской свите р. Фомич и в эмяксинской свите р. Уджа на 9.0° при критическом угле 6.0° ($\gamma/\gamma_c = 9.0^\circ/6.0^\circ$) (McFadden and McElhinny, 1990). Это объясняется тем, что, скорее всего, в образцах эмяксинской свиты р. Б. Куонамка и в образцах медвежинской свиты р. Фомич вектор ЕОН существенно контаминирован современной вязкой компонентой, в то время как подобная контаминация в породах р. Уджа практически не заметна (рис. 5). Палеомагнитный полюс, полученный в настоящей работе по породам эмяксинской свиты Уджинского поднятия, может считаться предварительным полюсом Сибирской платформы для атдабанского яруса нижнего кембрия.

7. Выводы

В результате проведенных палеомагнитных и геохронологических исследований нижнекембрийских пород чабурского и куранахского горизонтов (верхов манькайской и низов эмяксинской свит) Уджинского поднятия севера Сибири были получены следующие выводы.

1. Предложен новый палеомагнитный полюс для атдабанского времени Сибирской платформы.
2. Показано, что аномальное состояние геомагнитного поля, отмечающееся на рубеже венда/кембрия, продолжалось и после 521 млн лет назад и захватывало, как минимум, атдабанское время.
3. Уточнена нижняя возрастающая граница накопления нижнекембрийских песчаников района р. Уджа и выявлен источник цирконов с возрастом 521 млн лет на территории северной Сибири.
4. Показано, что на территории Уджинского поднятия отсутствуют отложения томмотского яруса раннего кембрия и песчаники чабурского горизонта (верхняя часть манькайской свиты) залегают непосредственно на карбонатах туркутской свиты (немакит-далдынский ярус).

Литература

- Гусев, Н. И., Пушкин, М. Г., Круглова, А. А., Сергеева, Л. Ю., Богомолов, В. П., Строев, Т. С., Молчанов, А. В., Гразанов, С. А., Матюшков, А. Д., Назаров, Д. В., Морева, Н. В., Николаева, Л. С. (2016). *Государственная геологическая карта Российской Федерации. М. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилуйская. Лист R-49 — Оленок. Объяснительная записка.* Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
- Межвилк, А. А., Марков, Ф. Г. (eds.) (1983). *Геологическая карта СССР масштаба 1:1 000 000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист R-(50)-52 — Тикси.* Ленинград: Министерство геологии СССР, ВСЕГЕИ.
- Розанов, А. Ю., Репина, Л. Н., Апполонов, М. К., Шабанов, Ю. Я., Журавлев, А. Ю., Пегель, Т. В., Федоров, А. Б., Асташкин, В. А., Журавлева, И. Т., Егорова, Л. И., Чугаева, М. Н., Дубинина, С. В., Ермак, В. В., Есакова, Н. В., Сундуков, В. В., Сухов, С. С., Жемчужников, В. Г. (1992). *Кембрий Сибири.* Новосибирск: Наука.
- Сметанникова, Л. И., Гриненко, В. С., Маланин, Ю. А., Прокопьев, А. В., Князев, В. Г., Трущелев, А. М., Юганова, Л. А., Жарикова, Л. П., Казакова, Г. Г., Шепелев, Н. Г., Ягнышев, Б. С. (2012). *Государственная геологическая карта Российской Федерации. М. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилуйская. Лист R-51 — Джарджан. Объяснительная записка.* Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
- Храмов, А. Н., Гончаров, Г. И., Комиссарова, Р. А., Писаревский, С. А., Погарская, И. А., Ржевский, Ю. С., Родионов, В. П., Слауцитайс, И. П. и др. (1982). *Палеомагнитология.* Ленинград: Недра.
- Эрлих, Э. Н., Степаненко, В. И. (1965). *Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000, Серия Анабарская, лист R-50-IX, X.* Ленинград: Недра.
- Abrajevitch, A. and van der Voo, R. (2010). Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.038>
- Andersen, T. B. (2002). Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report 204Pb. *Chemical Geology*, 192, 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Ashton, K. E., Heaman, L. M., Lewry, J. F., Hartlaub, R. P. and Shi, R. (1999). Age and origin of the Jan Lake Complex: a glimpse at the buried Archean craton of the Trans-Hudson Orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36, 185–208. <https://doi.org/10.1139/e98-038>
- Bazhenov, M. L., Levashova, N. M., Meert, J. G., Golovanova, I. V., Danukalov, K. N. and Fedorova, N. M. (2016). Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for Magnetic Field Hyperactivity? *Earth and Planetary Science Letters*, 435, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.015>
- Bowring, S. A., Grotzinger, J. P., Isachsen, C. E., Knoll, A. H., Pelechaty, S. M. and Kolosov, P. (1993). Calibrating rates of early Cambrian evolution. *Science*, 261, 1293–1298. <https://doi.org/10.1126/science.11539488>
- Driscoll, P. E. and Evans, D. A. D. (2016). Frequency of Proterozoic geomagnetic superchrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 437, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.035>
- Enkin, R. J. (1994). *A Computer Program Package for Analysis and Presentation of Paleomagnetic Data.* Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada.
- Evans, D. A. D., Veselovsky, R. V., Petrov, P. Y., Shatsillo, A. V. and Pavlov, V. E. (2016). Paleomagnetism of Mesoproterozoic margins of the Anabar Shield: A hypothesized billion-year partnership of Siberia and northern Laurentia. *Precambrian Research*, 281, 639–655. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.017>
- Gallet, Y., Pavlov, V. E. and Courtillot, V. (2003). Magnetic reversal frequency and apparent polar wander of the Siberian platform in the earliest Palaeozoic, inferred from the Khorbusuonka river section (north-eastern Siberia). *Geophysical Journal International*, 154, 829–840. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01996.x>
- Gehrels, G. E. (2012). Detrital zircon U–Pb geochronology: current methods and new opportunities. In: C. Busby, A. Azor, ed., *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances.* Wiley-Blackwell, 47–63.
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L. and Belousova, E. A. (2004). The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211, 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>

- Khudoley, A. K., Chamberlain, K. R., Ershova, V. B., Sears, J. W., Prokopiev, A. V., MacLean, J., Kazakova, G. G., Malyshev, S. V., Molchanov, A., Kullerud, K., Toro, J., Miller, E. L., Veselovskiy, R., Li, A. and Chipley, D. (2015). Proterozoic supercontinental restorations: Constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton. *Precambrian Research*, 259, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>
- Kirschvink, J. L. (1980). The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62, 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>
- Kirschvink, J. L. and Rozanov, A. Y. (1984). Magnetostratigraphy of lower Cambrian strata from the Siberian Platform: A palaeomagnetic pole and a preliminary polarity time-scale. *Geological Magazine*, 121, 189–203. <https://doi.org/10.1017/S0016756800028259>
- Kiselev, A. I., Kochnev, B. B., Yarmolyuk, V. V., Egorov, K. N. (2015). Early Cambrian magmatism in the northeastern Siberian Craton (Olenek Uplift). *Doklady Earth Sciences*, 465, 1218–1223. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15120235>
- Kouchinsky, A., Bengtson, S., Landing, E. D., Steiner, M., Vendrasco, M. and Ziegler, K. (2017). Terreneuvian stratigraphy and faunas from the Anabar Uplift, Siberia. *Acta Palaeontologica Polonica*, 62, 311–440. <https://doi.org/10.4202/app.00289.2016>
- Kruiver, P. P., Dekkers, M. J. and Heslop, D. (2001). Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 189, 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00367-3)
- Kuptsova, A. V., Khudoley, A. K., Davis, W., Rainbird, R. H. and Molchanov, A. V. (2015). Results of the U–Pb age of detrital zircons from Upper Proterozoic deposits of the eastern slope of the Anabar uplift. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 23, 246–261. <https://doi.org/10.1134/S0869593815030053>
- Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M. and Fox, D. L. (2016). MAX UnMix: A web application for unmixing magnetic coercivity distributions. *Computers and Geosciences*, 95, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.009>
- McFadden, P. L. and McElhinny, M. W. (1990). Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal International*, 103, 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
- Ogg, J. G., Ogg, G. M. and Gradstein, F. M. (2016). Cambrian. In: *A Concise Geologic Time Scale*. Elsevier, 41–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59467-9.00005-4>
- Pavlov, V. E., Gallet, Y., Shatsillo, A. V. and Vodovozov, V. Y. (2004). Paleomagnetism of the Lower Cambrian from the Lower Lena River Valley: Constraints on the Apparent Polar Wander Path from the Siberian Platform and the Anomalous Behavior of the Geomagnetic Field at the Beginning of the Phanerozoic. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 40, 114–133.
- Pavlov, V. E., Pasenko, A. M., Shatsillo, A. V., Powerman, V. I., Shcherbakova, V. V. and Malyshev, S. V. (2018). Systematics of Early Cambrian Paleomagnetic Directions from the Northern and Eastern Regions of the Siberian Platform and the Problem of an Anomalous Geomagnetic Field in the Time Vicinity of the Proterozoic–Phanerozoic Boundary. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54, 782–805. <https://doi.org/10.1134/S1069351318050117>
- Podkovyrov, V. N., Kotova, L. N., Kotov, A. B., Kovach, V. P., Graunov, O. V. and Zagornaya, N. Y. (2007). Provenance and Source Rocks of Riphean Sandstones in the Uchur–Maya Region (East Siberia): Implications of Geochemical Data and Sm–Nd Isotopic Systematics. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 15, 47–62.
- Priyatkina, N., Collins, W. J., Khudoley, A., Zastrozhnov, D., Ershova, V., Chamberlain, K., Shatsillo, A. and Proskurnin, V. (2017). The Proterozoic evolution of northern Siberian Craton margin: a comparison of U–Pb–Hf signatures from sedimentary units of the Taimyr orogenic belt and the Siberian platform. *International Geology Review*, 59, 1632–1656. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1289341>
- Prokopiev, A. V., Khudoley, A. K., Koroleva, O. V., Kazakova, G. G., Lokhov, D. K., Malyshev, S. V., Zaitsev, A. I., Roev, S. P., Sergeev, S. A., Berezhnaya, N. G. and Vasiliev, D. A. (2016). The Early Cambrian bimodal magmatism in the northeastern Siberian Craton. *Russian Geology and Geophysics*, 57, 155–175. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.011>
- Shatsillo, A. V., Rud'ko, S. V., Latysheva, I. V., Rud'ko, D. V., Fedyukin, I. V. and Malyshev, S. V. (2019). Paleomagnetic, sedimentological, and isotopic data on neoproterozoic periglacial sediments of Siberia: a new perspective on the problem of low-latitude glaciations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55, 841–863. <https://doi.org/10.31857/s0002-33372019634-58>

- Shatsillo, A. V., Didenko, A. N., Pavlov, V. E. (2005). Two competing Paleomagnetic directions in the Late Vendian: New data for the SW Region of the Siberian Platform. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7, ES4002. <https://doi.org/10.2205/2004ES000169>
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., Horstwood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N. and Whitehouse, M. J. (2008). Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249, 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Smethurst, M. A., Khramov, A. N. and Torsvik, T. H. (1998). The Neoproterozoic and Palaeozoic palaeomagnetic data for the Siberian Platform: from Rodinia to Pangea. *Earth-Science Reviews*, 43 (1–2), 1–24.
- Spencer, C. J., Kirkland, C. L. and Taylor, R. J. M. (2016). Strategies towards statistically robust interpretations of in situ U–Pb zircon geochronology. *Geoscience Frontiers*, 7, 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.006>
- Vermeesch, P. (2018). IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9, 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Vermeesch, P. (2012). On the visualisation of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 312–313, 190–194. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.021>
- Vishnevskaya, I. A., Letnikova, E. F., Vetrova, N. I., Kochnev, B. B. and Dril, S. I. (2017). Chemostratigraphy and detrital zircon geochronology of the Neoproterozoic Khorbusuonka Group, Olenek Uplift, North-eastern Siberian platform. *Gondwana Research*, 51, 255–271. <https://doi.org/10.1016/J.GR.2017.07.010>

Статья поступила в редакцию 2 марта 2020 г.
Статья рекомендована к печати 15 июня 2020 г.

Контактная информация:

Пасенко Александр Михайлович — pasenkoal@ya.ru
Мальшиев Сергей Владимирович — s.malyshev@spbu.ru
Дюфрейн Скотт Эндрю — dufrane@ualberta.ca
Шацилло Андрей Валерьевич — shatsillo@gmail.com

Paleomagnetism and provenance of the lower Cambrian sedimentary rocks of the Udzha Uplift (north of the Siberian platform)*

A. M. Pasenko¹, S. V. Malyshev², S. A. DuFrane³, A. V. Shatsillo¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10, Bolshaya Gruzinskaya ul., Moscow, 123242, Russian Federation

² St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

³ University of Alberta, Edmonton, Alberta, T6G 2E9, Canada

For citation: Pasenko A. M., Malyshev S. V., DuFrane S. A., Shatsillo A. V. (2020). Paleomagnetism and provenance of the lower Cambrian sedimentary rocks of the Udzha Uplift (north of the Siberian platform). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (3), 552–576. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.308> (In Russian)

Lately, data have been increasingly indicating an unusual, abnormal state of the magnetic field at the boundary of the Precambrian and Phanerozoic. This fact significantly limits the possibility of employing the paleomagnetic approach for creating various paleoreconstructions.

* The study of the Udzha's river Proterozoic sediments and interpretation of the Proterozoic ages of detrital zircons were carried out with the support and as part of the implementation of the RSF project no. 19-77-10048. The processing and interpretation of paleomagnetic data was supported by the RFBR grant no. 18-05-00285.

tions in this time interval, and it allows a better understanding of the evolution of the Earth's magnetic field. Until recently, there was no exact binding of Lower Cambrian sections bearing an anomalous paleomagnetic record to the chronostratigraphical chart, which made it impossible to obtain adequate estimates of the duration of the anomalous state of the magnetic field. In this study we present the results of a paleomagnetic study of the Lower Cambrian terrigenous-carbonate rocks of the Udzha and Anabar Uplifts (Emyaksa and Medvezh Formations). New evidence has been obtained of the anomalous paleomagnetic record in these rocks, which manifests itself in the objective existence of two significantly different directions of the high-temperature magnetization components, the formation of which cannot be explained by a later remagnetization. U-Pb dating of detrital zircons constrains the maximum depositional age of the Manykay and Emyaksa Formations to ~520 Ma, which, in combination with the faunistic characteristic of the upper part of the Emyaksa Formation, points to the Atdaban age of studied successions. The age constraints obtained indicate a specific paleomagnetic record, and due to the peculiarities of the generation of the geomagnetic field of the terminal Precambrian–Early Cambrian Period, trace the paleomagnetic record back to the Atdaban age, inclusive.

Keywords: paleomagnetism, East Siberian platform, Lower Cambrian, Manykay formation, detrital zircons, U-Pb dating, source rocks.

References

- Abrajevitch, A. and van der Voo, R. (2010). Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.038>
- Andersen, T. B. (2002). Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report 204Pb. *Chemical Geology*, 192, 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Ashton, K. E., Heaman, L. M., Lewry, J. F., Hartlaub, R. P. and Shi, R. (1999). Age and origin of the Jan Lake Complex: a glimpse at the buried Archean craton of the Trans-Hudson Orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36, 185–208. <https://doi.org/10.1139/e98-038>
- Bazhenov, M. L., Levasheva, N. M., Meert, J. G., Golovanova, I. V., Danukalov, K. N. and Fedorova, N. M. (2016). Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for Magnetic Field Hyperactivity? *Earth and Planetary Science Letters*, 435, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.015>
- Bowring, S. A., Grotzinger, J. P., Isachsen, C. E., Knoll, A. H., Pelechaty, S. M. and Kolosov, P. (1993). Calibrating rates of early Cambrian evolution. *Science*, 261, 1293–1298. <https://doi.org/10.1126/science.11539488>
- Driscoll, P. E. and Evans, D. A. D. (2016). Frequency of Proterozoic geomagnetic superchrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 437, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.035>
- Enkin, R. J. (1994). *A Computer Program Package for Analysis and Presentation of Paleomagnetic Data*. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada.
- Erlikh, E. N. and Stepanenko, V. I. (1965). *Geological map of the USSR. Scale 1:200 000, Anabarskaya Series, sheet R-50-IX, X*. Leningrad: Nedra Publ. (In Russian)
- Evans, D. A. D., Veselovsky, R. V., Petrov, P. Y., Shatsillo, A. V. and Pavlov, V. E. (2016). Paleomagnetism of Mesoproterozoic margins of the Anabar Shield: A hypothesized billion-year partnership of Siberia and northern Laurentia. *Precambrian Research*, 281, 639–655. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.017>
- Gallet, Y., Pavlov, V. E. and Courtillot, V. (2003). Magnetic reversal frequency and apparent polar wander of the Siberian platform in the earliest Palaeozoic, inferred from the Khorbusuonka river section (north-eastern Siberia). *Geophysical Journal International*, 154, 829–840. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01996.x>
- Gehrels, G. E. (2012). Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities. In: C. Busby, A. Azor, ed., *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Wiley-Blackwell, 47–63.
- Gusev, N. I., Pushkin, M. G., Kruglova, A. A., Sergeeva, L. Iu., Bogomolov, V. P., Stroev, T. S., Molchanov, A. V., Grazanov, S. A., Matiushkov, A. D., Nazarov, D. V., Moreva, N. V. and Nikolaeva, L. S. (2016). *State ge-*

- ological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Series Anabar-Vilyui. Sheet R-49 — Olenek. Explanatory letter. St. Petersburg: Russian Geological Research Institute Publ. (In Russian)
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L. and Belousova, E. A. (2004). The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211, 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Khramov, A. N., Goncharov, G. I., Komissarova, R. A., Pisarevsky, S. A., Pogarskaya, I. A., Rzhnevsky, Yu. S., Rodionov, V. P., Slautitsays, I. P. et al. (1982). *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra Publ. (In Russian)
- Khudoley, A. K., Chamberlain, K. R., Ershova, V. B., Sears, J. W., Prokopiev, A. V., MacLean, J., Kazakova, G. G., Malyshev, S. V., Molchanov, A., Kullerud, K., Toro, J., Miller, E. L., Veselovskiy, R., Li, A. and Chipley, D. (2015). Proterozoic supercontinental restorations: Constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton. *Precambrian Research*, 259, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>
- Kirschvink, J. L. (1980). The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 62, 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>
- Kirschvink, J. L. and Rozanov, A. Y. (1984). Magnetostratigraphy of lower Cambrian strata from the Siberian Platform: A palaeomagnetic pole and a preliminary polarity time-scale. *Geological Magazine*, 121, 189–203. <https://doi.org/10.1017/S0016756800028259>
- Kiselev, A. I., Kochnev, B. B., Yarmolyuk, V. V., Egorov, K. N. (2015). Early Cambrian magmatism in the northeastern Siberian Craton (Olenek Uplift). *Doklady Earth Sciences*, 465, 1218–1223. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15120235>
- Kouchinsky, A., Bengtson, S., Landing, E. D., Steiner, M., Vendrasco, M. and Ziegler, K. (2017). Terreneuvian stratigraphy and faunas from the Anabar Uplift, Siberia. *Acta Palaeontologica Polonica*, 62, 311–440. <https://doi.org/10.4202/app.00289.2016>
- Kruiver, P. P., Dekkers, M. J. and Heslop, D. (2001). Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 189, 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00367-3)
- Kuptsova, A. V., Khudoley, A. K., Davis, W., Rainbird, R. H. and Molchanov, A. V. (2015). Results of the U–Pb age of detrital zircons from Upper Proterozoic deposits of the eastern slope of the Anabar uplift. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 23, 246–261. <https://doi.org/10.1134/S0869593815030053>
- Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M. and Fox, D. L. (2016). MAX UnMix: A web application for unmixing magnetic coercivity distributions. *Computers and Geosciences*, 95, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.009>
- McFadden, P. L. and McElhinny, M. W. (1990). Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal International*, 103, 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
- Mezhvilk, A. A. and Markov, F. G. (eds.) (1983). *Geological map of the USSR on a scale of 1:1 000 000 (new series). Explanatory letter. Sheet R-(50)-52 — Tiksi*. Leningrad: VSEGEI Publ. (In Russian)
- Ogg, J. G., Ogg, G. M. and Gradstein, F. M. (2016). Cambrian. In: *A Concise Geologic Time Scale*. Elsevier, 41–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59467-9.00005-4>
- Pavlov, V. E., Gallet, Y., Shatsillo, A. V. and Vodovozov, V. Y. (2004). Paleomagnetism of the Lower Cambrian from the Lower Lena River Valley: Constraints on the Apparent Polar Wander Path from the Siberian Platform and the Anomalous Behavior of the Geomagnetic Field at the Beginning of the Phanerozoic. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 40, 114–133.
- Pavlov, V. E., Pasenko, A. M., Shatsillo, A. V., Powerman, V. I., Shcherbakova, V. V. and Malyshev, S. V. (2018). Systematics of Early Cambrian Paleomagnetic Directions from the Northern and Eastern Regions of the Siberian Platform and the Problem of an Anomalous Geomagnetic Field in the Time Vicinity of the Proterozoic–Phanerozoic Boundary. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54, 782–805. <https://doi.org/10.1134/S1069351318050117>
- Podkovyrov, V. N., Kotova, L. N., Kotov, A. B., Kovach, V. P., Graunov, O. V. and Zagornaya, N. Y. (2007). Provenance and Source Rocks of Riphean Sandstones in the Uchur–Maya Region (East Siberia): Implications of Geochemical Data and Sm–Nd Isotopic Systematics. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 15, 47–62.
- Priyatkina, N., Collins, W. J., Khudoley, A., Zastrozhnov, D., Ershova, V., Chamberlain, K., Shatsillo, A. and Proskurnin, V. (2017). The Proterozoic evolution of northern Siberian Craton margin: a comparison

of U–Pb–Hf signatures from sedimentary units of the Taimyr orogenic belt and the Siberian platform. *International Geology Review*, 59, 1632–1656. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1289341>

- Prokopyev, A. V., Khudoley, A. K., Koroleva, O. V., Kazakova, G. G., Lokhov, D. K., Malyshev, S. V., Zaitsev, A. I., Roev, S. P., Sergeev, S. A., Berezhnaya, N. G. and Vasiliev, D. A. (2016). The Early Cambrian bimodal magmatism in the northeastern Siberian Craton. *Russian Geology and Geophysics*, 57, 155–175. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.011>
- Rozañov, A. Y., Repina, L. N., Appolonov, M. K., Shabanov, Y. Ia., Zhuravlev, A. Y., Pegel', T. V., Fedorov, A. B., Astashkin, V. A., Zhuravleva, I. T., Egorova, L. I., Chugaeva, M. N., Dubinina, S. V., Ermak, V. V., Esakova, N. V., Sundukov, V. V., Sukhov, S. S. and Zhemchuzhnikov, V. G. (1992). *Kembrii Sibiri*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Shatsillo, A. V., Didenko, A. N., Pavlov, V. E. (2005). Two competing Paleomagnetic directions in the Late Vendian: New data for the SW Region of the Siberian Platform. *Russian Journal of Earth Sciences*, 7, ES4002. <https://doi.org/10.2205/2004ES000169>
- Shatsillo, A. V., Rud'ko, S. V., Latysheva, I. V., Rud'ko, D. V., Fedyukin, I. V. and Malyshev, S. V. (2019). Paleomagnetic, sedimentological, and isotopic data on neoproterozoic periglacial sediments of Siberia: a new perspective on the problem of low-latitude glaciations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55, 841–863. <https://doi.org/10.31857/s0002-33372019634-58>
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., Horstwood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N. and Whitehouse, M. J. (2008). Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249, 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Smetannikova, L. I., Grinenko, V. S., Malanin, Yu. A., Prokopyev, A. V., Knyazev, V. G., Trushchev, A. M., Yuganova, L. A., Zharikova, L. P., Kazakova, G. G., Shepelev, N. G. and Yagnyshev, B. S. (2012). *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Series Anabar-Vilyui. Sheet R-51 — Dzhardzhan. Explanatory letter*. St. Petersburg: VSEGEI Publ. (In Russian)
- Smethurst, M. A., Khramov, A. N. and Torsvik, T. H. (1998). The Neoproterozoic and Palaeozoic palaeomagnetic data for the Siberian Platform: from Rodinia to Pangea. *Earth-Science Reviews*, 43 (1–2), 1–24.
- Spencer, C. J., Kirkland, C. L. and Taylor, R. J. M. (2016). Strategies towards statistically robust interpretations of in situ U–Pb zircon geochronology. *Geoscience Frontiers*, 7, 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.006>
- Vermeesch, P. (2012). On the visualisation of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 312–313, 190–194. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.021>
- Vermeesch, P. (2018). IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9, 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Vishnevskaya, I. A., Letnikova, E. F., Vetrova, N. I., Kochnev, B. B. and Dril, S. I. (2017). Chemostratigraphy and detrital zircon geochronology of the Neoproterozoic Khorbusuonka Group, Olenek Uplift, North-eastern Siberian platform. *Gondwana Research*, 51, 255–271. <https://doi.org/10.1016/J.GR.2017.07.010>

Received: March 2, 2020

Accepted: June 15, 2020

Contact information:

Aleksandr M. Pasenko — pasenkoal@ya.ru

Sergey V. Malyshev — s.malyshev@spbu.ru

Scott Andrew DuFrane — dufrane@ualberta.ca

Andrey V. Shatsillo — shatsillo@gmail.com