

УДК 550.3

## МАГНИТНАЯ СТРАТИГРАФИЯ ОПОРНОГО РАЗРЕЗА ВЕРХНЕГО КЕМБРИЯ Р. ЧОПКО (СЕВЕРО-ЗАПАД СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ) И НОВЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ЧАСТОТУ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНВЕРСИЙ ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ К СУПЕРХРОНУ МОЙЕРО

© 2020 г. В. Э. Павлов<sup>1, 2, \*</sup>, Б. Г. Покровский<sup>3</sup>, Д. В. Рудько<sup>1</sup>, А. А. Колесникова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: pavlov.ifz@gmail.com

Поступила в редакцию 19.09.2019 г.

После доработки 24.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

В последние годы предложены различные модели геодинамо, по-разному описывающие процессы генерации геомагнитного поля и его эволюцию на протяжении геологической истории. Возможности тестирования этих моделей существенно ограничены, в частности, недостатком надежных магнитостратиграфических данных по палеозойскому и более древним этапам геологической истории и, особенно, по интервалам времени, предшествующим установлению суперхронов Киам и Мойеро. В настоящей работе представлены результаты магнитостратиграфических и геохимических исследований верхней части разреза верхнего кембрия долины р. Чопко (Норильский регион), являющегося одним из наиболее представительных опорных разрезов верхнего кембрия Сибирской платформы. В результате выполненных исследований показано, что в позднем кембрии существовал интервал обратной магнитной полярности, длительность которого была не менее 1.5 млн лет. Вместе с данными ранее полученными по верхнему кембрию р. Кулюмбэ и по раннему ордовики р. Котуй [Pavlov, Gallet, 1998; Павлов и др., 2017], наш результат означает, что между среднекембрийской эпохой крайне высокой частоты инверсий [Gallet et al., 2019] и ордовикским суперхроном обратной полярности Мойеро [Pavlov et al., 2005] существовало, по крайней мере, 2 интервала магнитной полярности (обратной и прямой), длительность которых составляла не менее 1 млн лет. Этот вывод вполне определенно указывает на низкую чистоту инверсий накануне ордовикского суперхрона и поддерживает представления, согласно которым на границе ядро и мантия происходит процесс, подготавливающий наступление суперхрона. Полученные нами данные поддерживают гипотезу о существовании трех режимов в работе геодинамо, с резкими (масштаба первых миллионов лет) переходами между ними [Галле, Павлов, 2016]. Между тем, в целом, качество и количество магнитостратиграфических данных, имеющихся на настоящий момент для домезозойского времени и, в частности, для палеозоя, все еще недостаточны для уверенного тестирования этой гипотезы.

*Ключевые слова:* обратная магнитная полярность, магнитостратиграфические и геохимические исследования, ордовикский суперхрон.

**DOI:** 10.31857/S0002333720050087

### ВВЕДЕНИЕ

В последние 15–20 лет существенное развитие получило численное моделирование геодинамо. В результате этих работ было предложено довольно большое число различных моделей, по-разному описывающих процессы генерации геомагнитного поля и его эволюцию на протяжении геологической истории. Все эти модели, как правило, в значительной степени связаны с выбором тех или иных представлений о тепловой истории нашей планеты и о геодинамических процессах, проис-

ходящих в ее внутренних оболочках. Возможности тестирования этих моделей в настоящее время существенно ограничены, в частности, недостатком надежных магнитостратиграфических данных по палеозойскому и более древним этапам геологической истории и, особенно, по интервалам времени, предшествующим установлению суперхронов Киам и Мойеро.

Эти интервалы геологической истории особенно важны для изучения работы геодинамо, поскольку различные модели предсказывают раз-

ный характер изменения полярности геомагнитного поля накануне установления геомагнитных суперхронов (см., например, [McFadden, Merrill, 2000; Lowrie, Kent, 2004; Shcherbakov, Fabian, 2012]). Данные по этим интервалам времени должны подтвердить или опровергнуть выводы, полученные при изучении поведения геомагнитной полярности в окрестностях наиболее молодого и наиболее изученного геомагнитного суперхрона – мелового суперхрона прямой полярности [Gallet, Hulot, 1997; McFadden, Merrill, 2000; Hulot, Gallet, 2003; Lowrie, Kent, 2004]. Такие данные позволят также определить, какие особенности этого поведения являются общими для всех суперхронов, а какие – отражают их специфику, связанную, возможно, с эволюционными изменениями внутренних оболочек нашей планеты.

С этой целью, казалось бы, в первую очередь следует изучить геологические эпохи, предшествующие установлению каменноугольно-пермского суперхрона Киама. Однако при такой постановке задачи мы сталкиваемся с проблемой, являющейся одной из наиболее тяжелых и трудноразрешимых в практике палеомагнитных исследований, а именно, с проблемой нахождения подходящего объекта. На территории нашей страны и бывшего Советского Союза нам неизвестны разрезы предкиамского возраста, обладающие в достаточной мере качествами, необходимыми для решения стоящей перед нами фундаментальной научной задачи. Судя по крайне небольшому числу публикаций, посвященных магнитостратиграфии раннего карбона (миссисипиана), число таких разрезов во всем мире также весьма ограничено.

С другой стороны, кембрийские разрезы Сибири, накопление которых происходило перед установлением ранне-среднеордовикского суперхрона Мойеро, кажутся уникальными и, вероятно, действительно являются таковыми. Они относительно многочисленны и хорошо доступны, часто хорошо обнажены и сложены перспективными для палеомагнитных исследований литологическими разностями. Многие из них очень детально изучены биостратиграфически и довольно хорошо привязаны к международной хроностратиграфической шкале. Кроме того, они слабо изменены и имеют достаточно простую геологическую историю, что должно способствовать сохранению в них первичной палеомагнитной записи. И, наконец, по многим из этих разрезов накоплен существенный палеомагнитный задел, который представляет собой серьезную основу для постановки детальных исследований. Наличие таких объектов делает очевидным необходимость первоочередного изучения характера изменения геомагнитной полярности именно перед ранне-сред-

неордовикским суперхромом Мойеро в позднем кембрии и в тремадоке, а не перед суперхромом Киама.

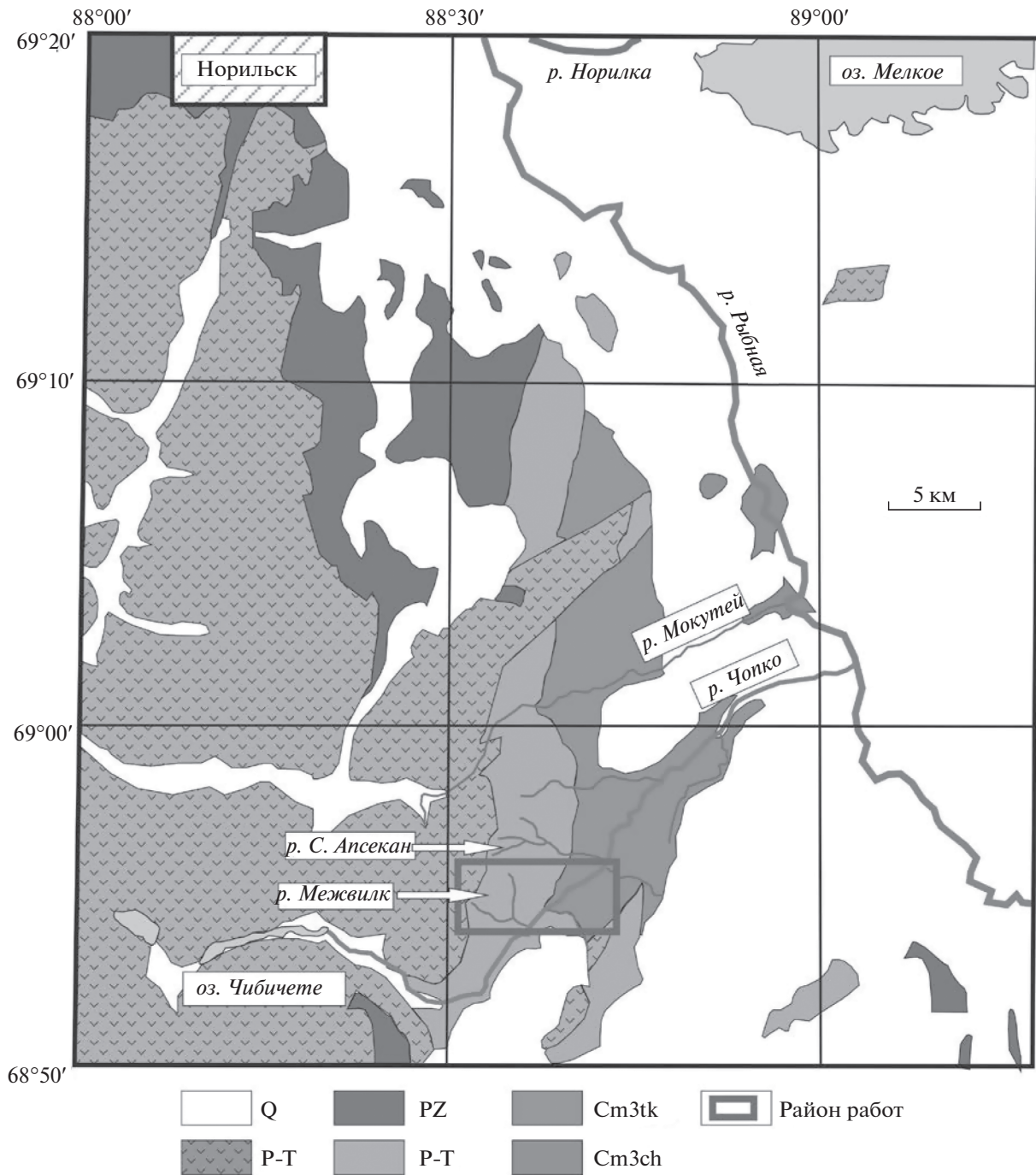
На территории Сибирской платформы и на ее северо-восточной границе находятся четыре основных опорных разреза верхнего кембрия – это разрезы рек Кулюмбэ и Чопко (северо-запад Сибирской платформы), разрезы Чекуровка и Хос-Нелегэ (северо-восток Сибирской платформы, долина нижнего течения р. Лена). Разрез реки Кулюмбэ был изучен нами подробно в предшествующих исследованиях [Pavlov, Gallet, 1998; Kouchinsky et al., 2008]. Разрезы Чекуровка и Хос-Нелеге могли бы быть крайне интересны для изучения истории магнитного поля Земли в конце кембрия, однако они сложены темноцветными литологическими разностями, которые, исходя из многолетнего опыта предшествующих исследований, представляются, на настоящий момент, неперспективными для сохранения первичной палеомагнитной записи. Тем не менее, нами отобраны рекогносцировочные коллекции из этих разрезов и их перспективность для постановки детальных магнитостратиграфических работ будет проверена в ходе исследований, которые мы планируем выполнить в ближайшее время.

В настоящей работе мы представляем палеомагнитные данные, которые были получены нами при изучении верхней половины верхнекембрийского осадочного разреза долины р. Чопко. В отличие от разрезов Чекуровка и Хос-Нелеге, в разрезе р. Чопко в заметном количестве присутствуют красноцветные и зеленоцветные породы, обычно благоприятные для сохранения первичной палеомагнитной записи. Имевшиеся к началу наших работ предварительные данные [Казанский, 2002] свидетельствовали о сохранности первичной намагниченности в этом разрезе и о его довольно высоких перспективах для магнитостратиграфических исследований.

Таким образом, цель настоящей работы состояла в изучении характера изменения полярности геомагнитного поля в позднем кембрии, а непосредственной задачей являлось получение магнитостратиграфической характеристики опорного верхнекембрийского разреза долины р. Чопко.

#### КРАТКОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЗРЕЗА

Разрез Чопко – один из важнейших опорных осадочных верхнекембрийских разрезов Сибирской платформы – выходит на поверхность вдоль большей части долин реки Чопко и ее левого притока ручья Межвилк (рис. 1). Долина р. Чопко (левый приток р. Рыбной) расположена на северо-западе Сибирской платформы в Норильском



**Рис. 1.** Географическая и геологическая схема района работ. Q – четвертичные отложения; P-T – пермотриасовые траппы; PZ – послекембрийские палеозойские отложения; Cm3tk – отложения тукаландинской свиты; Cm3ch – отложения чопкинской свиты; Cm2 – отложения среднего кембрия.

регионе между Норильским плато и горами Имангда, сложенными, преимущественно, перм-триасовыми трапповыми вулканическими и субинтрузивными образованиями.

В составе обнаженной части разреза выделяют снизу вверх чопкинскую свиту, имеющую мощность около 1 км, и тукаландинскую свиту, мощ-

ностью около 370 м. Последняя выходит на поверхность, главным образом, в долине ручья Межвилк. Чопкинская свита сложена переслаиванием известняков сероцветных, от темно- и коричнево-серых до зеленовато-серых. Среди известняков встречаются глинистые разности, наблюдаются также пакеты мергелей и пласты

подводно-оползневых конгломерато-брекчий. Тукаландинская свита представлена биостромными и обломочно-оолитовыми известняками, переслаивающимися с известковыми и известково-глинистыми доломитами и известковистыми алевролитами и мергелями, нередко красноцветными [Варламов и др., 2005]. Комплекс пород тукаландинской свиты типичен для отложенных мелководных карбонатных платформ, верхняя часть чопкинской свиты, которая была изучена в рамках настоящего исследования, формировалась в верхней части склона от мелководного к глубоководному шельфу.

Породы разреза на всем его протяжении залегают практически моноклинально с небольшими вариациями элементов залегания: слои падают преимущественно в западном направлении под углами  $5^{\circ}$ – $15^{\circ}$ .

Несмотря на то, что разрез Чопко расположен в непосредственной близости от трапповых образований Норильского плато, слагающие его породы не несут на себе каких-либо внешних признаков, которые свидетельствовали бы о влиянии траппов. Породы не тектонизированы и практически не изменены.

#### ОТБОР ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках проведенного исследования нами была опробована верхняя часть чопкинской свиты (~430 м мощности) и вся тукаландинская свита. Тукаландинская свита была опробована с интервалом 2–2.5 м, из нее было взято 169 ориентированных проб. Отбор образцов производился вручную с помощью магнитного компаса, магнитное склонение в районе работ определялось по модели IGRF 11-поколения.

Породы чопкинской свиты отбирались менее детально ввиду большей мощности и предполагавшейся малоперспективности (с точки зрения сохранности палеомагнитного сигнала) слагающих ее пород. Из этой части разреза было отобрано 127 ориентированных проб.

Пробы отбирались в виде блоков, размером достаточным для выпиливания из них 1–2 образцов кубической формы с ребром 2 см для палеомагнитного анализа. Остатки образцов, оставшиеся при распиловке, были использованы для изучения вариаций изотопного состава углерода и кислорода.

Отобранные образцы прошли лабораторную обработку в рамках стандартной палеомагнитной процедуры [Храмов и др., 1982; Butler, 1998; Tauxe, 2010] в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН с использованием всего необходимого, отвечающего совре-

менным требованиям лабораторного оборудования (<http://paleomag-ifz.ru/ru/equipment>). Магнитная чистка выполнялась с использованием термомангнетайзера TD80 (производство Magnetic Measurements Ltd., Великобритания) в специальной комнате, экранированной от внешнего магнитного поля, измерения остаточной намагниченности производились в этой же комнате на криогенном магнитометре производства 2GEnterprise (США). Всего, в зависимости от характера палеомагнитной записи, выполнялось от 12 до 18 шагов чистки вплоть до температур, отвечающих точке Кюри гематита.

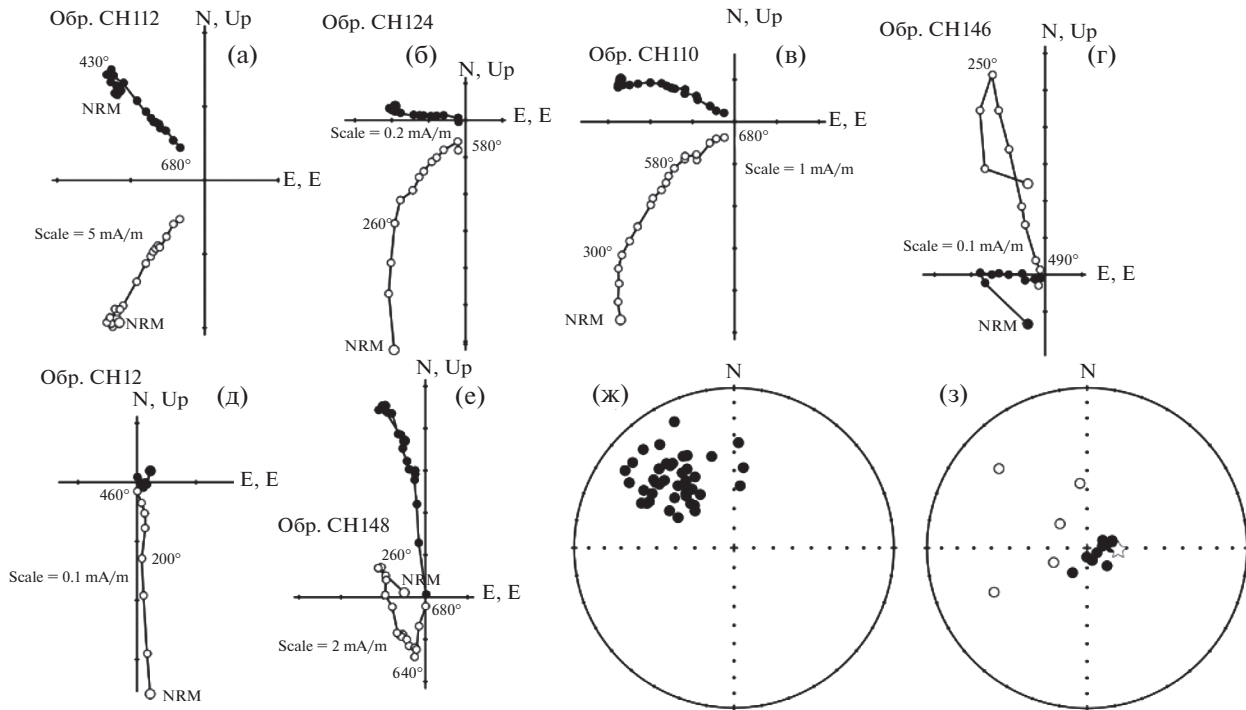
Для уточнения привязки магнитостратиграфических данных к геохронологической шкале в лаборатории геохимии изотопов и геохронологии ГИН РАН были выполнены определения изотопного состава углерода и кислорода в карбонатном материале образцов. Для этого был использован комплекс аппаратуры корпорации ThermoElectron, включающий масс-спектрометр Delta V Advantage и установку Gas-Bench-II. Разложение карбонатов проводилось в 100% ортофосфорной кислоте при  $50^{\circ}\text{C}$ . Значения  $\delta^{13}\text{C}$  даются в промилле относительно стандарта PDB, значения  $\delta^{18}\text{O}$  – в промилле относительно стандарта SMOW. Для привязки результатов анализов к PDB и CDT использовались сверточные пробы и стандарты IAEA C-O-1, NBS-19 и IAEA S-1. Точность (воспроизводимость) определения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  находится в пределах  $\pm 0.2$  и  $\pm 0.1\%$  соответственно.

#### ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ

Величины магнитной восприимчивости и естественной остаточной намагниченности (ЕОН) изученных пород меняется в пределах от 0 до  $150 \times 10^{-6}$  единиц СИ и от  $1 \times 10^{-4}$  до  $10\text{--}20 \times 10^{-3}$  А/м соответственно. Относительно более высокие значения свойственны красноцветным разностям.

Результаты температурной магнитной чистки определенно указывают на то, что преобладающая часть образцов, отобранных из верхней части чопкинской свиты, не содержит древней намагниченности: помимо современной компоненты намагниченности, которая более или менее уверенно выделяется в части образцов и разрушается при температурах  $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ , в них не обнаруживается никакого регулярного сигнала.

Исключение составляют несколько образцов из самых верхних слоев чопкинской свиты, непосредственно подстилающих тукаландинскую свиту и обнажающихся в районе устья ручья Межвилк. В этих образцах проекции векторов ЕОН в процессе чистки до  $420\text{--}450^{\circ}\text{C}$  смещаются на стереограмме в сторону направления высокотемпературной компоненты намагниченности тукаландин-



**Рис. 2.** Результаты магнитной чистки образцов тукаландинской свиты из разреза р. Чопко. На диаграммах Зийдервельда (а), (б), (в), (г), (д), (е) черными кружками показаны проекции векторов на горизонтальную плоскость, открытыми кружками — проекции векторов на вертикальную плоскость. На стереограммах (ж), (з) черными кружками показаны проекции векторов на нижнюю полусферу; открытыми кружками — проекции векторов на верхнюю полусферу; ж — распределение векторов характеристической компоненты намагниченности (стратиграфическая система координат); з — распределение векторов среднетемпературной биполярной компоненты намагниченности (современная система координат), звездочкой показано среднее трапповое направление для региона.

ской свиты (см. ниже), указывая тем самым на присутствие в них древней намагниченности. Поскольку эти образцы единичны и разрознены, мы их не использовали при дальнейшей интерпретации.

Заметная часть образцов тукаландинской свиты также не содержит древний палеомагнитный сигнал, при этом не менее чем в трети образцов такой сигнал присутствует. Качество палеомагнитной записи в таких образцах меняется от посредственного до довольно хорошего (рис. 2). При этом, как правило, выделяются две компоненты намагниченности — низкотемпературная (LT) и высокотемпературная (HT). Низкотемпературная компонента разрушается к 250–300°C (рис. 2а, 2б), образовалась после складчатости (тест складки Ватсона–Энкина [Watson, Enkin, 1993] отрицательный) и имеет направление близкое к направлению современного магнитного поля в районе работ (табл. 1). Это дает основание считать, что низкотемпературная компонента имеет современный или близкий к современному возраст.

В 15 образцах тукаландинской свиты на температурном интервале между 200 и 500 выделяется с той или иной степенью уверенности (рис. 2г, 2д,

2е) биполярная среднетемпературная компонента с юго-восточными (северо-западными) склонениями и крутыми положительными (отрицательными) наклонениями. Часть из соответствующих направлений (преимущественно тех из них, которые имеют отрицательные наклонения) смещена в область низких наклонений, что легко объясняется контаминацией этой компоненты современным перемагничиванием. Направления векторов, отвечающих этой компоненте, близки к палеомагнитным направлениям траппов (см., напр., [Pavlov et al., 2019]), что естественно ввиду географической близости последних. Соответственно, мы интерпретируем эту компоненту как возникшую в пермо-триасовое время под влиянием формировавшихся в это время поблизости трапповых лав и интрузий.

Начиная с температур 400–450°C (иногда выше) выделяется высокотемпературная характеристическая компонента намагниченности HT с северо-западным склонением и умеренным положительным наклонением. Максимальные разблокирующие температуры компоненты HT лежат, как правило, в области 660–680°C (рис. 2а, 2в, 2е), однако в части образцов эта компонента практически полно-

**Таблица 1.** Компоненты естественной остаточной намагниченности в породах тукаландинской свиты

Компонента, число образцов	Географическая система координат				Стратиграфическая система координат			
	$D$ , (°)	$I$ , (°)	$K$	$\alpha_{95}$ , (°)	$D$ , (°)	$I$ , (°)	$K$	$\alpha_{95}$ , (°)
Компонента LT $N=59$	4.0	82.9	93.8	1.9	331.6	80.8	69.9	2.2
Компонента НТ, (все) $N=67$	320.8	46.4	21.4	3.8	316.8	42.6	22.1	3.8
Компонента НТ ( $n > 3$ , $MAD < 10^\circ$ ) $N=42$	322.9	44.5	21.0	4.9	319.1	41.8	20.9	4.9

Палеомагнитный полюс  $Plat = 138.9^\circ$ ;  $Plong = -39.0^\circ$ ;  $dp/dm = 3.7^\circ/6.0^\circ$ ;  $A95 = 4.7^\circ$ ,  $N = 42$ .

Примечание:  $D$  – склонение,  $I$  – наклонение,  $K$  – кучность,  $\alpha_{95}$  – радиус круга доверия (на уровне 95%),  $n$  – число точек диаграмм Зийдервельда, по которым рассчитывались компоненты,  $MAD$  – максимальное угловое отклонение [Kirschvink, 1980].

стью разрушается вблизи  $580\text{--}600^\circ\text{C}$  (рис. 2б). Значения максимальных разблокирующих температур указывают на то, что носителем намагниченности НТ является, обычно, гематит и, в отдельных случаях, магнетит.

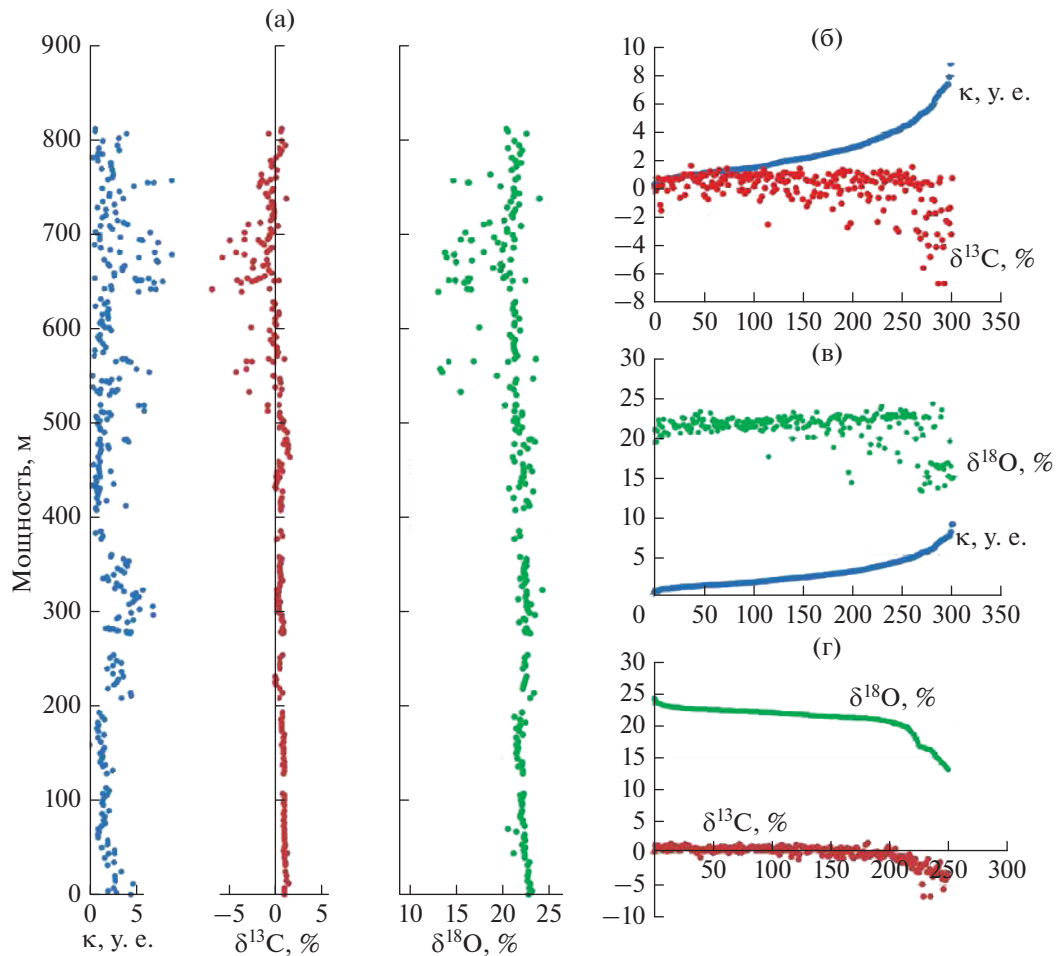
Среднее направление компоненты НТ (рассчитанное по всем выделенным векторам, а также только по тем из них, которые получены не менее чем по 4 точкам диаграммы Зийдервельда и имеют параметр  $MAD$  (maximum angular deviation, [Kirschvink, 1980] не больше  $10^\circ$ ), приведены в табл. 1. Соответствующие этим средним направлениям палеомагнитные полюсы лежат вблизи от уже известных [Павлов и др., 2017] средне- и позднекембрийских полюсов Сибирской платформы и отличаются от ее более молодых палеомагнитных полюсов. Более того, среднее направление компоненты НТ близко палеомагнитному направлению верхнекембрийских пород ранее изученного разреза реки Кулюмбэ, первичность которого достаточно хорошо обоснована [Pavlov, Gallet, 1998].

При том, что древние палеомагнитные направления, определенные в верхнекембрийских породах разрезов рек Чопко и Кулюмбэ, близки, статистически они различаются. Угловое расстояние  $\gamma$  между средним направлением, рассчитанным по всем выделенным векторам НТ, и соответствующим кулюмбинским направлением [Pavlov, Gallet, 1998], заметно превышает критический угол  $\gamma_c$  ( $10.8^\circ/5.1^\circ$ , [McFadden, McElhinny, 1990]). После отбраковки образцов, для которых палеомагнитные направления были определены менее чем по 4 точкам диаграммы Зийдервельда и, у которых  $MAD$  превышал  $10^\circ$ , угловое различие становится несколько меньше, однако продолжает быть статистически значимым ( $\gamma/\gamma_c = 9.1^\circ/6.2^\circ$ ). Это различие связано, скорее, с наклонением, чем со склонением: различие по склонению  $R$  незначимо и составляет  $6.2^\circ$ , при погрешности  $\Delta R = 7.4^\circ$ ; различие по наклонению

$F = 7.7^\circ$ , при погрешности его определения  $\Delta F = 5.7^\circ$  (погрешности определялись согласно выражениям А.44 и А.45 из работы [Butler, 1996]).

Этот факт дает возможность объяснить небольшое, но значимое отличие средних палеомагнитных направлений верхнего кембрия Чопко и Кулюмбэ неполным удалением современной компоненты в одном из этих разрезов либо в обоих из них. Отметим, что если в верхнекембрийском разрезе р. Чопко контаминация современной компонентой должна приводить к завышению наклонения, в разрезе р. Кулюмбэ, где присутствуют образцы, намагниченные в обратной полярности, такая же контаминация может приводить к занижению наклонения среднего направления. В результате осреднение палеомагнитных данных по верхнему кембрию разрезов Чопко и Кулюмбэ может привести к получению несмещенной оценки истинного палеомагнитного направления. Так или иначе, близость среднего направления компоненты НТ к “кулюмбинскому” позднекембрийскому направлению определенно указывает на то, что компонента НТ также образовалась во время или вскоре после формирования пород тукаландинской свиты.

Во всех случаях, где компонента НТ недвусмысленно определяется, она имеет обратную полярность, однако в некоторых образцах на температурном интервале от  $200$  до  $390^\circ\text{C}$  наблюдаются признаки присутствия компоненты с противоположным антиподальным направлением (рис. 2а). Это может быть следствием того, что наиболее мелкие зерна магнитного минерала продолжали формироваться в породе, когда произошла очередная смена полярности магнитного поля, уже после времени накопления пород тукаландинской свиты. Другая интерпретация опирается на результаты работы [Stokking, Tauche, 1990], в которой было показано, что при осаждении новых порций гематита на уже сформировавшееся гематитовое зерно возможно такое взаимодействие



**Рис. 3.** (а) – Изменение значений магнитной восприимчивости (в условных единицах),  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  (в промилле) вдоль разреза; (б) – сравнение значений магнитной восприимчивости и  $\delta^{13}\text{C}$  образцов, ранжированных по магнитной восприимчивости; (в) – сравнение значений магнитной восприимчивости и  $\delta^{18}\text{O}$  образцов, ранжированных по магнитной восприимчивости; (г) – сравнение значений  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  образцов, ранжированных по  $\delta^{18}\text{O}$ .

фаз (обменное или с размагничивающим полем уже сформированного зерна), при котором может возникать намагниченность, противоположная по направлению наложенному полю. Как бы то ни было, присутствие в некоторых образцах компоненты антиподальной НТС, вероятно, указывает на то, что некоторая часть гематита в исследуемых породах имеет аутигенное происхождение.

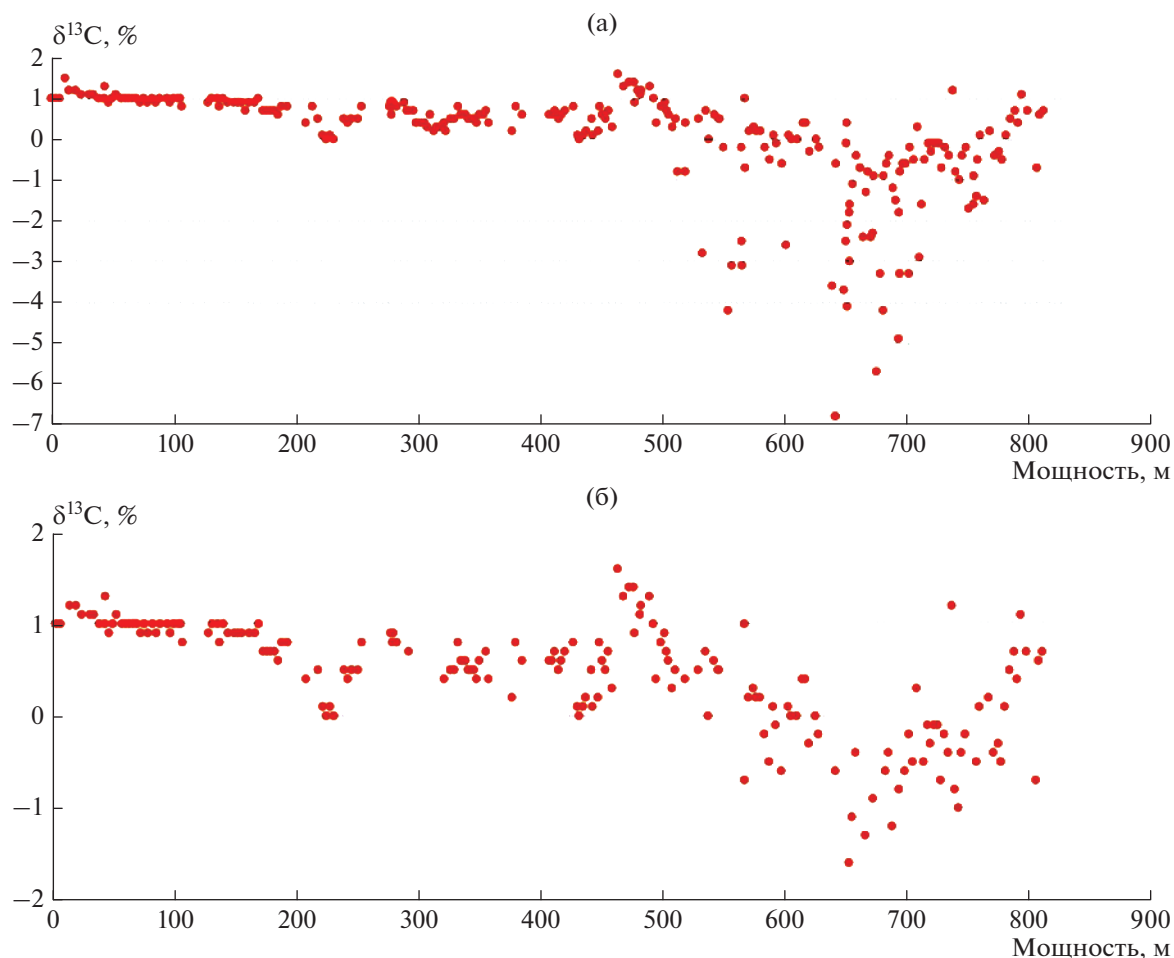
### ХЕМОСТРАТИГРАФИЯ

Вариации изотопного состава кислорода и углерода, а также изменение магнитной восприимчивости ( $\kappa$ ) вдоль изученной части разреза показаны на рис. 3а. Обращает на себя внимание, что в наиболее шумной части записи  $\delta^{13}\text{C}$ , там, где встречаются наибольшие выбросы значений этого параметра в отрицательную область, наблюдаются также повышенные значения магнитной восприимчивости и ее дисперсии. То, что повы-

шенные значения  $\delta^{13}\text{C}$  наблюдаются, как правило, в тех же образцах, где и повышенные значения магнитной восприимчивости, указывает график, приведенный на рис. 3б.

На этом графике сравниваются значения магнитной восприимчивости и  $\delta^{13}\text{C}$  образцов, ранжированных по магнитной восприимчивости. Ясно видно, что при значениях магнитной восприимчивости ниже некоторого уровня ( $\kappa \sim 4$  условных единиц) между значениями  $\kappa$  и  $\delta^{13}\text{C}$  не наблюдается никакой корреляции. При больших же значениях  $\kappa$ , при увеличении магнитной восприимчивости значения  $\delta^{13}\text{C}$  резко отклоняются в область все больших отрицательных значений. Примерно также магнитная восприимчивость соотносится с величиной  $\delta^{18}\text{O}$  (рис. 3в).

Существование такой связи можно объяснить наличием некоторого процесса, одновременно приведшего к смещению значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  и



**Рис. 4.** Сравнение исходной записи  $\delta^{13}\text{C}$  и той же записи, после удаления образцов с величинами  $\delta^{18}\text{O}$  меньше 21‰ и к больше 4 условных единиц.

магнитной восприимчивости. Таким процессом могли быть постседиментационные изменения, в частности, взаимодействие пород с термальными растворами атмосферного происхождения, циркуляция которых была активизирована трапповыми интрузиями. Положительная корреляция величин  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  указывает на то, что эти растворы в значительном количестве содержали обедненную  $^{13}\text{C}$  углекислоту органического или вулканического происхождения. Резкое обеднение  $^{13}\text{C}$  и корреляция  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  наблюдается, однако, только в тех образцах, в которых значения  $\delta^{18}\text{O} < 21\text{‰}$  (коэффициент корреляции при  $\delta^{18}\text{O} < 21\text{‰}$  – 0.76, при  $\delta^{18}\text{O} > 21\text{‰}$  – 0.40), что дает основание считать постседиментационную модификацию углерода в образцах с  $\delta^{18}\text{O} > 21\text{‰}$  несущественной.

Исходя из обнаруженных соотношений, мы можем произвести селекцию наших данных, с целью отбросить те из них, в которых вероятны заметные нарушения исходных изотопных соотно-

шений. Такая селекция позволяет нам получить сигнал, в какой-то мере очищенный от наложенного шума, связанного с воздействием процессов, искажающих первоначальную изотопную запись. На рис. 4 приведены исходная запись и запись, полученная после удаления образцов с величинами  $\delta^{18}\text{O}$  меньше 20 промиллей и к больше 4 условных единиц.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Магнитополярная характеристика изученной части верхнекембрийского разреза р. Чопко показана на рис. 5. Из этого рисунка видно, что формирование тукаландинской свиты происходило во время эпохи обратной полярности (обсуждение выбора опции полярности для сибирских палеомагнитных направлений (см., напр., в работе [Gallet et al., 2019]). Таким образом, на протяжении всего времени формирования соответствующей части разреза мощностью более 300 м не за-



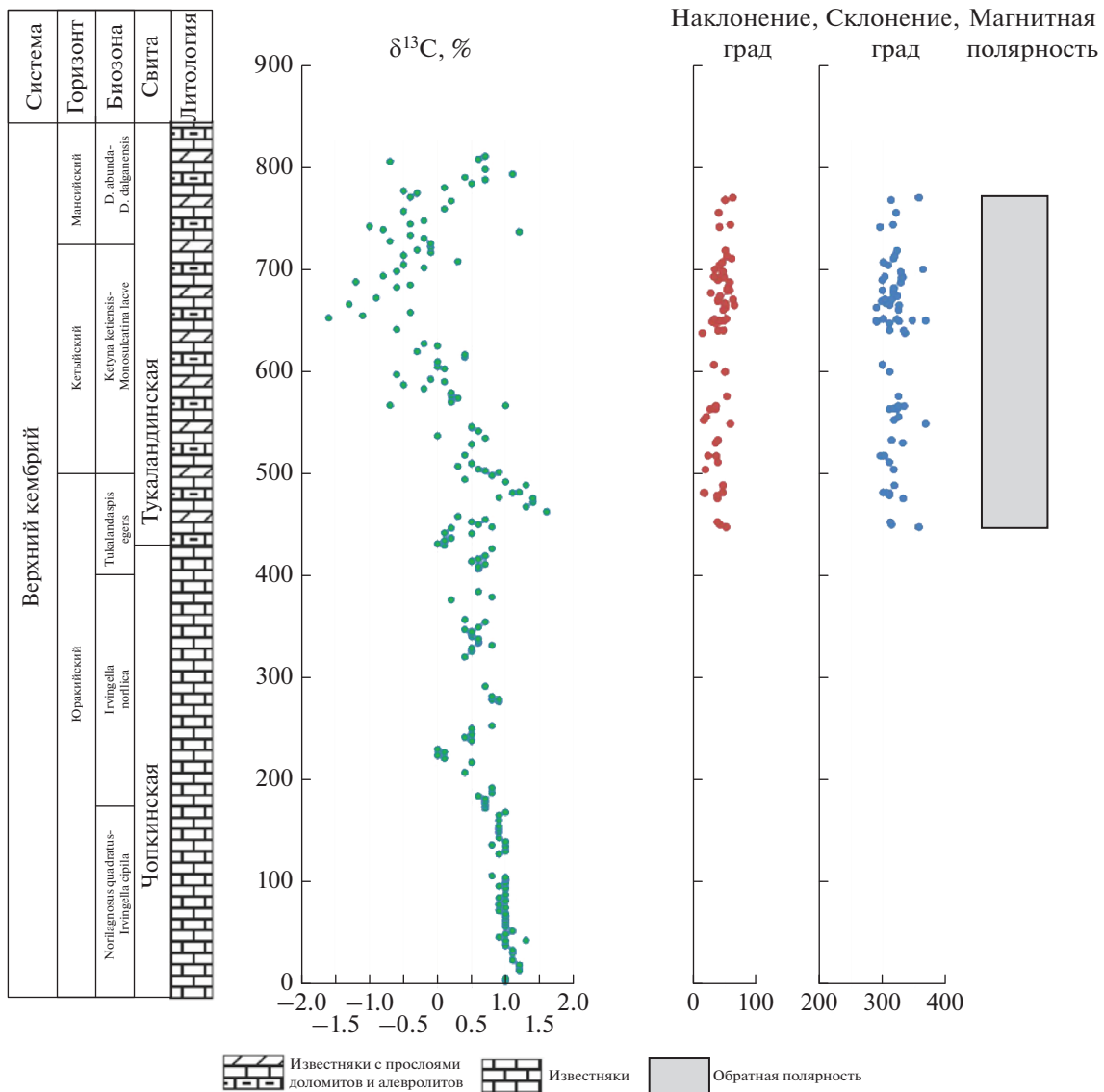


Рис. 5. Геохимическая ( $\delta^{13}\text{C}$ ) и магнитополярная характеристика изученной части разреза Чопко.

фиксируется ни одной инверсии геомагнитного поля.

Этот результат явно указывает на существование в позднем кембрии, по крайней мере, одного длительного интервала обратной полярности. Попробуем оценить длительность этого интервала. Для этого рассмотрим имеющиеся биостратиграфические, литологические и геохимические данные.

Литологический подход состоит в том, чтобы, зная обстановку, в которой происходило накопление тукаландинской свиты, найти близкие по геодинамическим условиям формирования осадочные разрезы, для которых уже существуют оценки скорости осадконакопления, и применить эти оценки для получения ограничений на

длительность формирования тукаландинской свиты.

Как уже отмечалось выше, комплекс пород тукаландинской свиты типичен для отложений мелководных карбонатных платформ [Пак, 2007]. Для разрезов, формировавшихся в таких условиях, существует довольно обширная литература, в которой рассматриваются скорости их накопления. Согласно одному из наиболее полных таких исследований [Bosscher, Schlager, 1993], эти скорости довольно часто составляют десятки метров за 1 млн лет и крайне редко превышают величину 200 м за 1 млн лет. Выбирая из этого спектра возможных скоростей наибольшее значение, мы получаем, исходя из такого подхода, консерватив-

ную оценку времени формирования тукаландинской свиты порядка 1.5–2 млн лет.

Биостратиграфический подход при оценке скорости осадконакопления основан на биостратиграфической корреляции рассматриваемых разрезов с Геологической шкалой времени. Согласно работе [Варламов и др., 2005], большая часть тукаландинской свиты отвечает кетыйскому горизонту верхнего кембрия региональной сибирской биостратиграфической шкалы. Низы свиты сопоставляются с самой верхней частью юракийского горизонта, а ее верхи – с самой нижней частью мансийского горизонта. Кетыйский горизонт отвечает трилобитовой зоне *Ketyna ketiensis* – *Monosulcatina* leave. На международной стратиграфической шкале эта зона соответствует верхней части яруса Jiangshanian и нижней части яруса 10, отвечающих, согласно работе [Ogg et al., 2016] интервалу времени ~491–~487 лет. Если так, то длительность рассматриваемого нами интервала обратной полярности может быть оценена как ~4 млн лет.

Отметим, что на том же стратиграфическом уровне в разрезе р. Кулюмбэ также отмечено наличие продолжительного интервала обратной полярности. Взаимное соответствие магнито-стратиграфических данных между разрезами рек Чопко и Кулюмбэ дают дополнительную поддержку выводу о реальности существования в позднем кембрии длительных периодов, на протяжении которых геомагнитное поле не меняло свою полярность.

Хемотратиграфический подход состоит в сопоставлении наблюдаемых в данном разрезе вариаций изотопного состава углерода с эволюционными кривыми  $\delta^{13}\text{C}$ , установленными в опорных разрезах, привязанных к геохронологической шкале.

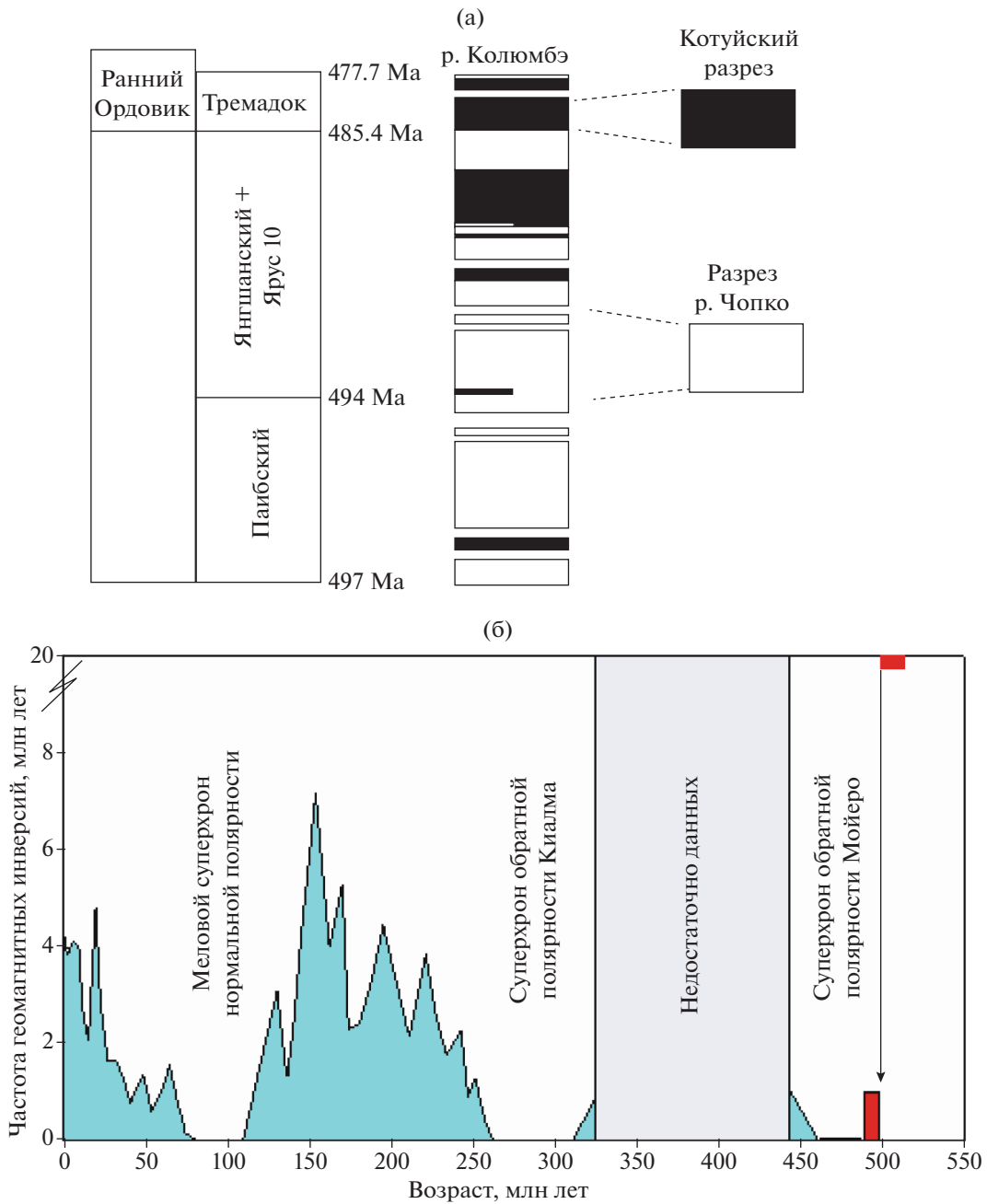
На полученном нами геохимическом профиле наблюдается шумная, относительно малоамплитудная, но, тем не менее, явная запись отрицательного экскурса  $\delta^{13}\text{C}$ , максимальные значения которой лежат в области  $-1.5\%$ . Такой же экскурс на очень близком стратиграфическом уровне имеется и в разрезе р. Кулюмбэ [Kouchinsky et al., 2008]. В цитируемой работе этот экскурс предположительно сопоставлялся с глобальным изотопно-углеродным событием HERB (*Hellnmaria* – *Red Tops Boundary*), которую также называют аномалией TOCE (*Top of Cambrian carbone-isotope Excursion*) [Geological Time Scale 2012]. Нахождение в разрезе р. Чопко отрицательной аномалии примерно той же амплитуды и примерно на том же стратиграфическом уровне, что и в разрезе р. Кулюмбэ, как минимум, подтверждает ее региональное распространение и поддерживает высказанную в работе [Kouchinsky et al., 2008] гипотезу о ее корреляции с названным выше глобальным позднекембрийским событием.

На Международной стратиграфической и на геохронологической шкалах эта аномалия располагается в нижней части Яруса 10 между 488 и 487 млн лет и ее длительность оценивается в ~1 млн лет. Мощность магнито-стратиграфической зоны обратной полярности, выделенной нами в разрезе р. Чопко, примерно на 40–50% превышает мощность интервала разреза, отвечающего рассматриваемой изотопно-углеродной аномалии. Соответственно, длительность обсуждаемого магнито-полярного интервала с использованием С-изотопной хемотратиграфии может быть оценена как ~1.5 млн лет.

Выполненные независимые оценки, таким образом, указывают на то, что тукаландинская свита формировалась на протяжении времени от 1.5 до 4 млн лет. Соответственно, даже при выборе наименьшей оценки, мы можем утверждать, что в позднем кембрии существовал интервал обратной магнитной полярности, длительность которого была не меньше 1.5 млн лет.

Полученные данные имеют непосредственное отношение к вопросу о выборе эволюционной модели при описании характера изменения полярности геомагнитного поля на протяжении геологического времени. Среди существующих, одни модели описывают характер изменения геомагнитной полярности как нестационарный процесс: со все более увеличивающимися магнито-полярными интервалами при приближении к суперхрону [McFadden, Merrill, 2000], другие – как чередование эпох со стационарным поведением инверсионного процесса с более или менее постоянной (в масштабах нескольких миллионов лет) частотой инверсий внутри каждой эпохи и со скачкообразным ее изменением при переходе от одной эпохи к другой [Lowrie, Kent, 2004], третьи – предполагают наложение этих процессов [Gallet, Hulot, 1997; Hulot, Gallet, 2003]. Тестирование и разработка этих моделей имеет существенное значение для развития наших представлений о процессах в ядре и о взаимодействии внешнего ядра и мантии.

Полученные в настоящей работе результаты, вместе с уже опубликованными данными по верхнему кембрию р. Кулюмбэ и по раннему ордовика р. Котуй [Павлов и др., 2017] показывают, что между среднекембрийской эпохой крайне высокой частоты инверсий [Gallet et al., 2019] и ордовикским суперхроном обратной полярности Мойеро [Pavlov et al., 2005] существовало, по крайней мере, 2 интервала магнитной полярности (обратной и прямой), длительность которых составляла не менее 1 млн лет (рис. 6а). Этот вывод вполне определенно указывает на низкую (по сравнению, например, с поздним кайнозойем) частоту инверсий в позднем кембрии и тремадоке накануне ордовикского суперхрона и поддерживает



**Рис. 6.** (а) – Сопоставление длительных магнитопольных интервалов, обнаруженных в разрезах р. Котуй [Павлов и др., 2017] и р. Чопко (настоящая работа) с магнитостратиграфическим разрезом р. Кулумбэ и геохронологической шкалой; (б) – характер изменения частоты геомагнитных инверсий накануне суперхрона Мойеро [Gallet et al., 2019].

представления, согласно которым на границе ядро–мантия происходит процесс, подготавливающий наступление суперхрона.

Исходя из результатов численного моделирования (напр., [Driscoll, Olson, 2011]), можно предположить, что наиболее вероятным содержанием этого процесса является уменьшение теплового потока на границе ядро–мантия, приводящее к уменьшению энергии, поступающей в геомаг-

нитное динамо, и, в конечном счете, к установлению геомагнитного суперхрона.

Исключительно важным представляется установление характера перехода от среднекембрийской эпохи крайне высокой частоты инверсий [Gallet et al., 2019] к позднекембрийскому инверсионному режиму. Решение этой задачи позволило бы тестировать гипотезу о существовании трех режимов в работе геодинамо, с резкими (масштаба

первых миллионов лет) переходами между ними [Галле, Павлов, 2016].

Полученные нами данные поддерживают эту гипотезу (рис. 6б), однако в целом, качество и количество магнитостратиграфических данных, имеющихся на настоящий момент для домезозойского времени и, в частности, для палеозоя, к сожалению, все еще недостаточны для окончательного решения этого вопроса. Получение новых качественных магнитостратиграфических данных для этого временного интервала должно составить содержание следующего этапа исследований.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевые работы, лабораторные палеомагнитные исследования и изотопные измерения были проведены при поддержке грантов РФФИ № 18-05-00285 и № 19-05-00427. Интерпретация данных выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 14.Y26.31.0029 в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации № 220.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варламов А.И., Пак К.Л., Розова А.В.* Стратиграфия и трилобиты верхнего кембрия разреза р. Чопко. Норильский район, Северо-Запад Сибирской платформы. 2005. Новосибирск: Наука. 84 с.
- Галле И., Павлов В.Э.* Три режима работы геодинамо // Физика Земли. 2016. № 2. С. 148–163.
- Казанский А.Ю.* Эволюция структур западного обрамления Сибирской платформы по палеомагнитным данным. Автореферат дисс. докт. геол.-мин. наук. Новосибирск. 2002. 40 с.
- Павлов В.Э.; Толмачева Т.Ю., Веселовский Р.В., Латышев А.В., Фетисова А.М., Бугун И.В.* Магнитная стратиграфия ордовика нижнего течения р. Котуй: возраст Бысы-Юряхской толщи и частота геомагнитных инверсий накануне суперхрона // Физика Земли. 2017. № 5. С. 702–713.
- Пак К.Л.* Биостратиграфия и трилобиты верхней части среднего и верхнего кембрия Норильского района (северо-запад Сибирской платформы). Автореф. дисс. соиск. уч. ст. канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: СНИИГиМС. 2007. 18 с.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др.* Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. С. 312.
- Boscher H.W.* Schlager Accumulation rates of Carbonate platforms // J. Geology. 1993. V. 101. P. 345–355.
- Butler R.F.* Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes. 1998. Electronic edition/ <http://www.earth.rochester.edu/butlerbook/>
- Driscoll P.E., Olson P.L.* Superchron cycles driven by variable core heat flow. Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. № 9. P. L09304.
- Gallet Y., Hulot G.* Stationary and nonstationary behavior within the geomagnetic polarity time scale // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. № 15. P. 1875–1878.
- Gallet Y., Pavlov V., Korovnikov I.* Extreme geomagnetic reversal frequency during the Middle Cambrian as revealed by the magnetostratigraphy of the Khorbusuonka section (North-Eastern Siberia) // Submitted to Earth and Planetary Science Letters. 2019.
- Geological time scale 2012 / Eds. Felix M. Gradstein, James G. Ogg, Mark D. Schmitz, Gabi M. Ogg. 2012. V. 1. 1139 p.
- Hulot G., Gallet Y.* Do superchrons occur without any palaeomagnetic warning? // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 210. P. 191–201.
- Kirschvink J.L.* The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data // Geophys. J. R. Astron. Soc. 1980. V. 62. P. 699–718.
- Kouchinsky A., Bengtson S., Gallet Y., Korovnikov I., Pavlov V., Runnegar B., Shileds G., Veizer J., Young E., Ziegler K.* The SPICE carbon isotope excursion in Siberia: a combined study of the upper Middle Cambrian-lowermost Ordovician Kulyumbe river section, northwestern Siberian platform // Geol. Mag. 2008. V. 145. P. 609–622.
- Lowrie W., Kent D.* Geomagnetic polarity timescales and reversal frequency regimes. Timescale of the paleomagnetic field // Geophysical Monograph Series. 2004. V. 145. P. 117–129.
- McFadden P.L., McElhinny M.* Classification of reversal test in paleomagnetism // Geophys. J. Int. 1990. V. 103. P. 725–729.
- McFadden P., Merrill R.* Evolution of the geomagnetic reversal rate since 160 Ma: Is the process continuous? // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 28455–28460.
- Ogg J.G., Ogg G., Gradstein F.M.* A concise geological time scale 2016. Elsevier Publ. 2016. 240 p.
- Pavlov V.E., Gallet Y.* Upper Cambrian to Middle Ordovician magnetostratigraphy from the Kulumbe river section (northwestern Siberia) // Phys. Earth and Plan. Int. 1998. V. 108. P. 49–59.
- Pavlov V., Gallet Y.* A third superchron during the Early Paleozoic // Episodes. 2005. V. 28. P. 78–84.
- Pavlov V.E., Frederic Fluteau, Anton V. Lатышев, Anna M. Fetisova, Linda T. Elkins-Tanton, Ben A. Black, Seth D. Burgess, Roman V. Veselovskiy.* Geomagnetic Secular Variations at the Permian-Triassic Boundary and Pulsed Magmatism During Eruption of the Siberian Traps // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20. № 2. P. 773–791. <https://doi.org/10.1029/2018GC007950>
- Shcherbakov V., Fabian K.* The geodynamo as a random walker: A view on reversal statistics // J. Geophysical Research (Solid Earth). 2012. V. 117. № B3. P. B03101. <https://doi.org/10.1029/2011JB008931>
- Stokking L.B., Tauxe L.* Multicomponent magnetization in synthetic hematite // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. V. 65. P. 109–124.
- Tauxe L.* Essentials of Paleomagnetism. Univ of California Press. Mar 19. 2010. Science. 489 p.
- Watson J.S., Enkin R.J.* The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. P. 2135–2137.

## **Magnetic Stratigraphy of the Upper Cambrian Reference Section on the Chopko River, Northwestern Siberian Platform, and New Constraints on Geomagnetic Reversal Frequency at the Approach of the Moyero Superchron**

**V. E. Pavlov<sup>a, \*</sup>, B. G. Pokrovskii<sup>b</sup>, D. V. Rud'ko<sup>a</sup>, and A. A. Kolesnikova<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>b</sup>*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: pavlov.ifz@gmail.com*

Various geodynamo models have been proposed recently which in the different ways explain the processes of geomagnetic field generation and its evolution during the geological history. The testing capabilities of these models are strongly limited, inter alia, by the lack of reliable magnetostratigraphic data on the Paleozoic and on the more ancient eras of geologic time, especially on the time periods preceding the establishment of the Kiama and Moyero superchrons. This work presents the results of the magnetostratigraphic and geochemical studies of the top part of the Upper Cambrian section in the Chopko river valley, Norilsk region, which is one of the most complete Upper Cambrian reference sections in the Siberian Platform. Our studies have shown that in the Late Cambrian there has been an interval of the reversed magnetic polarity which lasted at least 1.5 million years. Together with the previous data on the Upper Cambrian of the Kulumbe river and on the Early Ordovician of the Kotui river (Pavlov and Gallet, 1998; Pavlov et al., 2017), the result of this study means that between the mid-Cambrian epoch of the extremely frequent reversals (Gallet et al., 2019) and the Ordovician Moyero superchron of the reversed polarity (Pavlov et al., 2005), there intervened at least two magnetic polarity intervals (reversed and normal) whose duration was at least one million years. This conclusion quite definitely points to a low frequency of the reversals on the eve of the Ordovician superchron and supports the notions according to which a process preparing the approach of the superchron takes place at the core/mantle boundary. The data obtained in our study support the hypothesis of the existence of three regimes of geodynamo with sharp (on the order of a few million years) transitions between them (Gallet and Pavlov, 2016). At the same time, overall, the quality and amount of the currently existing magnetostratigraphic data for the pre-Mesozoic time and, in particular, for the Paleozoic are still insufficient for confident testing this hypothesis.

*Keywords:* reversed magnetic polarity, magnetostratigraphic and geochemical studies, Ordovician superchron