

УДК 551.8+538.7+551.72(571.5)

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ТАСЕЕВСКОЙ СЕРИИ (Енисейский кряж): К ПРОБЛЕМЕ КОНФИГУРАЦИИ ГЕОМАГНИТОГО ПОЛЯ НА РУБЕЖЕ ДОКЕМБРИЯ—ФАНЕРОЗОЯ**Е.В. Виноградов^{1,2}, Д.В. Метелкин^{1,2}, В.В. Абашев^{2,1}, В.А. Верниковский^{2,1},
Н.Ю. Матушкин^{2,1}, Н.Э. Михальцов^{2,1}**¹Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Представлены результаты детального исследования палеомагнитной записи, сохранившейся в разрезах тасеевской серии Енисейского кряжа. На примере изучения трех типовых районов ее распространения в нижнем течении рек Ангара, Тасеева и Иркинева подтверждено необычное состояние геомагнитного поля на рубеже докембрия—фанерозоя. Факт присутствия в горных породах эдиакарского возраста нескольких, резко отличных палеомагнитных направлений, не укладывающихся в классическую модель центрального осевого диполя, известна давно. В частности, в сибирских разрезах установлено две в равной степени обоснованные группы палеополусов, интерпретация которых вызывает массу споров вокруг геометрии магнитного поля Земли и соответствия той или иной компоненты его дипольной конфигурации. Уникальность обнаруженной палеомагнитной записи связана с фиксацией породами чистяковской и мошакской свит обеих этих компонент, что является фактическим обоснованием одновременного действия двух источников. Для объяснения обнаруженных фактов предлагается оригинальная гипотеза, в соответствии с которой широко представленная в изученных породах биполярная компонента, отвечающая известной мадагаскарской группе палеомагнитных полюсов, отождествляется с полем центрального осевого диполя. Менее распространенная монополярная компонента, соответствующая австралийско-антарктической группе полюсов, связана со стационарным аномальным источником. Возможность фиксации последней обусловлена резким падением величины виртуального дипольного момента, вероятно, достигшего абсолютного минимума в чистяковское—мошакское время. В соответствии с построениями, палеомагнитный полюс, рассчитанный по биполярной компоненте 39.2° ю.ш., 61.1° в.д., согласуется с траекторией кажущегося движения полюса Сибири и может рассматриваться в качестве ключевого определения для возраста ~ 570 млн лет.

Палеомагнетизм, модель центрального осевого диполя, аномальная конфигурация геомагнитного поля, палеополус, эдиакарий, тасеевская серия, Енисейский кряж

PALEOMAGNETISM OF THE TASEEVA GROUP (YENISEI RIDGE): ON THE ISSUE OF THE GEOMAGNETIC FIELD CONFIGURATION AT THE PRECAMBRIAN–PHANEROZOIC BOUNDARY**E.V. Vinogradov, D.V. Metelkin, V.V. Abashev, V.A. Vernikovskiy,
N.Yu. Matushkin, N.E. Mikhaltsov**

We report results of a detailed study of the paleomagnetic record in the sedimentary rocks of the Taseeva Group of the Yenisei Ridge in three typical sections in the lower courses of the Angara, Taseeva and Irkineva rivers. Our results confirm that the geomagnetic field was in an anomalous state at the Precambrian–Phanerozoic boundary. It is well known that Ediacaran rocks in general have preserved several different paleomagnetic directions that do not conform to the geocentric axial dipole model. For example, Siberian sections display two equally valid groups of paleopoles that cause many debates over the geometry of the geomagnetic field and whether any of the components correspond to its dipole configuration. The paleomagnetic record we studied is unique in that the rocks of the Chistyakovka and Moshakovka formations have captured both these components, which is factual evidence of a synchronous existence of two sources. To explain these findings, we propose an original hypothesis in which the bipolar component that is widely present in the rocks and corresponds to the Madagascar group of paleomagnetic poles is associated to the field of the geocentric axial dipole. The less widespread monopolar component corresponding to the Australian–Antarctic group of poles is reflective of a stationary anomalous source. The recording of this source became possible due to the abrupt decrease in the strength of the virtual dipole moment that probably was at its lowest during the accumulation of the Chistyakovka and Moshakovka formations. The new paleomagnetic pole calculated for the bipolar component – 39.2°N, 61.1°E – plots on the apparent polar wander path for Siberia and can be considered a key determination for the age ~570 Ma.

Paleomagnetism, geocentric axial dipole model, anomalous geomagnetic field, paleopole, Ediacaran, Taseeva Group, Yenisei Ridge

ВВЕДЕНИЕ

Пограничный интервал докембрия—фанерозоя в геологической истории насыщен яркими событиями, проявленными не только в тектоносфере, биосфере, но и магнитосфере [Добрецов и др., 2021]. Это время активного развития океанических и связанных с ними морских бассейнов, сформированных на окраинах кратонов при распаде суперконтинента Родиния; резких климатических изменений, включая эпохи глобальных оледенений; мощнейшего в истории Земли всплеска в развитии органического мира и многое другое. Кроме того, палеомагнитные исследования последних 30 лет дают все больше оснований для предположения о крайне необычном состоянии магнитного поля Земли в то время [Kirschvink et al., 1997; Torsvik et al., 1998; Meert, 1999; Abrajevitch, Van der Voo, 2010; Biggin et al., 2012; Павлов и др., 2018; Шацилло и др., 2020]. На территории Сибири следы этих событий наилучшим образом записаны в осадочных последовательностях, распространенных по периферии кратона [Казанский, 2002; Павлов и др., 2004, 2018; Метелкин и др., 2005, 2007; Shatsillo et al., 2006; Верниковский и др., 2009; Шацилло и др., 2019, 2020]. Суть проблемы заключается в том, что сохранившиеся в этих последовательностях палеомагнитные направления образуют две в равной степени обоснованные группы эдиакарско-кембрийских полюсов. Первая группа ($\sim \text{Plat} = -35^\circ$, $\text{Plong} = 160^\circ$) располагается к юго-востоку от Австралии, она известна по результатам наиболее ранних исследований и после обобщений А.Н. Храмова с коллегами [Храмов и др., 1982] часто обозначается в литературе как «храмовская» (KHR). Палеомагнитные полюсы второй группы ($\sim \text{Plat} = -25^\circ$, $\text{Plong} = 65^\circ$) вблизи восточного побережья о. Мадагаскар, впервые обнаруженные Дж. Киршвинком [Kirschvink, Rozanov, 1984], соответственно называют «киршвинковскими» (KRS). Наличие дискретных групп одновозрастных полюсов не вписывается в общие представления об аксиальной дипольной геометрии магнитного поля Земли в рамках модели центрального осевого диполя (ЦОД) и порождает массу гипотез, в том числе об аномально высоких скоростях дрейфа плит, изменении оси вращения Земли и многие другие. Подробно эта проблема рассмотрена в работах [Казанский, 2002; Шацилло, 2006; Павлов, 2015]. Важным фактом является то, что в изученных разрезах KHR компонента обычно монополярная, а KRS, напротив, отвечает периодам частых, в некоторых разрезах ультрачастых инверсий [Шацилло и др., 2015]. Подобная запись с ультрачастыми инверсиями также обнаружена в близких по возрасту разрезах Восточно-Европейского кратона [Левашова и др., 2021]. При этом разрезы, в которых бы отмечалось сосуществование KHR и KRS, крайне редки [Павлов и др., 2018].

Анализ имеющегося для Сибири набора палеомагнитных направлений, представленный в [Павлов и др., 2004, 2018, с. 142], позволил выдвинуть гипотезу, согласно которой геомагнитное поле на рубеже эдиакария—кембрия «может быть описано чередованием продолжительных периодов господства аксиального преимущественно монополярного дипольного поля, записанного в виде компоненты KHR, перемежающегося с относительно кратковременными эпохами преобладания инверсирующего близэкваториального или среднеширотного диполя, записанного в виде компоненты KRS». Последний, в частности, может рассматриваться как результат экскурсов с относительно большей частотой и длительностью, чем в кайнозойе [Павлов и др., 2018]. Кроме того, значительную роль в конфигурации геомагнитного поля и соответственно расположении палеомагнитных полюсов на фоне сниженной напряженности главной дипольной составляющей [Bono et al., 2019; Shcherbakova et al., 2020] мог играть некий дополнительный недипольный источник [Шацилло и др., 2020], к примеру, мировые магнитные аномалии [Метелкин и др., 2022]. При этом длительность всего описанного эпизода аномального состояния геомагнитного поля остается дискуссионным. Ответы на имеющиеся вопросы могут дать только значительные по статистике ряды палеомагнитных данных.

В частности, этой проблеме и связанным с ней вопросам палеогеографии Сибири в терминальном докембрии посвящено настоящее исследование тасеевской серии Енисейского кряжа. Первые палеомагнитные определения по этим отложениям получены давно [Павлов, Петров, 1997]. Серия новых данных была представлена позднее в работах [Shatsillo et al., 2005, 2006] и обобщена в [Шацилло, 2006; Павлов, 2015]. Эти данные показали возможность присутствия обеих компонент KHR и KRS в разрезах тасеевской серии, обоснованная интерпретация которых вызывает дискуссии. Наши исследования охватывают наиболее изученный стратотипический район распространения серии на р. Тасеева, представительные разрезы Иркинеевского поднятия, а также хорошо известное обнажение скалы Гребень на правом берегу р. Ангара [Семихатов, 1962; Хоментовский и др., 1972; Советов, 1977; Советов, Благовидов, 2004; Мельников и др., 2005а; Кочнев и др., 2020].

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТАСЕЕВСКОЙ СЕРИИ

Терригенные красноцветные и пестроцветные отложения, объединяемые в составе тасеевской серии, рассматривают в качестве позднедокембрийской молассы, которая слагает основание платформенного чехла на юго-западе Сибирской платформы [Семихатов, 1962; Григорьев, 1963; Советов, Благо-

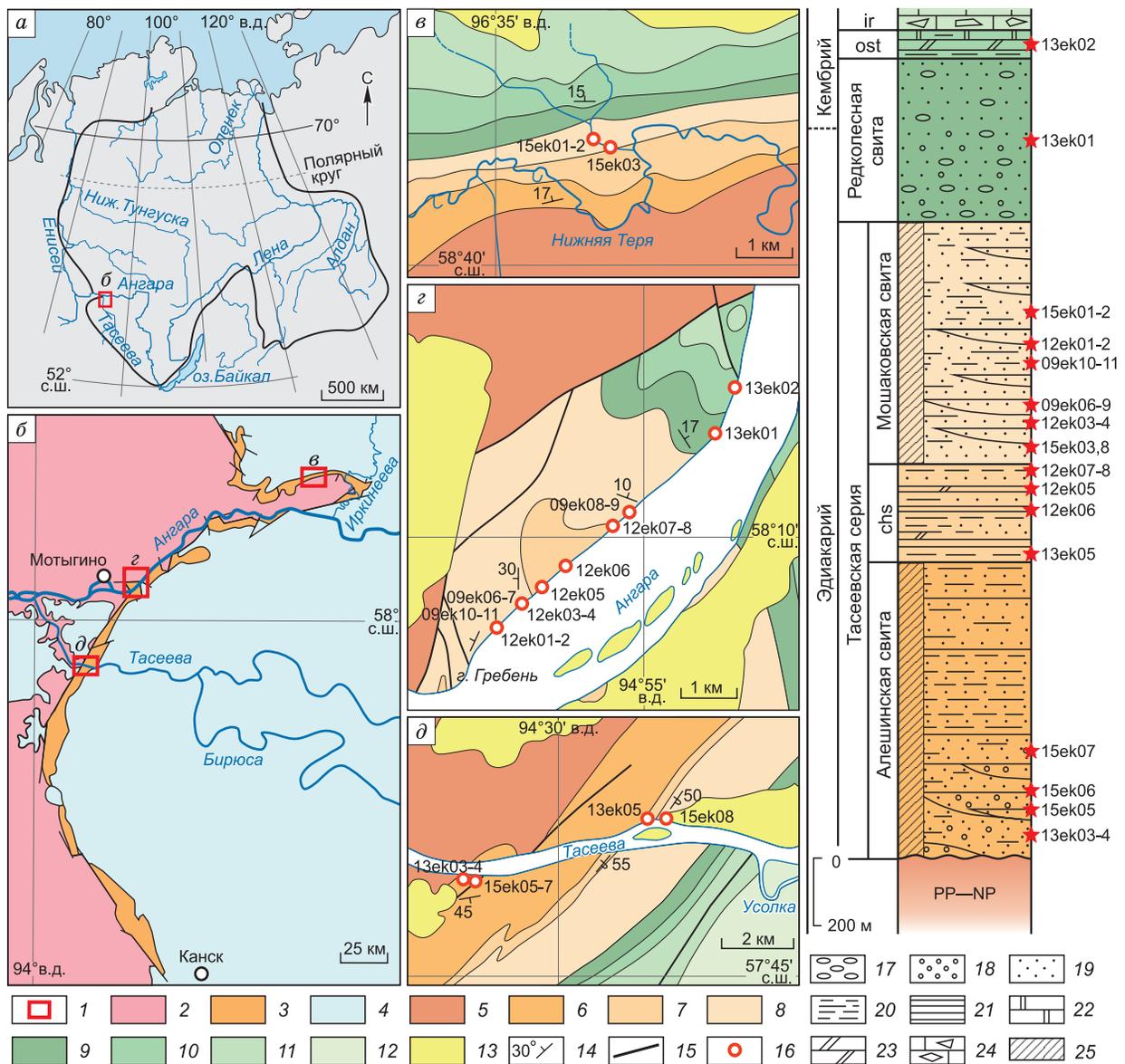


Рис. 1. Схемы геологического строения районов распространения тасеевской серии и сводная литологическая колонка, по материалам [Советов, Благовидов, 2004; Государственная..., 2009; Кочнев и др., 2020], с указанием точек палеомагнитного опробования.

1 — расположение района исследований в границах Сибирской платформы (а) и участков палеомагнитного опробования в структуре Ангаро-Канского прогиба (б); Иркутский участок по р. Нижняя Теря (в); участок скалы Гребень по р. Ангара (з); участок по р. Тасеева (д); 2 — протерозойские комплексы нерасчлененные; 3 — эдиакарская тасеевская серия; 4 — перекрывающие фанерозойские нерасчлененные отложения платформенного комплекса; на схемах в–д) и литологической колонке: 5 — палеопротерозойские-неопротерозойские отложения нерасчлененные; 6–8 — тасеевская серия: 6 — алешинская свита (al), 7 — чистяковская свита (chs), 8 — мошакская свита (msh); 9 — редколесная свита (rl); 10 — островная свита (ost); 11 — иркинеевская свита (ir); 12 — среднервхнекембрийские терригенные отложения нерасчлененные; 13 — четвертичные отложения; 14 — азимут и угол падения слоев; 15 — главные разрывные нарушения; 16 — точки палеомагнитного опробования с указанием их номера; 17–25 — на литологической колонке: 17 — конгломераты, 18 — гравелиты, 19 — песчаники, 20 — алевролиты, 21 — аргиллиты, 22 — доломиты, 23 — доломитовые мергели, 24 — брекчированные известняки, 25 — интервалы красноцветных пород.

видов, 2004]. Серия несогласно перекрывает различные комплексы протерозоя Сибирского кратона и приуроченных террейнов Саяно-Енисейской области [Хоментовский и др., 1972; Брагин, 1985]. Ее обнажения узкой полосой протягиваются вдоль восточной окраины юга Енисейского кряжа от Иркутского выступа на северо-востоке до окрестностей г. Канск на юге (рис. 1). Аналоги тасеевской серии известны в 150 км к востоку от естественных обнажений в глубоких скважинах Агалеевской, Имбинской, Богучанской и других площадей [Мельников и др., 2005, 2012].

Строение тасеевской серии тщательно изучено в типовых разрезах по берегам нижнего течения рек Ангара, Тасеева и Иркинеева [Семихатов, 1962; Хоментовский и др., 1972; Советов, 1977; Советов, Благовидов, 2004; Мельников и др., 2005; Кочнев и др., 2020]. В ее составе объединяют три свиты — алешинскую, чистяковскую и мошаковскую [Семихатов, 1962; Хоментовский и др., 1972]. Обстановки осадконакопления детально рассмотрены в [Советов, Благовидов, 2004].

Алешинская свита сложена красноцветными песчаниками и алевролитами с базальным горизонтом конгломератов. Ее интерпретируют как циклично устроенный аллювиальный комплекс. Нижняя часть свиты отвечает крайне низкому стоянию уровня моря, верхняя формировалась в обстановках дельтовой равнины и маркирует начало трансгрессии [Советов, Благовидов, 2004]. По мнению Ю.К. Советова [2015], вблизи основания свиты в стратотипе по р. Тасеева обнаружены диамиктиты, которые, однако, другими авторами интерпретируются как тектонически раздробленные пласты доломитов либо олистострома [Государственная..., 2009; Кочнев и др., 2020].

Чистяковская свита с постепенным переходом залегает на алешинской и представлена чередованием полимиктовых песчаников и аргиллитов серых, а также аргиллитов и алевролитов темно-серых с редкими прослоями доломитов. Ее формирование связывают с различными зонами мелководного шельфа на фоне постепенного (вверх по разрезу) снижения уровня моря [Советов, Благовидов, 2004].

Мошаковская свита согласно перекрывает чистяковскую. Она также сложена красноцветными, часто косослоистыми песчаниками и алевролитами с прослоями гравелитов аллювиального генезиса, маркирующих максимум регрессии [Советов, Благовидов, 2004]. Выше на мошаковской свите с небольшим размывом и несогласием залегают конгломераты и песчаники редколесной свиты, которые постепенно сменяются терригенно-карбонатной островной свитой [Советов и др., 1975; Советов, 1977].

Общая мощность тасеевской серии меняется от почти 1900 м в разрезе по р. Тасеева до 300 м в восточных разрезах Иркинеевского поднятия [Хоментовский и др., 1972; Мельников и др., 2005; Кочнев и др., 2020]. О возрасте отложений можно судить по палеонтологическим находкам, результатам изучения детритовых цирконов и данным С-изотопии.

Описанные в разрезах тасеевской серии микрофоссилии и строматолиты представлены транзитными таксонами очень широкого стратиграфического диапазона [Хоментовский и др., 1972; Пятилетов, Карлова, 1983; Liu et al., 2013]. Однако известные в перекрывающих отложениях ископаемые следы *Treptichnus* и находки мелкораквиной фауны уверенно определяют минимальный возраст серии — не моложе 540 млн лет [Кочнев, Карлова, 2010; Советов, 2018].

Согласно результатам геохронологического изучения детритовых цирконов из мошаковской свиты Иркинеевского поднятия, возраст самого молодого кластера из трех зерен составляет 580 ± 26 млн лет, а возраст единичного циркона из алешинской свиты — 609 ± 12 млн лет [Priyatkina et al., 2018]. В разрезе чистяковской свиты по р. Ангара выше ск. Гребень установлен кластер из пяти зерен циркона, возраст которого 580 ± 9 млн лет [Кочнев и др., 2020]. Минимальный возраст цирконов из алешинской и чистяковской свит в скважинах Абаканской площади составляет около 635 млн лет [Антипова, Пошибаев, 2017]. По материалам [Зуева, 2021], в скв. Абаканская-1 минимальный возраст цирконов из алешинской свиты 614 ± 14 млн лет, из чистяковской свиты 600 ± 13 млн лет.

Наконец, в доломитах чистяковской свиты установлена высокоамплитудная отрицательная аномалия $\delta^{13}\text{C}$, что позволяет сопоставлять их с уровнем глобальной позднеэдиакарской С-изотопной аномалии Шурам-Вонока [Кочнев и др., 2020], датируемой интервалом 551—580 млн л. н. [Grotzinger et al., 2011; Xiao et al., 2016]. Учитывая, что алешинская свита сложена относительно быстро накопившимися аллювиальными отложениями, а также постепенный переход между алешинской свитой и чистяковской, можно предполагать, что возраст основания тасеевской серии не превышает 600 млн лет [Кочнев и др., 2020].

Таким образом, по совокупности имеющихся данных возраст формирования тасеевской серии может быть оценен интервалом от 600 до 540 млн лет.

МЕТОДИКА И НЕПОСРЕДСТВЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор ориентированных образцов производился при помощи портативного бензинового бура. Образцы ориентировали по магнитному компасу с поправкой на местное магнитное склонение. Координаты всех точек опробования и фотографии опробованных обнажений даны в приложении (Дополнительные материалы А, https://sibran.ru/journals/Suppl_Vinogradov1.pdf).

Алешинская свита опробована в стратотипической местности по береговым обнажениям левого борта р. Тасеева, ниже устья Усолки. Ее выходы расположены в нижней по течению части (см. рис. 1). Контакт с подстилающими образованиями тектонический, однако разломом срезаны лишь самые низы базальной пачки свиты [Хоментовский и др., 1972]. Основание разреза сложено галечным конгломератом, далее косые серии представлены красноцветными гравелитами и грубозернистыми песчаниками с редкими пачками параллельно-слоистых песчаников. Выше по разрезу отмечается уменьшение грубо-

сти состава — чередуются вишнево-красные тонкозернистые песчаники и алевролиты. Завершается разрез мощной пачкой песчаников мелкозернистых полимиктовых вишнево-красных. Видимая мощность свиты более 800 м. Нами опробована нижняя часть свиты, для анализа были выбраны наиболее мелкозернистые разности песчаников и алевролиты (всего 52 образца в пяти точках).

Чистяковская свита также опробована в стратотипическом разрезе. Изученное обнажение расположено в правом борту р. Тасеева (см. рис. 1), напротив о. Машуковский. Свита здесь имеет опрокинутое залегание. Вверх по течению сначала фиксируется ритмичное чередование зеленовато-серых полимиктовых песчаников и серых аргиллитов, затем темно-серых аргиллитов с прослоями песчаников и редкими прослоями доломитов. Мощность свиты составляет около 260 м. Опробованы светло-серые полимиктовые песчаники, характеризующие нижнюю часть свиты. Серые песчаники верхней части чистяковской свиты также были опробованы в береговом обнажении правого борта Ангары выше скалы Гребень в ядре обнаженной здесь крупной антиклинальной складки (см. рис. 1). Всего отобрано 55 образцов в пяти точках.

Мошаконская свита изучена наиболее полно. Первое местоположение соответствует стратотипу. Опробованное обнажение отвечает нижней части свиты, сложено красно-бурыми среднезернистыми песчаниками и алевролитами и находится на правом берегу р. Тасеева напротив восточного окончания о. Машуковский. Второе местоположение отвечает ангарскому разрезу Гребенской антиклинали. Здесь детально опробованы оба ее крыла, предпочтение отдавалось мелкозернистым песчаникам. Наконец третье, наиболее восточное местоположение связано с Иркинеевским поднятием. Опробованы скальные выходы красных среднезернистых песчаников и алевролитов нижней и средней части мошаконской свиты в районе р. Нижняя Теря (см. рис. 1). Всего коллекция насчитывает 147 образцов из 14 обнажений.

Для верификации данных по тасеевской серии в разрезе северо-восточного крыла Гребенской антиклинали также отобрана небольшая коллекция (29 образцов в двух точках) песчаников перекрывающей редколесной свиты и доломитов вышележащей островной свиты (см. рис. 1).

Лабораторные эксперименты и измерения всей представленной коллекции выполнены на базе Новосибирского палеомагнитного центра по стандартным алгоритмам [Гаухе, 2010]. Состав присутствующих в породе магнитных минералов определялся на основе изучения температурной зависимости магнитной восприимчивости $k(T)$ в инертной аргонной среде с использованием многофункционального измерителя MFK1-FA Carrabridge с термоприставкой CS3 (AGICO, Чехия). Преобладают исключительно магнитомягкие минералы. При размагничивании переменным магнитным полем (АФ-размагничивание) после приложения поля максимальной амплитуды часто сохраняется 60 % и более исходной величины естественной остаточной намагниченности (NRM). Поэтому для установления компонентного состава NRM преимущественно применялась температурная чистка (T -размагничивание). Для этого использована немагнитная печь MMTD80A (Magnetic Measurements Ltd., Великобритания). Измерения величины и направления вектора остаточной намагниченности в процессе экспериментов выполнены на криогенном магнитометре SQUID 755 SRM (2G Enterprises, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Магнитная минералогия. Характерная красная окраска пород предполагает наличие в породе гематита. Однако его присутствие на графиках температурной зависимости магнитной восприимчивости не всегда заметно. По результатам изучения $k(T)$, в образцах идентифицируются магнетит и гематит. В процессе нагрева, начиная от температуры ~ 450 °С, наблюдается резкий рост величины k и лишь затем кривые нагрева снижаются до нуля в районе ~ 580 °С (рис. 2, а) либо в районе 680 °С (см. рис. 2, б). На кривых охлаждения при этом происходит рост величины k на один—два порядка по сравнению с исходным значением. Подобные изменения свидетельствуют об образовании вторичного магнетита в процессе нагрева, источником которого, вероятно, является пирит и/или сидерит.

Компонентный состав намагниченности аleshинской свиты. Величина NRM изученных песчаников и алевролитов варьирует в пределах 0.2—2.0 мА/м. Магнитная восприимчивость принимает значения от 2.5 до 9.0×10^{-5} ед. СИ. Оба параметра меняются синхронно и их отношение, соответствующее значению фактора Кенигсбергера (Q_n) в диапазоне от 0.1 до 1.0, характерно для пород с ориентационным типом намагничивания (рис. 3).

В низкотемпературном интервале преимущественно до 230 °С (реже до 400 °С) разрушается компонента прямой полярности с направлением, близким к направлению современного геомагнитного поля в районе работ (рис. 4). Мы предполагаем, что эта компонента, обозначенная далее VSC, отвечает вязкому намагничиванию либо термовязкому при температурах выше 230 °С. Наблюдаемые направления VSC представлены в приложении (см. дополнительные материалы В). В интервале средних температур ортогональные диаграммы в основном трудно интерпретировать. Спектры размагничивания разных компонент существенно перекрываются и регулярного направления выделить не удастся. В высокотемпературном интервале, отвечающем гематиту (вплоть до 680 °С), на ортогональных диаграммах

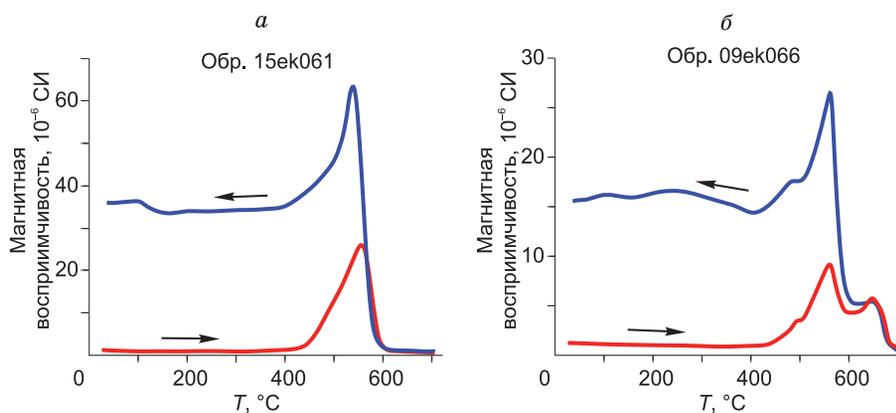


Рис. 2. Характерные графики температурной зависимости магнитной восприимчивости $k(T)$ песчаников алешинской (а) и мошакховской (б) свит.

видны прямые участки, ведущие в начало координат, т. е. соответствующие характеристической намагниченности (ChRM). Векторы ChRM имеют как прямую, так и обратную полярность и по направлению близки известной KRS компоненте [Павлов и др., 2018]. Тест обращения положительный (см. рис. 4). Для сравнения использованы все единичные векторы, установленные с помощью компонентного анализа. Угол между средними направлениями по выборке векторов прямой и обратной полярности после обращения составляет 6.6° при критическом значении 20° . По классификации [McFadden, McElhinny, 1990], этот положительный результат имеет класс «С». Явным образом KRS диагностируется не всегда. Примерно в половине образцов ее присутствие удается проследить только по стереограммам, где проекция вектора остаточной намагниченности описывает дугу большого круга. Используя приемы комбинированного анализа единичных направлений и больших кругов [McFadden, McElhinny, 1988], выделить KRS удается в четырех из пяти точек опробования. О ее доскладчатом происхождении свидетельствует тест складки (см. рис. 4). Максимум кучности достигается при 103 % введения поправки за элементы залегания с 95 %-м интервалом доверия от 111.8 до 94.4 % [Watson, Enkin, 1993]. Корреляционный тест складки в модификации [Enkin, 2003] также положительный (DS Slope: 107.1 ± 47.2 %).

Компонентный состав намагниченности чистяковской свиты. Величина NRM изученных образцов чистяковской свиты составляет от 0.1 до 3.0 мА/м, значения k варьируют в интервале $(3-35) \times 10^{-5}$ ед. СИ. Распределение фигуративных точек на диаграмме $\lg NRM-k$ «растянуто» вдоль линий Q_n , что характерно для пород с ориентационным типом намагниченности, когда оба петромагнитных параметра зависят только от концентрации магнитных частиц [Nagata, 1961]. Фактор Q_n принимает значения от 0.05 до 4, однако в большинстве составляет около 0.4 (см. рис. 3). Явных отличий в петромагнитных параметрах между опробованными разрезами на реках Тасеева и Ангара не обнаружено. Однако поведение вектора NRM в ходе T -размагничивания и результаты компонентного анализа разнятся.

Образцы алевролитов из тасеевского обнажения демонстрируют очень «шумный» палеомагнитный сигнал. В низкотемпературном интервале (до 270°C) можно идентифицировать VSC компоненту (см. доп. материалы В), а при дальнейшем нагреве изменение вектора остаточной намагниченности

фактически хаотическое и регулярной компоненты выделить не удается.

В песчаниках ангарского разреза VSC не выделяется. В большинстве образцов в низкосреднетемпературном интервале (до 400°C в песчаниках 12ek05,06 и до 200°C в алевропесчаниках 12ek08) установлена регулярная компонента северо-западного склонения и положитель-

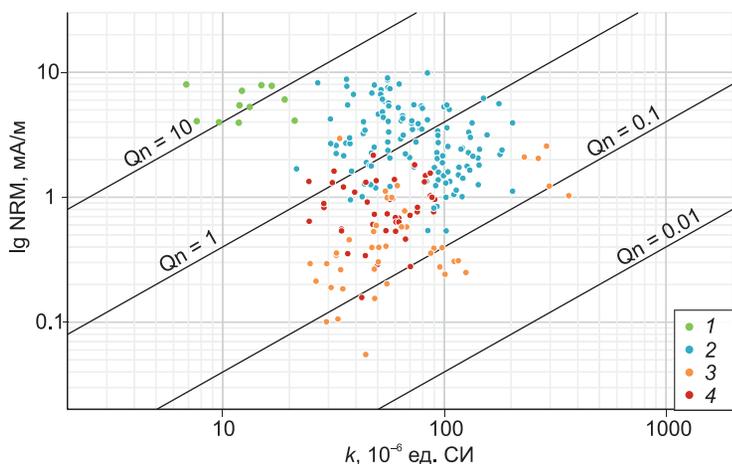


Рис. 3. Скалярные магнитные характеристики изученных пород.

Свиты: 1 — редколесная, 2 — мошакховская, 3 — чистяковская, 4 — алешинская.

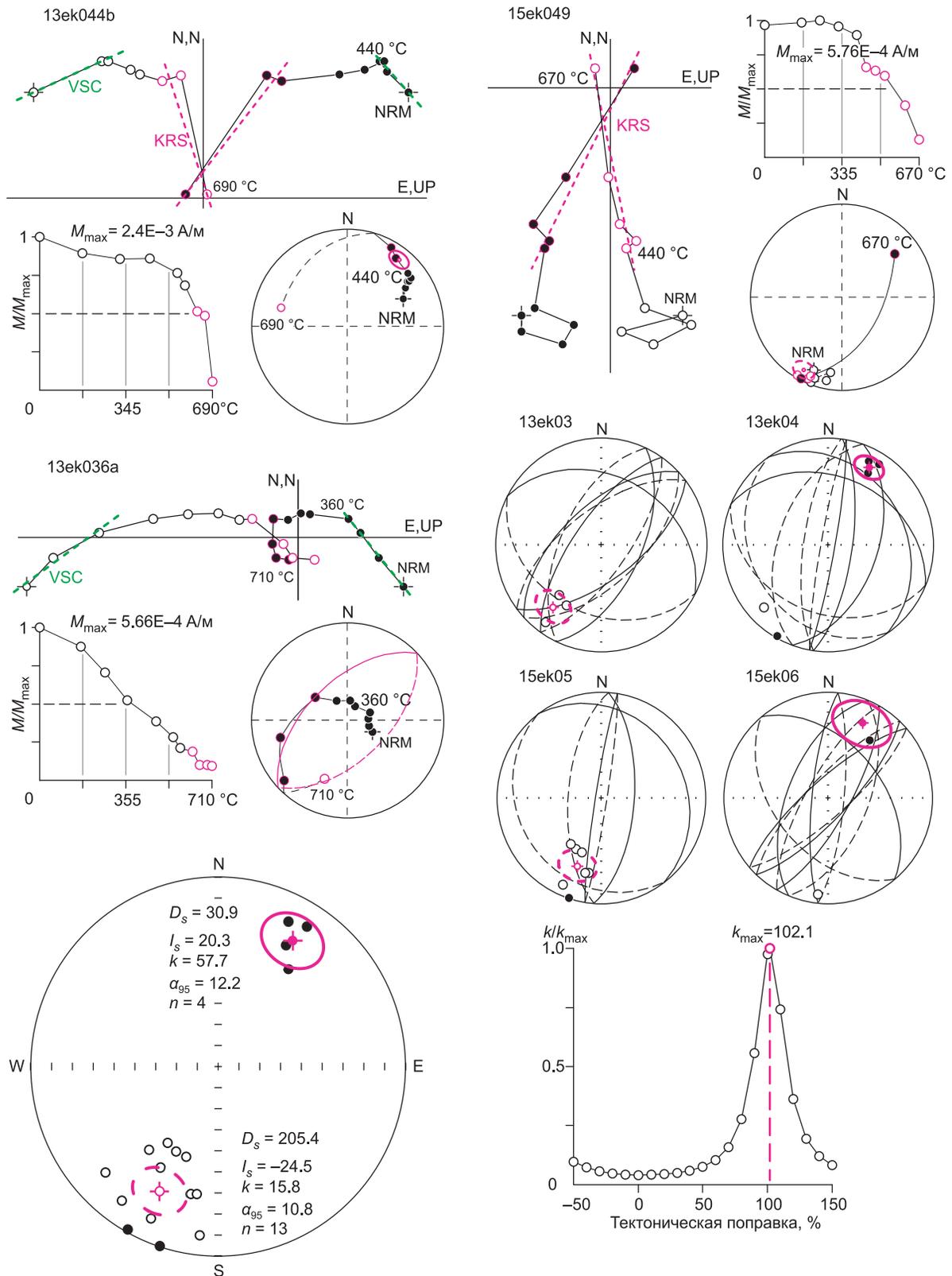


Рис. 4. Результаты ступенчатого размагничивания песчаников аleshинской свиты.

Ортогональные диаграммы, соответствующие графики NRM(T) и стереограммы по результатам размагничивания представленных образцов и стереограммы с иллюстрацией применения комбинированного анализа единичных направлений и больших кругов [McFadden, McElhinny, 1988] для каждого изученного обнажения, координаты стратиграфические (сверху). Биполярное распределение единичных векторов компоненты KRS, иллюстрация теста обращения и график изменения кучности при пропорциональном распрямлении складки, по [Watson, Enkin, 1993] (внизу). Здесь и далее на стереограммах: темные точки соответствуют проекции на нижнюю полусферу (положительное наклонение вектора), светлые точки — проекции на верхнюю полусферу (отрицательное наклонение вектора).

Таблица 1. Направления стабильной компоненты KRS в изученных обнажениях тасеевской серии и координаты соответствующих геомагнитных полюсов

Объект	$n(nR) + c/N$	Современные координаты, град.		Древние координаты, град.		k	α_{95}	VGPOle		
		D	I	D	I			Plat	Plong	A_{95}
Алешинская свита										
13ek03	3(3) + 5/11	209.9	0.3	218.6	-25.3	19.7	12.8	-36.9	45.1	10.1
13ek04	5(2) + 5/11	26.0	-11.5	28.3	18.5	25.3	9.8	37.0	238.6	7.3
15ek05	7(7) + 3/11	298.4	-3.1	199.5	-31.9	14.2	13.3	-47.0	66.7	11.2
15ek06	2(1) + 6/9	22.9	-14.9	24.9	22.5	8.6	20.0	40.2	241.9	15.4
Чистяковская свита										
12ek05	9(1)/12	18.4	27.3	10.3	28.3	22.2	11.2	46.2	260.5	9.1
12ek08	9(2)/10	7.7	39.5	12.3	35.8	18.9	12.2	50.6	256.5	10.8
Мошаконская свита										
09ek08	9(1) + 1/11	24	41.8	23.4	31.8	16.9	12.1	45.5	242.1	10.2
09ek09	6(2)/10	30.8	25.9	29.5	21.8	10.0	22.3	38.1	237.1	17.1
09ek10	7(2)/10	49	19.7	45.0	20.8	10.3	19.7	31.6	220.2	15.0
12ek01	7(2)/10	28.7	1.0	28.7	-1.0	10.0	20.1	27.1	242.3	14.2
12ek04	5(2)/9	36.5	-2.0	34.2	14.7	21.9	16.7	32.9	233.3	12.3
15ek01	5 + 5/11	24.2	32.4	21.8	16.2	27.9	9.3	36.9	249.2	6.9
15ek02	4(1) + 4/10	18.3	35.3	18.5	20.3	15.2	14.7	39.8	252.6	11.2
15ek03	3(2) + 9/12	211.5	-30.0	206.5	-17.1	13.6	12.2	-36.1	63.5	9.1
Среднее		32.2	17.8	—	—	7.1	16.1	—	—	—
		—	—	26.1	22.0	41.6	6.2	39.2	241.1	4.8
Редколесная свита										
13ek01	13/13	2.0	65.3	22.3	53.0	57.8	5.5	61.2	234.0	6.3

Примечание. Здесь и далее: $n(nR) + c/N$ — число единичных векторов, использованное в статистике (в том числе с отрицательным наклоном вектора — в скобках) + число больших кругов, к общему количеству изученных образцов; D — склонение; I — наклонение; k , α_{95} — статистические параметры Фишера: кучность и радиус 95%-го овала доверия; VGPOle — координаты виртуального геомагнитного полюса: Plat — широта, Plong — долгота, A_{95} — 95%-й овал доверия.

ного наклонения, соответствующая по своему направлению известной компоненте KHR [Павлов и др., 2018] (рис. 5).

Кроме «храмовской» компоненты в двух обнажениях удастся распознать направления, соответствующие KRS (см. рис. 5). В песчаниках KRS разрушается при нагреве до 550 °С, в алевропесчаниках при значительно более низких температурах (выше 320—400 °С) величина намагниченности оказывается ниже пороговой чувствительности прибора. Преобладают направления прямой полярности северо-северо-восточного склонения, только 3 из 18 образцов намагничены обратно, т. е. векторы KRS имеют юго-юго-западные склонения и отрицательные наклонения (табл. 1).

Компонентный состав намагниченности мошаконской свиты. Петромагнитные характеристики большей части изученных разрезов в целом сопоставимы с алешинской и чистяковской свитами по величине k , которая варьирует в диапазоне $(2—20) \times 10^{-5}$ ед. СИ. Величина NRM при этом часто сравнительно выше и составляет от 0.5 до 10 мА/м. Тем не менее фигуративные точки на билогарифмической диаграмме NRM— k сохраняют тенденцию к расположению вдоль линии $Q_n = 1$, определяющую концентрационную зависимость петромагнитных параметров (см. рис. 3).

Стабильность намагниченности песчаников иркинеевского разреза (15ek01 и 15ek02) к нагревам высокая (см. рис. 5). Низкотемпературные компоненты намагниченности не идентифицируются. От температуры ~ 300 °С до 520—550 °С фиксируется регулярная компонента, среднее направление которой в географической системе координат не отличается от VSC (см. доп. материалы В). В высокотемпературном интервале до 640—680 °С примерно в половине образцов установлена характеристическая компонента KRS (см. рис. 5, обр. 15ek016). В оставшихся образцах стандартными приемами компонентного анализа KRS выделить не удастся и для ее идентификации использованы большие круги (см. рис. 5, обр. 15ek015а; табл. 1).

Песчаники другого обнажения иркинеевского разреза (15ek03), где петромагнитные параметры сопоставимы с большинством изученных обнажений мошаконской свиты, имеют более сложный ком-

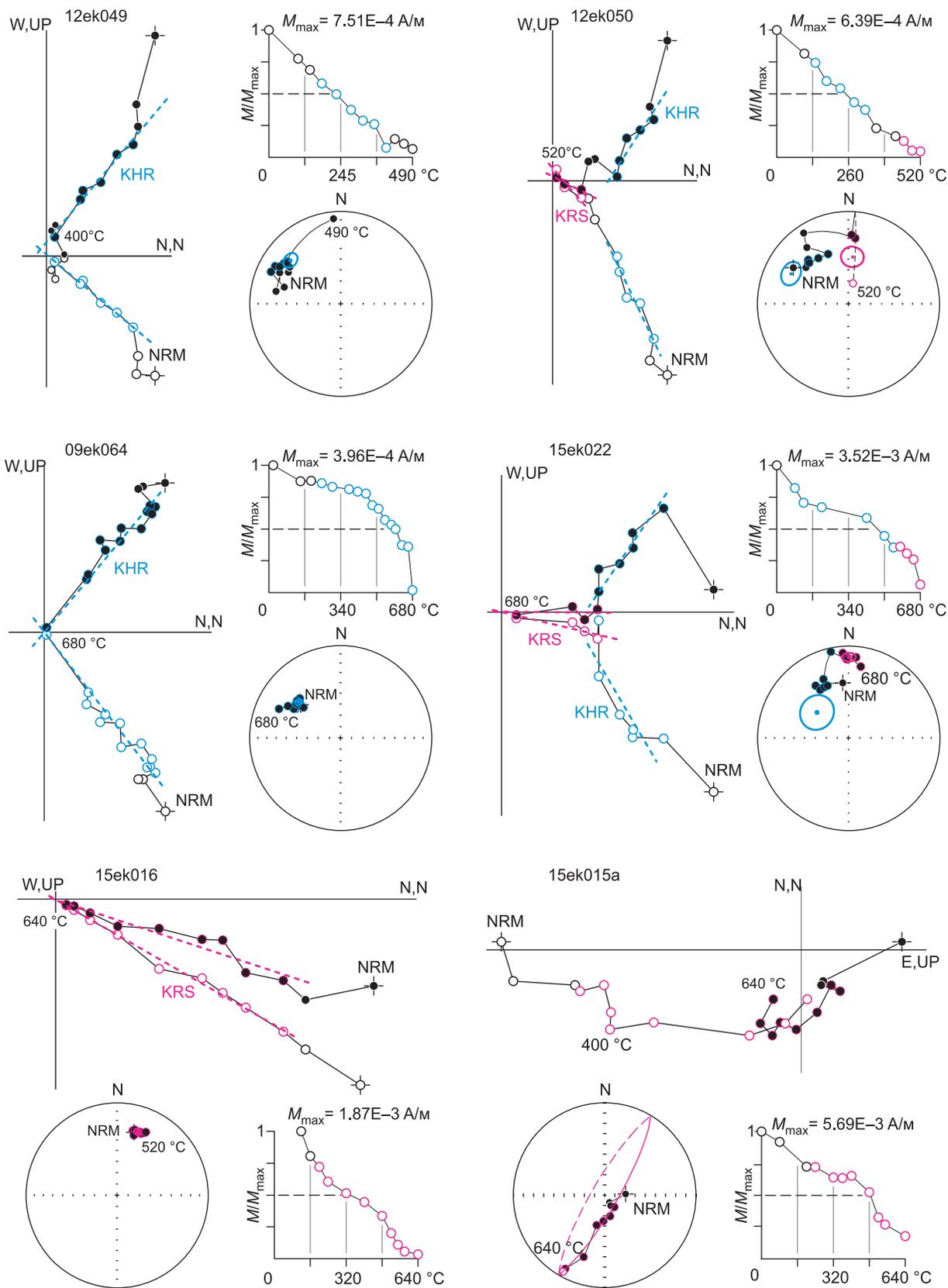


Рис. 5. Характерные ортогональные диаграммы, соответствующие графики NRM(T) и стереограммы по результатам ступенчатого терморазмагничивания образцов чистяковской (12ek049 и 12ek050) и мошаконской (09ek064, 15ek015a, 15ek016 и 15ek022) свит, координаты стратиграфические.

Пояснения см. в тексте.

понтный состав NRM. Компонента VSC выделяется в сравнительно более низкотемпературном (до 240—400 °С) интервале размагничивания. В среднетемпературном (от 360 до 500 °С) интервале выделяется компонента, отвечающая по своему направлению известной ранее KHR [Павлов и др., 2018] (см. рис. 5, обр. 15ek022; табл. 2). Присутствие KHR фиксируется в этих образцах не только по результатам температурного, но и AF-размагничивания. Интервал ее разрушения 100—140 мТл. В этих же образцах в интервале ~ 550—640 °С при использовании приемов комбинированного анализа единичных направлений и больших кругов установлена компонента KRS (см. табл. 1).

Наиболее детально изучен ангарский разрез Гребенской антиклинали. Здесь по результатам *T*-размагничивания также фиксируются обе компоненты, хотя KHR преобладает. Так, в песчаниках обнажений 09ek06, 07, 11 и 12ek02, 03 единственная регулярная компонента соответствует KHR. Судя по деблокирующим температурам, она может отвечать различным по составу магнитным фазам и является наиболее высокотемпературной характеристической (см. рис. 5, обр. 09ek064).

В NRM песчаников обнажений 09ek09, 10 и 12ek01, 04 зафиксированы обе компоненты. Обычно KRS также выделяется в гематитовом интервале, вплоть до 680 °С, а KHR деблокируется при ~ 580 °С. При этом в обнажении 09ek09 обе компоненты одновременно присутствуют лишь в двух образцах, а в оставшихся до 680 °С выделяется либо только KRS, либо KHR (см. табл. 1, 2).

Наконец, в песчаниках из обнажения 09ek08, где преобладает гематит, KRS является единственной достоверно идентифицируемой регулярной компонентой.

Компонента KHR во всех образцах, в которых она встречается, имеет исключительно положительное наклонение вектора при характерном северо-западном склонении. Компонента KRS, напротив, биполярная: 9 образцов юго-юго-западного склонения и преимущественного низкого отрицательного наклонения, а оставшиеся 25 северо-северо-восточного склонения и преобладающего положительного наклонения (см. табл. 1).

Регулярная компонента, близкая по направлению к KHR, зафиксирована в 9 из 11 изученных образцов песчаника мошакской свиты тасеевского разреза (т. 15ek08). Ее отличительной особенностью является не характерное для KHR отрицательное наклонение и обратное юго-восточное склонение в среднем $D_s = 101.8$, $I_s = -25.1$, $\alpha_{95} = 8.9$. В современной системе координат направления векторов этой компоненты не отличаются от VSC — $D_g = 2.0$, $I_g = 66.2$. Высокотемпературный от ~440 до 670 °С интервал деблокирования, указывающий на гематит как на основной носитель этой характеристической намагниченности, может свидетельствовать о термовязкой природе намагниченности.

Фактическая VSC в этих песчаниках разрушается на первых ступенях размагничивания до температуры ~ 160 °С (см. доп. материалы В). В то же время отождествлять высокотемпературную ChRM

Таблица 2. Направления компоненты KHR в изученных обнажениях тасеевской серии и координаты соответствующих геомагнитных полюсов

Объект	<i>n/N</i>	Современные координаты, град.		Древние координаты, град.		<i>k</i>	α_{95}	VGPole		
		<i>D</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	<i>I</i>			Plat	Plong	A_{95}
Чистяковская свита										
12ek05	12/12	331.3	49.1	320.8	37.4	28.6	8.3	43.2	329.0	7.5
12ek06	7/12	328.6	42.6	315.1	36.9	24.6	12.4	40.4	335.1	11.1
12ek08	8/10	315.5	40.4	321.3	42.8	25.8	11.1	46.9	331.1	10.8
Мошакская свита										
15ek03	7/12	294.3	50.4	306.8	38.8	23.9	12.6	37.4	345.9	11.6
09ek06	9/12	348.1	61.2	307.7	33.4	30.3	9.5	34.9	341.3	8.2
09ek07	8/11	334.4	62.2	308.2	39.6	32.3	9.9	38.8	343.5	9.2
09ek09	6/10	321.1	5.0	320.0	12	15.0	17.8	29.4	322.1	12.9
09ek10	9/10	316.2	45.7	315.3	35.8	21.6	11.3	39.8	334.4	10.0
09ek11	9/9	322.7	46.8	314.5	35.0	45.7	7.7	39.0	334.9	6.7
12ek01	10/10	304.1	24.9	304.4	14.4	22.1	10.5	23.8	338.3	7.7
12ek02	10/11	304.8	39.2	305.7	24.2	36.5	8.1	29.1	340.0	6.3
12ek03	10/10	329.8	58.8	311.5	31.1	31.8	8.7	35.4	336.5	7.3
12ek04	9/9	330.4	47.5	312.0	33.7	31.6	9.3	37.1	337.0	8.0
Среднее		320.1	45.1	—	—	20.1	9.5	—	—	—
		—	—	312.4	32.1	57.9	5.5	36.4	336.0	4.6

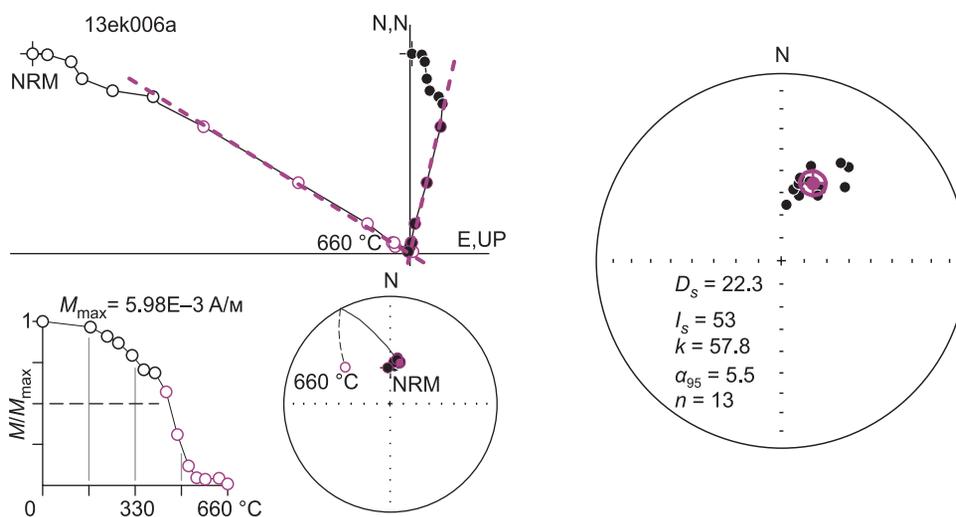


Рис. 6. Результаты ступенчатого термоматематического размагничивания песчаников редколесной свиты.

Ортогональная диаграмма, соответствующий график NRM(T) и стереограмма по результатам размагничивания представительного образца (слева) и распределение стабильной компоненты во всех образцах изученного обнажения (справа), координаты стратиграфические. Пояснения см. в тексте.

с полем, обратным KHR, не позволяют результаты теста обращения. Для сравнения мы использовали указанное среднее направление в т. 15ek08 и среднее направление для всей выборки KHR (см. табл. 2). Угол между тестируемыми направлениями после приведения к одной полярности $\gamma = 27.66$ заметно выше критического $\gamma_c = 20.51$. Координаты рассчитанного виртуального геомагнитного полюса: $Plat = -17.4$, $Plong = 181.7$, $A_{95} = 7.0$ находятся несколько в стороне от известной группы австралийско-антарктических полюсов Сибири, отвечающих направлению KHR, и ближе к раннепалеозойским, что может предполагать метакристаллическую природу этой компоненты.

Кроме того, нельзя обойти вниманием возможность ошибочного палеомагнитного направления в т. 15ek08 в древней системе координат из-за недостоверности определения палеогоризонтальной. Согласно структурным наблюдениям, в том числе направлению падения косых серий в пределах этого обнажения, констатируется опрокинутое залегание [Хоментовский и др., 1972]. Однако, если предположить, что эти заключения неверны и измеренное падение слоистости отвечает нормальному залеганию толщи, то направление высокотемпературной ChRM: $D_s = 325.5$, $I_s = 25.4$, $\alpha_{95} = 8.9$ не только положительное по наклону, но и в целом мало отличается от среднего направления KHR.

Таким образом, хотя у нас нет достоверных сведений о природе намагниченности, установленной в т. 15ek08, на основании приведенных фактов мы склоняемся к тому, чтобы не отождествлять ее с компонентой KHR, исключить из дальнейшего анализа и рассматривать как противоречие, требующее дополнительной проверки.

Компонентный состав намагниченности редколесной свиты. По результатам T -размагничивания песчаников редколесной свиты фиксируется относительно плавное уменьшение величины NRM (рис. 6). В низкотемпературном интервале до 230–300 °C разрушается VSC компонента (см. доп. материалы В). В высокотемпературном интервале размагничивания, включающем температуры деблокирования гематита, фиксируется ChRM, направление которой в основном близко к KRS, однако имеет более крутое наклонение (см. табл. 1).

Нами было опробовано также одно обнажение серых доломитов островной свиты ангарского разреза (см. рис. 1). В составе NRM удается выделить только одну регулярную VSC компоненту в низкотемпературном интервале до 230 °C (см. доп. материалы В).

ОБСУЖДЕНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

По результатам проведенного анализа в составе NRM тасеевской серии кроме вязкой составляющей установлены две регулярные компоненты.

Компонента KRS зафиксирована во всех изученных разрезах тасеевской серии, а также в перекрывающей редколесной свите. Ее направления имеют биполярное распределение. Чаще установленные векторы KRS имеют пологое положительное наклонение при северо-северо-восточном склонении (всего 53 единичных вектора), однако нередко встречаются обратные направления юго-юго-западного

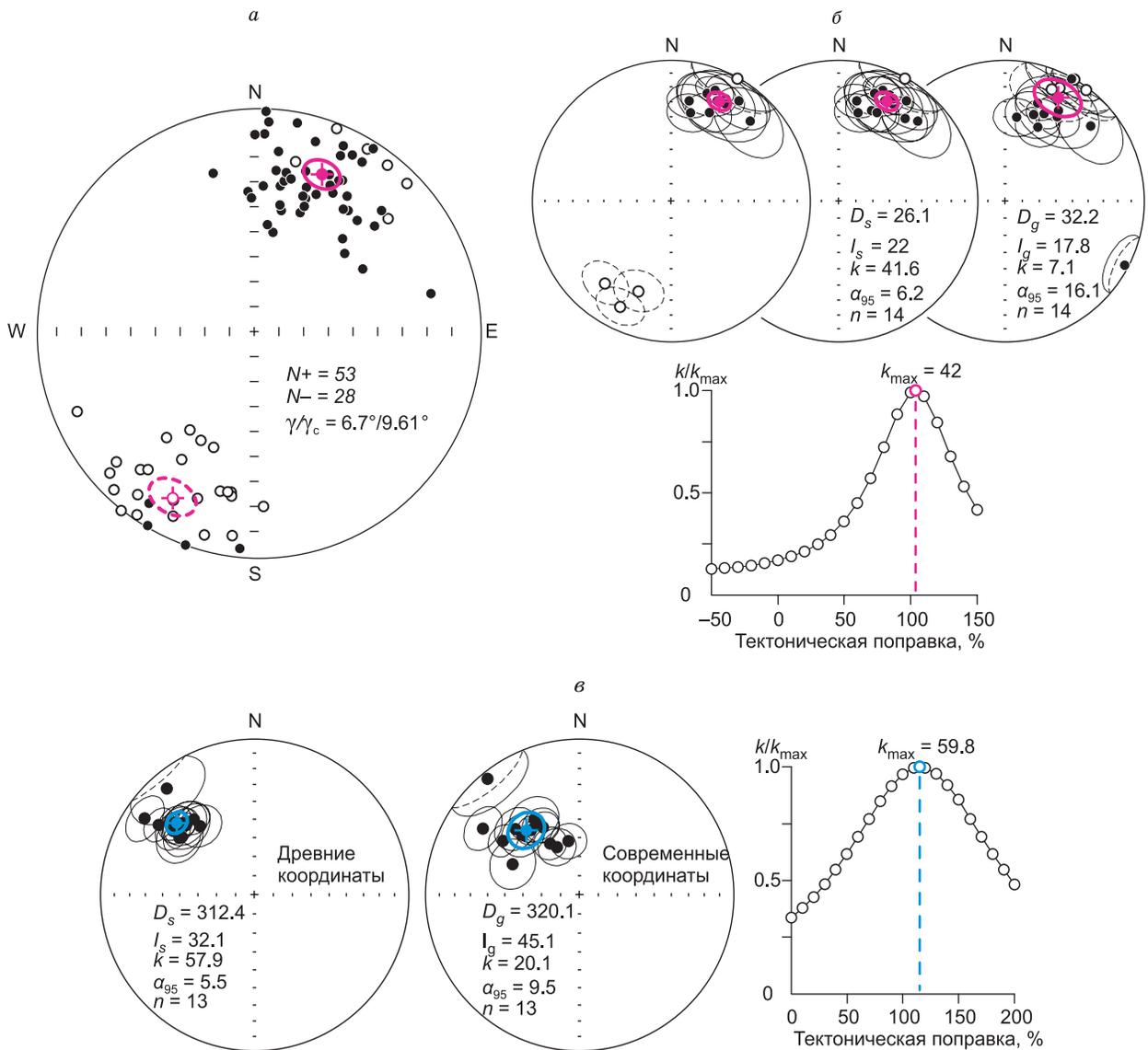


Рис. 7. Результаты палеомагнитных тестов.

Иллюстрация теста обращения — биполярное распределение всех установленных в обнажениях тасеевской серии векторов KRS, координаты стратиграфические (а); стереограммы, иллюстрирующие распределение средних по обнажениям направлений KRS (см. табл. 1) слева направо до и после приведения к одной полярности в древних (при 100 %-м распрямлении складки) и в современных (при 0 %-м распрямлении складки) координатах и соответствующий график изменения кучности при пропорциональном распрямлении складки (б); стереограммы, иллюстрирующие распределение средних по обнажениям направлений KHR в чистяковской и мошакской свитах (см. табл. 2) и соответствующий график изменения кучности при пропорциональном распрямлении складки (в).

склонения и отрицательного наклонения (всего 28 единичных векторов). При этом прямо- и обратномагнитные образцы фиксируются в пределах каждого опробованного обнажения, даже в тех случаях, когда для опробования выбраны интервалы мощностью менее метра, включающие лишь несколько последовательных слоев (см. доп. материалы А). Такая палеомагнитная запись указывает на исключительно частый инверсионный режим геомагнитного поля во время фиксации намагнитченности, ранее уже установленный для эдиакария [Шацилло и др., 2015; Левашова и др., 2021]. Положительный тест обращения по всей полученной выборке единичных векторов имеет класс «В» согласно классификации [McFadden, McElchinnny, 1990]. Угол между направлениями после приведения к одной полярности составляет 6.7° при $\gamma_c = 9.61^\circ$ (рис. 7, а).

В пользу первичной природы установленной KRS дополнительно свидетельствует тест складки. Параметр кучности распределения средних по изученным обнажениям направлений в стратиграфиче-

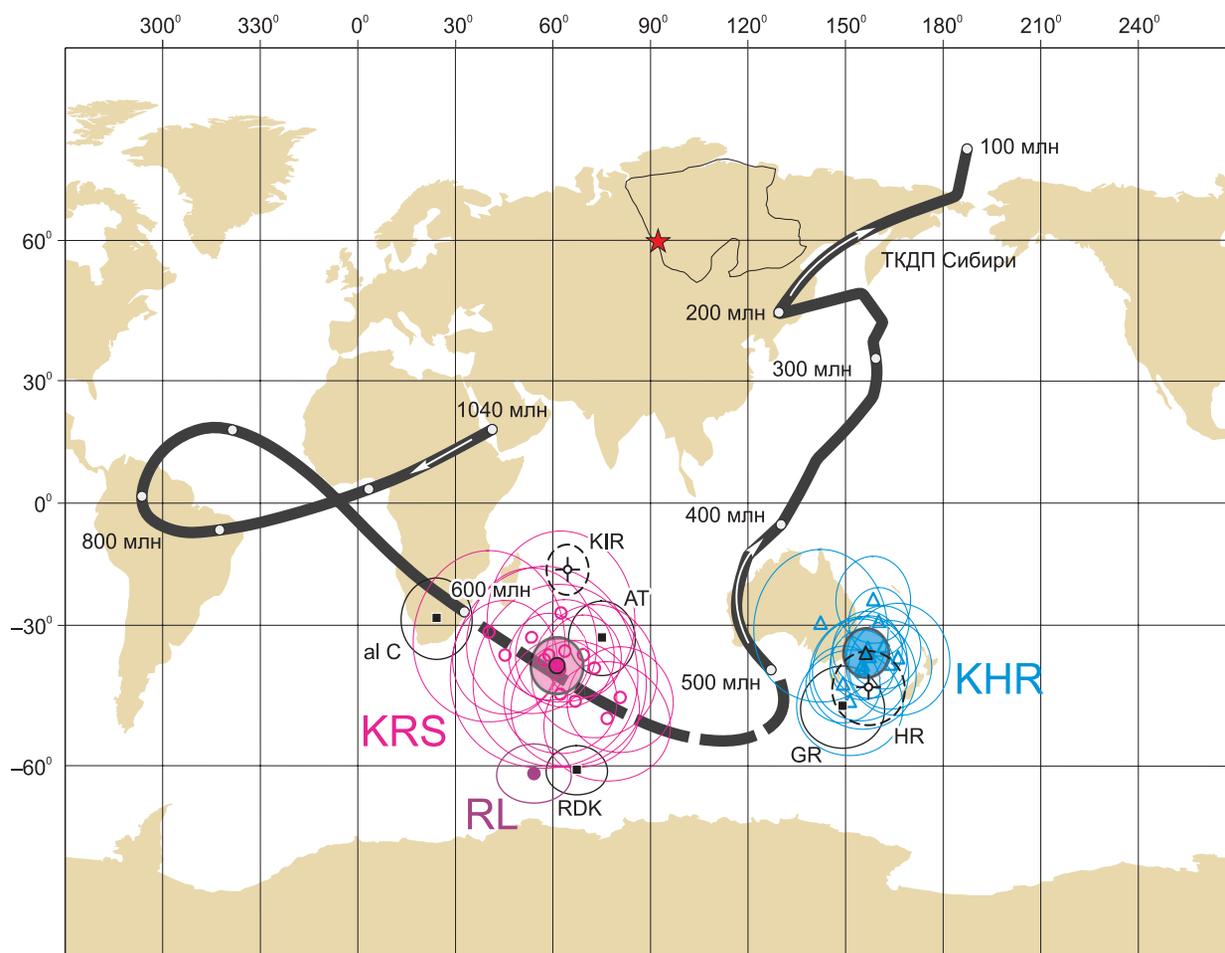


Рис. 8. Положение наблюдаемых эдиакарских и раннекембрийских полюсов (см. табл. 3) в сравнении с ТКДП Сибири, по [Метелкин и др., 2012].

Прерывистой линией показан интерполированный/предполагаемый участок ТКДП, отвечающий эдиакарско-раннекембрийскому интервалу.

ской системе координат значительно выше, чем в географической, $k_s/k_g = 5.86$ при критическом значении 2.55 для $n = 14$, по [McElhinny, 1964]. Симуляционный параметрический тест складки [Watson, Enkin, 1993] показывает, что максимальная кучность достигается при 103.7 % распрямления складки с узким 95%-м интервалом доверия от 112.5 до 95.1 %, т. е. при полном распрямлении складки (см. рис. 7, б). Корреляционный тест складки [Enkin, 2003] также положительный DS Slope: 106.11 ± 21.91 %. Все эти данные уверенно свидетельствуют о приобретении палеомагнитного сигнала, отвечающего KRS, до момента регионального смятия толщи. Геолого-структурные наблюдения предполагают несколько возможных периодов деформаций Тасеевского осадочного бассейна. Наиболее ранним из них может быть кембрийско-ордовикский интервал, связанный с аккреционными преобразованиями в юго-западном обрамлении Сибирского палеоконтинента. Последние проявлены в Южно-Енисейском крыже в виде гранитоидных интрузий и тектонотермальных событий, фиксируемых соответственно U-Pb и Ar-Ar геохронологическими данными [Верниковский и др., 1999; Верниковская и др., 2004, 2007; Метелкин, 2013].

Координаты виртуальных геомагнитных полюсов (VGP), рассчитанных по компоненте KRS каждого обнажения, образуют относительно кучную группу к юго-востоку от побережья о. Мадагаскар (рис. 8). Отсутствие значимых отличий в палеомагнитных направлениях и положении VGP после приведения к одной полярности для каждой из свит может говорить в пользу незначительных отличий в возрасте установленной намагниченности, т. е. формирование тасеевской серии занимало относительно небольшой интервал геологического времени и отклонение VGP от общего среднего палеомагнитного полюса связано в основном с вариациями геомагнитного поля. Однако более вероятно, что такая картина является следствием скудной статистики, не достаточной для разделения направлений намагниченности близкого возраста, когда области вариаций в выборках по каждой свите значительно пересекают-

Таблица 3. Сравнение полученных и имеющихся палеомагнитных определений

КОД	Объект	Палеомагнитный полюс				Лит. источник
		Ф	Λ	<i>N</i> (<i>S</i>)	<i>A</i> ₉₅	
KRS	Компонента KRS в тасеевской серии	-39.2	61.1	119 (14)	4.8	[Наст. работа]
KIR	«Киршвинковский» полюс	16.6	244.5	50.0	4.4	[Kirschvink, Rozanov, 1984]
KHR	Компонента KHR в мошакской и чистяковской свитах	-36.4	156.0	114 (13)	4.6	[Наст. работа]
HR	«Храмовский» полюс	-44.0	157.0	(3)	8.0	[Храмов и др., 1982]
RL	Высокотемпературная компонента в редколесной свите	-61.2	54.0	13 (1)	6.3	[Наст. работа]
al C	Высокотемпературная компонента в алешинской свите	-28.3	24.3	17 (1)	7.7	[Shatsillo et al., 2006]
GR	Среднетемпературная компонента в мошакской, чистяковской и островной свитах разреза Гребень	-48.0	149.1	65	3.6	»
AT	Высокотемпературная компонента в мошакской и чистяковской свитах	-32.9	75.1	42 (9)	6.3	»
RDK	Высокотемпературная компонента в редколесной свите	-60.8	68.1	60 (8)	5.1	»

Примечание. КОД — аббревиатура палеомагнитного определения соответствует обозначению полюса на рис. 8; Ф, Λ — широта и долгота среднего палеомагнитного полюса; *N* (*S*) — число образцов (VGP), использованных при осреднении; *A*₉₅ — радиус 95%-го овала доверия для палеомагнитного полюса.

ся. В таком случае при малом количестве определений для каждой свиты различия в положении их палеомагнитных полюсов будут стираться. Таким образом, на настоящем этапе мы можем констатировать, что координаты рассчитанного палеомагнитного полюса отражают осреднение за весь интервал накопления тасеевской серии от 600 до 540 млн лет и это принимается в качестве опорного определения для уровня 570 млн лет.

Координаты этого палеомагнитного полюса согласуются с имеющимися для Сибири, в том числе по тасеевской серии (см. табл. 3; рис. 8). В частности, координаты палеомагнитного полюса по высокотемпературной компоненте в мошакской и чистяковской свитах (AT), представленные в [Shatsillo et al., 2006], в пределах ошибки определения не отличаются. Заметное отклонение в положении палеомагнитного полюса по алешинской свите (см. табл. 3, al C), предложенное в той же работе [Shatsillo et al., 2006], находится в пределах зафиксированных нами вариаций. Это определение получено фактически по одному обнажению свиты по р. Тасеево и, скорее, может рассматриваться как VGP, которая дополняет полученную нами выборку.

Рассчитанный полюс перекрывающей редколесной свиты оказывается заметно (не менее чем на 10—15°) южнее среднего полюса по тасеевской серии (см. табл. 3; рис. 8). Обращает на себя внимание совпадение палеомагнитных направлений в песчаниках редколесной свиты, полученных в настоящем исследовании и ранее в работе [Shatsillo et al., 2006]. Однако сравнительно небольшая статистика определений, использованных для расчета полюса по редколесной свите, в силу обозначенных выше проблем позволяет рассматривать это положение только как предварительное, требующее дальнейшей проверки. Главное, что необходимо констатировать на настоящем этапе, — это близость компоненты KRS в редколесной свите и более древней тасеевской серии. Их палеополюсы образуют согласованный тренд, отвечающий «эдиакарскому пробелу» в траектории кажущегося движения полюса (ТКДП) Сибири (см. рис. 8).

Иначе выглядит компонента KHR. Ее направления зафиксированы, но во всех изученных обнажениях исключительно в верхней части тасеевской серии — в чистяковской и мошакской свитах. В пользу древнего, доскладчатого возраста KHR свидетельствует тест складки на уровне всех средних по обнажениям направлений. Корреляционный тест, в модификации [Enkin, 2003], положительный DS Slope: 117.55 ± 44.32 %. Симуляционный параметрический тест, по [Watson, Enkin, 1993], также показывает, что кучность распределения векторов достигает максимума в древней системе координат, оптимальным является 115.2 ± 19.6 % распрямления складки (см. рис. 7, в). Очень важно, что KHR выделена не только как единственная регулярная, в том числе характеристическая компонента, но и вместе с KRS непосредственно в одних и тех же образцах. Этот факт ограничивает возможные спекуляции вокруг природы обеих компонент и вполне однозначно указывает на необычную конфигурацию геомагнитного поля, наличие минимум двух источников первичного намагничивания пород.

Направления, соответствующие KHR для чистяковской и мошакской свит из обнажения ск. Гребень, также были зафиксированы ранее [Shatsillo et al., 2006]. Из-за небольшой статистики, средне-температурного интервала деблокирования, близости установленных направлений компоненте в выше-лежащей островной свите кембрия и кембрийскому интервалу ТКДП Сибири она была проинтерпретирована как метакронная, а соответствующий полюс (GR) рассчитан как среднее по выборке из всех трех разновозрастных свит (см. табл. 3).

Координаты наблюдаемого среднего палеомагнитного полюса KHR, согласно полученным данным, при условии обратной полярности геомагнитного поля точно соответствуют известным полюсам австралийско-антарктической группы (см. рис. 8). Важной отличительной особенностью KHR является ее монополярность. При этом распределение VGP, соответствующих каждому обнажению, заметно более кучное по сравнению с KRS — 57.9/41.6. Оба этих факта указывают на стабильное состояние источника намагничивания и не согласуются с переменным, часто инвертирующим полем, записанным в KRS.

Таким образом, разрез тасеевской серии является одним из редких примеров, в которых доказано сосуществование KHR и KRS. Временной отрезок, в котором обнаружено такое необычное состояние геомагнитного поля, не выходит за пределы чистяковского и мошакского времени (~ 580—540 млн лет). Полученные данные указывают, что до (алешинская свита) и после (редколесная свита) этого эпизода конфигурация геомагнитного поля описывается полюсами KRS. Соответственно упомянутая ранее гипотеза преобладающего монополярного дипольного поля KHR с относительно кратковременными эпохами близэкваториального диполя KRS [Павлов и др., 2004, 2018] не находит подтверждения. Напротив, согласно полученным данным, режим биполярного KRS является преобладающим, а появление на его фоне монополярного KHR является определенной аномалией.

Полученные в последнее время данные о палеонапряженности свидетельствуют о снижении виртуального дипольного момента в обозначенном интервале фиксации KHR почти на порядок [Bono et al., 2019; Shcherbakova et al., 2020; Метелкин и др., 2022]. Фиксируемый для этого времени преобладающий инверсионный режим, в том числе факты ультрачастых инверсий [Шацилло и др., 2015; Левашова и др., 2021], косвенно подтверждают «обычный» дипольный характер KRS. Поэтому в рамках нашей гипотезы намагниченность KRS отождествляется с полем ЦОД и, соответственно, координаты вычисленного палеомагнитного полюса (см. табл. 3) можно принять для расчета палеогеографического положения Сибирского кратона в тасеевское время (в среднем около 570 млн л. н.), что хорошо вписывается в соответствующий интервал траектории кажущегося движения полюса Сибири по [Метелкин и др., 2012]. Согласно этим расчетам, палеоконтинент находился в тропических широтах Южного полушария и обращен современной западной окраиной параллельно экватору, палеогеографическое положение Тасеевского палеобассейна 11.4° ю.ш.

Появление KHR компоненты мы связываем с влиянием расположенного поблизости недипольного (аномалийного) источника в период максимального снижения виртуального дипольного момента. Этим, в частности, объясняется монополярный характер намагничивания. В пользу такой модели свидетельствуют также новые палеомагнитные данные для рубежа эдиакария—кембрия Оленекского поднятия [Метелкин и др., 2022]. Согласно выдвигаемой гипотезе, в качестве источника KHR намагничивания могли быть мировые магнитные аномалии, в частности Антарктическая, если предположить ее стационарное положение последние ~ 600 млн лет [Метелкин и др., 2022]. Следуя этой модели, за центр фактического намагничивания KHR принимается не дипольный магнитный полюс (=Южный географический полюс, согласно гипотезе ЦОД), а точка с координатами 65° ю.ш., 135° в.д. Для корректировки наблюдаемого аномалийного полюса KHR к модели ЦОД используется эйлеров поворот (100° по часовой стрелке вокруг 74° с.ш., 276° в.д.), необходимый для совпадения указанного центра фактического намагничивания KHR с дипольным магнитным полюсом. После проведения такой процедуры, координаты повернутого полюса KHR — 28.5° ю.ш., 73.2° в.д. в пределах ошибки определения совпадают с полюсом KRS, что подтверждает выдвинутую аномалийную гипотезу фиксации KHR.

Таким образом, KHR компонента в чистяковской и мошакской свитах по своей природе также является первичной ориентационной, но связана со стационарным аномалийным источником, и рассчитанный палеополюс не соответствует модели ЦОД, т. е. не может быть использован для палеотектонических построений без соответствующих корректировок на положение самой аномалии. При этом мы предполагаем, что KHR является результирующей компонентой, суммирующей влияние не только аномалийного, но и слабого дипольного поля, тем не менее вклад аномалийной составляющей представляется определяющим. Одновременную запись KHR и KRS в чистяковской и мошакской свитах, вероятно, следует объяснять крайней нестабильностью главного дипольного поля в этом интервале. Быстрые чередования ультракратких периодов снижения дипольной составляющей до величин, сопоставимых и ниже аномалийного поля, обеспечили такую возможность и наилучшим образом это сохраняется в терригенных породах в силу ориентационного механизма их намагничивания.

Авторы признательны чл.-корр. А.Н. Диденко и д.г.-м.н. А.Ю. Казанскому за обсуждение представленных материалов, ценные замечания и комментарии, позволившие улучшить доказательную базу настоящей статьи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-17-00091-П; геолого-структурный анализ и проект 21-17-00052; экспериментальные палеомагнитные исследования).

ЛИТЕРАТУРА

Антипова О.А., Пошибаев В.В. Абсолютный возраст отложений тасеевской серии в зоне Ангарских складок // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика). Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов. М., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2017, с. 4.

Брагин С.С. Использование палеомагнитных данных для решения некоторых вопросов геологии позднего рифея Присаянья // Стратиграфия позднего докембрия и раннего палеозоя Сибири. Венд и рифей. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1985, с. 57—64.

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Даценко В.М., Сальникова Е.Б., Яснев А.М., Котов А.Б., Травин А.В. О проявлении раннепалеозойского магматизма в Южно-Енисейском кряже // ДАН, 2004, т. 397, № 3, с. 374—379.

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Травин А.В., Вингейт М.Т.Д. Лейкогранитный магматизм А-типа в эволюции континентальной коры западного обрамления Сибирского кратона // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (1), с. 5—21.

Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Черных А.И. Позднепротерозойская эволюция офиолитовых и островодужных комплексов западного обрамления Енисейского кряжа // Геологическое развитие протерозойских перикратонных и палеоокеанических структур Северной Евразии: материалы совещания. СПб, Тема, 1999, с. 17—19.

Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю., Метелкин Д.В., Советов Ю.К. Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница Сибирского кратона в неопротерозое: геолого-структурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (4), с. 502—519.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист О-46 — Красноярск. Объяснительная записка / Ред. Ю.С. Глухов. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009, 500 с.

Григорьев В.Н. Кембрийские молассовые формации западной окраины Сибирской платформы и ее обрамления // Вулканогенно-осадочные и терригенные формации / Ред. И.В. Хворов. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 374—386.

Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Василевский А.Н. Характерные свойства магнитного и гравитационного полей Земли, взаимосвязанные с глобальной и региональной тектоникой // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (1), с. 10—30, doi: 10.15372/GiG2020181.

Зуева О.А. Реконструкция условий формирования и прогноз зон развития пород-коллекторов отложений мошакской свиты венда в пределах зоны Ангарских складок: Автореф. дис.... к. г.-м. н. М., 2021, 25 с.

Казанский А.Ю. Эволюция структур западного обрамления Сибирской платформы по палеомагнитным данным: Автореф. дис.... д. г.-м. н. Новосибирск, 2002, 40 с.

Кочнев Б.Б., Карлова Г.А. Новые данные по биостратиграфии немакит-далдынского яруса венда юга Сибирской платформы // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2010, т. 18, № 5, с. 28—41.

Кочнев Б.Б., Прошенкин А.И., Покровский Б.Г., Летникова Е.Ф. Тасеевская серия венда юго-западной окраины Сибирской платформы: изотопно-геохимические и геохронологические данные, возраст и корреляция // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (10), с. 1370—1385, doi: 10.15372/GiG2019142.

Левашова Н.М., Голованова И.В., Рудько Д.В., Данукалов К.Н., Рудько С.В., Сальманова Р.Ю., Сергеева Н.Д. Период гиперактивности магнитного поля в конце эдиакария: оценка частоты инверсий циклостратиграфическим методом // Физика Земли, 2021, № 2, с. 119—129, doi: 10.31857/S0002333721020022.

Мельников Н.В., Якшин М.С., Шишкин Б.Б., Ефимов А.О., Карлова Г.А., Килина Л.И., Константинова Л.Н., Кочнев Б.Б., Краевский Б.Г., Мельников П.Н., Наговицин К.Е., Постников А.А., Рябкова Л.В., Терлеев А.А., Хабаров Е.М. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2005, 428 с.

Мельников Н.В., Смирнов Е.В., Худорожков В.Г., Носкова Е.С. Особенности геологического строения Нижнеангарского самостоятельного нефтегазоносного района // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2012, т. 12, № 4, с. 46—53.

Метелкин Д.В. Кинематическая реконструкция раннекаледонской аккреции на юго-западе Сибирского палеоконтинента по результатам анализа палеомагнитных данных // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (4), с. 500—522.

Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Белоносков И.В. Сибирский кратон в структуре суперконтинента Родиния: анализ палеомагнитных данных // ДАН, 2005, т. 404, № 3, с. 389—394.

Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. Неопротерозойский этап эволюции Родинии в свете новых палеомагнитных данных по западной окраине Сибирского кратона // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (1), с. 42—59.

Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (7), с. 883—899.

Метелкин Д.В., Виноградов Е.В., Щербакова В.В., Верниковский В.А., Захаров С.М., Наговицин К.Е. К проблеме палеогеографических реконструкций и структуры геомагнитного поля на границе докембрия—палеозоя на примере новых палеомагнитных данных по Оленекскому поднятию (Сибирский кратон) // ДАН, 2022, т. 506, № 2, с. 135—141, doi: 10.31857/S2686739722600990.

Павлов В.Э. Палеомагнетизм Сибирской платформы: Автореф. дис.... д. ф.-м. н. М., 2015, 59 с.

Павлов В.Э., Петров П.Ю. Палеомагнетизм рифейских отложений Иркинеевского поднятия Енисейского кряжа — новый довод в пользу единства Сибирской платформы в среднем рифее // Физика Земли, 1997, № 6, с. 42—55.

Павлов В.Э., Галле И., Шацлло А.В., Водовозов В.Ю. Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р. Лена — новые ограничения на кривую кажущейся миграции полюса Сибирской платформы и аномальное поведение геомагнитного поля в начале фанерозоя // Физика Земли, 2004, № 2, с. 28—49.

Павлов В.Э., Пасенко А.М., Шацлло А.В., Паверман В.И., Щербакова В.В., Малышев С.В. Систематика палеомагнитных направлений раннего кембрия северных и восточных районов Сибирской платформы и проблема аномального геомагнитного поля вблизи границы протерозоя и фанерозоя // Физика Земли, 2018, № 5, с. 122—146, doi: 10.1134/S0002333718050113.

Пятилетов В.Г., Карлова Г.А. Микрофитологическая характеристика чистяковской свиты тасеевской серии Енисейского кряжа // Стратиграфия позднего докембрия и раннего палеозоя Средней Сибири. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1983, с. 95—99.

Семихатов М.А. Рифей и нижний кембрий Енисейского кряжа. М., Изд-во АН СССР, 1962, 242 с.

Советов Ю.К. Верхнедокембрийские песчаники юго-запада Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 1977, 295 с.

Советов Ю.К. Тиллиты вблизи основания стратотипического разреза тасеевской серии венда (Сибирская платформа) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (11), с. 1934—1944, doi: 10.15372/GiG20151102.

Советов Ю.К. Седиментология и стратиграфическая корреляция вендских отложений на юго-западе Сибирской платформы: выдающийся вклад внешнего источника кластического материала в образование осадочных систем // Литосфера, 2018, т. 18, № 1, с. 20—45, doi: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-020-045.

Советов Ю.К., Благовидов В.В. Реконструкция бассейна осадконакопления (на примере вендского передового прогиба — «форландового бассейна» юго-запада Сибирской платформы) // Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция. М., Научный мир, 2004, с. 159—212.

Советов Ю.К., Акульшина Е.П., Ивановская А.В., Писарева Г.М. Строение разреза, состав и условия накопления отложений юдомского комплекса на юго-востоке Енисейского кряжа // Литолого-геохимические исследования палеозойских и докембрийских отложений Сибири. Новосибирск, Наука, 1975, с. 82—103.

Хоментовский В.В., Шенфильд В.Ю., Якшин М.С., Бутаков Е.П. Опорные разрезы отложений верхнего докембрия и нижнего кембрия Сибирской платформы. М., Наука, 1972, 356 с.

Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.П. Палеомагнитология. Л., Недра, 1982, 312 с.

Шацлло А.В. Палеомагнетизм венда юга Сибирской платформы и некоторые аспекты позднедокембрийской геодинамики: Автореф. дис.... д. г.-м. н. М., ОИФЗ РАН, 2006, 31 с.

Шацлло А.В., Кузнецов Н.Б., Павлов В.Э., Федонкин М.А., Прияткина Н.С., Серов С.Г., Рудько С.В. Первые магнитостратиграфические данные о стратотипе лопатинской свиты (северо-восток

Енисейского кряжа): проблемы ее возраста и палеогеографии Сибирской платформы на рубеже протерозоя и фанерозоя // ДАН, 2015, т. 465, № 4, с. 464—468, doi: 10.7868/S0869565215340228.

Шацилло А.В., Рудько С.В., Латышева И.В., Рудько Д.В., Федюкин И.В., Малышев С.В. Палеомагнитные, седиментологические и изотопные данные по неопротерозойским перигляциальным отложениям Сибири: новый взгляд на проблему низкоширотных оледенений // Физика Земли, 2019, № 6, с. 34—58, doi: 10.31857/S0002-33372019634-58.

Шацилло А.В., Рудько С.В., Латышева И.В., Рудько Д.В., Федюкин И.В., Паверман В.И., Кузнецов Н.Б. Гипотеза «блуждающего экваториального диполя»: к проблеме низкоширотных оледенений и конфигурации геомагнитного поля позднего докембрия // Физика Земли, 2020, № 6, с. 113—134, doi: 10.31857/S0002333720060083.

Abrajevitch A., Van der Voo R. Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis // Earth Planet. Sci. Lett., 2010, v. 293 (1—2), p. 164—170, doi: 10.1016/j.epsl.2010.02.038.

Biggin A.J., Steinberger B., Aubert J., Suttie N., Holme R., Torsvik T.H., van der Meer D.G., van Hinsbergen D.J.J. Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes // Nat. Geosci., 2012, v. 5 (8), p. 526—533, doi: 10.1038/NNGEO1521.

Bono R.K., Tarduno J.A., Nimmo F., Cottrell R.D. Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity // Nat. Geosci., 2019, v. 12, p. 143—147, doi: 10.1038/s41561-018-0288-0.

Enkin R.J. The direction-correction tilt test: An all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies // Earth Planet. Sci. Lett., 2003, v. 212, p. 151—166, doi: 10.1016/S0012-821X(03)00238-3.

Grotzinger J.P., Fike D.A., Fischer W.W. Enigmatic origin of the largest-known carbon isotope excursion in Earth's history // Nat. Geosci., 2011, v. 4, p. 285—292, doi: 10.1038/ngeo1138.

Kirschvink J.L., Rozanov A.Yu. Magnetostratigraphy of lower Cambrian strata from the Siberian Platform: a palaeomagnetic pole and a preliminary polarity time-scale // Geol. Mag., 1984, v. 121 (3), p. 189—203, doi: 10.1017/S0016756800028259.

Kirschvink J.L., Ripperdan R.L., Evans D.A. Evidence for a large-scale reorganization of early Cambrian continental masses by inertial interchange True Polar Wander // Science, 1997, v. 277, p. 541—545, doi: 10.1126/science.277.5325.541.

Liu A.G., Brasier M.D., Bogolepova O.K., Raevskaya E.G., Gubanov A.P. First report of a newly discovered Ediacaran biota from the Irkineeva Uplift, East Siberia // Newsl. Stratigr., 2013, v. 46, p. 95—110, doi: 10.1127/0078-0421/2013/0031.

McElhinny M. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism // Geophys. J. Int., 1964, v. 8 (3), p. 338—340, doi: 10.1111/j.1365-246X.1964.tb06300.x.

McFadden P.L., McElhinny M.W. The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in palaeomagnetism // Earth Planet. Sci. Lett., 1988, v. 87, p. 161—172, doi: 10.1016/0012-821X(88)90072-6.

McFadden P.L., McElhinny M. Classification of the reversal test in palaeomagnetism // Geophys. J. Int., 1990, v. 103 (3), p. 725—729, doi: 10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x.

Meert J.G. A paleomagnetic analysis of Cambrian true polar wander // Earth Planet. Sci. Lett., 1999, v. 168, p. 131—144, doi: 10.1016/S0012-821X(99)00042-4.

Nagata T. Rock magnetism. Tokyo, Maruzen Company LTD., 1961, 350 p.

Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A.K., Letnikova E.F., Huang H.-Q. The Neoproterozoic evolution of the western Siberian Craton margin: U-Pb-Hf isotopic records of detrital zircons from the Yenisey Ridge and the Prisayan Uplift // Precambrian Res., 2018, v. 305, p. 197—217, doi: 10.1016/j.precamres.2017.12.014.

Shatsillo A.V., Didenko A.N., Pavlov V.E. Two competing Paleomagnetic directions in the Late Vendian: New data for the SW Region of the Siberian Platform // Russ. J. Earth Sci., 2005, v. 7, ES4002, doi: 10.2205/2004ES000169.

Shatsillo A.V., Pavlov V.E., Didenko A.N. Paleomagnetism of Vendian rocks in the southwest of the Siberian Platform // Russ. J. Earth Sci., 2006, v. 7, ES3006, doi: 10.2205/2005ES000192.

Shcherbakova V.V., Bakhmutov V.G., Thallner D., Shcherbakov V.P., Zhidkov G.V., Biggin A.J. Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran // Geophys. J. Int., 2020, v. 220 (3), p. 1928—1946, doi: 10.1093/gji/ggz566.

Tauxe L. Essentials of paleomagnetism. Univ. Calif. Press, Berkeley, CA, 2010, 512 p.

Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J. et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth Planets Space, 2015, v. 67, 79, doi: 10.1186/s40623-015-0228-9.

Torsvik T.H., Meert J.G., Smethurst M.A. Polar wander and the Cambrian // Science, 1998, v. 279, p. 9a—9e, doi: 10.1126/science.279.5347.9.

Watson G.S., Enkin R.J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem // *Geophys. Res. Lett.*, 1993, v. 20, p. 2135—2137, doi: 10.1029/93GL01901.

Xiao S., Narbonne G.M., Zhou C., Laflamme M., Grazhdankin D.V., Moczydlovska-Vidal M., Cui H. Towards an Ediacaran Time Scale: problems, protocols, and prospects // *Episodes*, 2016, v. 39 (4), p. 540—555, doi: 10.18814/EPIIUGS/2016/V39I4/103886.