

УДК 550.384;551.8

ГИПОТЕЗА “БЛУЖДАЮЩЕГО ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ДИПОЛЯ”: К ПРОБЛЕМЕ НИЗКОШИРОТНЫХ ОЛЕДЕНЕНИЙ И КОНФИГУРАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОЗДНЕГО ДОКЕМБРИЯ

© 2020 г. А. В. Шацилло^{1, *}, С. В. Рудько^{2, 3}, И. В. Латышева², Д. В. Рудько¹,
И. В. Федюкин¹, В. И. Паверман^{1, 4}, Н. Б. Кузнецов²

¹Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, г. Москва, Россия

²Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

³Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт Земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

*E-mail: shatsillo@gmail.com

Поступила в редакцию 09.01.2020 г.

После доработки 28.04.2020 г.

Принята к публикации 29.04.2020 г.

Выполнен анализ палеомагнитных данных для поздненеопротерозойских комплексов Сибири и Австралии. Показано, что имеющиеся наборы палеомагнитных данных плохо согласуются с представлениями об аксиально-дипольной конфигурации геомагнитного поля позднего неопротерозоя, а предложенные неактуалистические модели поля также не дают удовлетворительного объяснения распределению палеомагнитных полюсов. Анализ распределения палеомагнитных и виртуальных геомагнитных полюсов с использованием простых геометрических построений позволяет предполагать, что конфигурация геомагнитного поля позднего неопротерозоя определялась совместным существованием слабого долгоживущего источника, имевшего стабильное положение в пространстве, и основного дипольного источника, испытывавшего несистематические разнонаправленные скачки в некоторой предпочтительной области земного шара. С использованием палеоклиматических индикаторов обосновывается преимущественно экваториальная ориентировка основного дипольного источника. Предложена “описательная” неактуалистическая модель геомагнитного поля позднего неопротерозоя – гипотеза “Блуждающего Экваториального Диполя”, позволяющая привести в согласие палеомагнитные и палеоклиматические данные.

Ключевые слова: палеомагнетизм, реконструкции, неопротерозой, оледенения, экваториальный геомагнитный диполь, истинное смещение полюса, гипотеза Snowball Earth.

DOI: 10.31857/S0002333720060083

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением работы [Шацилло и др., 2019], в рамках которой были представлены первые палеомагнитные данные, свидетельствующие о приэкваториальном положении Сибири во время неопротерозойского оледенения. Седиментологические, петромагнитные и геохимические данные, характеризующие обстановку накопления изученных перигляциальных отложений [Шацилло и др., 2019], в противовес палеомагнитным результатам, указывали на положение региона в поясе с контрастными сезонными колебаниями температур (т.е. вне экваториального пояса). Отмеченное противоречие палеомагнитных и палеоклиматических данных не может быть объяснено в рамках широко обсуждаемой гипотезы тотальных оледенений “Snowball Earth” [Kirschvink, 1992; Hoffman, Schrag, 2002] и с

новой остротой ставит вопрос о конфигурации геомагнитного поля неопротерозойского времени.

Проблема в интерпретации наборов палеомагнитных данных для неопротерозоя – раннего кембрия (подробнее см. в работе [Шацилло и др., 2019 и ссылки в этой работе]) уже неоднократно обсуждалась в литературе, в частности, в контексте гипотезы аномального поведения геомагнитного поля [Павлов и др., 2004; 2018; Shatsillo et al., 2005; Abrajevitch, Van der Voo, 2010]. Результаты, приведенные в работе [Шацилло и др., 2019], явились очередным указанием на несоответствие геомагнитного поля неопротерозойского времени актуалистической модели (модели Центрального Осевого Диполя), а полученные палеомагнитные направления были интерпретированы как результат значительного (возможно преобладающего) вклада низкоширотной неаксиально-дипольной

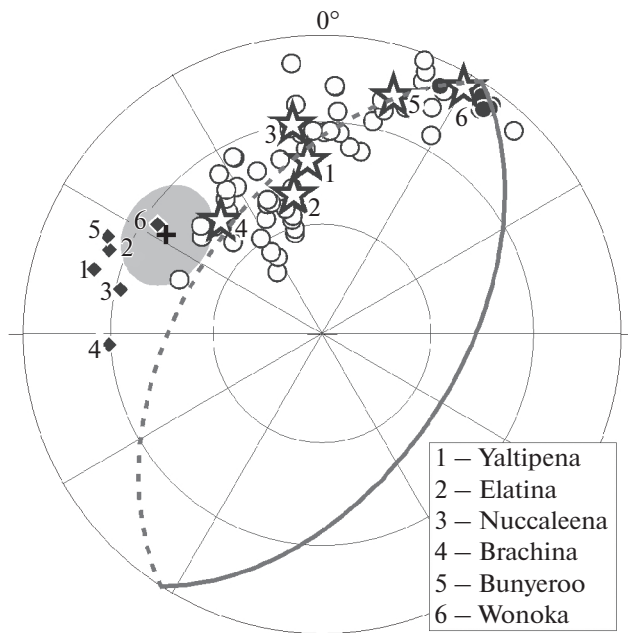


Рис. 1. Осредненные палеомагнитные полюсы и единичные направления для эдиакарской последовательности бассейна Аделаида (Австралия): звездочки — осредненные полюсы для каждой формации; кружки — единичные направления; ромбики — нормали к большому кругу, аппроксимирующим единичные направления для каждой формации; крестик и соответствующий ему овал (доверия) — нормаль к большому кругу (черная сплошная/пунктирная линия), аппроксимирующему осредненные полюсы по формациям. Открытые значки — южное полушарие, заштрихованные значки — северное полушарие. В легенде на врезке нумерация формаций снизу вверх по разрезу.

составляющей. Заключение о неаксиально-дипольной конфигурации геомагнитного поля неопротерозоя имеет “тяжелые” последствия для палеогеографических приложений палеомагнетизма и требует как получения новых палеомагнитных данных о структуре поля, так и разработки модели неопротерозойского поля, которая позволила бы адекватно интерпретировать имеющиеся наборы палеомагнитных данных.

На примере Сибири и Австралии мы провели анализ наборов неопротерозойских палеомагнитных данных и предприняли попытку их объяснения в рамках описательной “геометрической” модели поля, позволяющей, в первом приближении, увязать эти данные между собой и согласовать их с индикаторами палеоклимата.

АНАЛИЗ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

Австралия

Из мировых неопротерозойских разрезов осадочные последовательности юга Австралии наиболее полно охарактеризованы палеомагнитными

данными, что позволяет проследить характер миграции палеомагнитного полюса этого континента в масштабах неопротерозоя с относительной детальностью. Отметим, что именно австралийские палеомагнитные определения послужили “фундаментом” для гипотезы тотальных оледенений в современном ее понимании [Kirschvink, 1992; Hoffman, Schrag, 2002]. На рис. 1 представлены палеомагнитные полюсы по неопротерозойской осадочной последовательности бассейна Аделаида (формации Yaltipena, Elatina, Nuccaleena, Brachina, Bunyeroo, Wonoka [Sohl et al., 1999; Embleton, Williams, 1986; Schmidt, Williams, 1995; 1996; 2010; Schmidt et al., 2009]), соответствующие интервалу ~640–560 млн лет. Все эти палеомагнитные данные указывают на приэкваториальное положение Австралии в неопротерозое (рис. 2). Примечательно, что для формации Elatina, содержащей ледниковые отложения, установлены самые низкие “палеомагнитные” широты. Смещение неопротерозойских палеомагнитных полюсов Австралии описывается сложным возвратно-поступательным движением, предполагающим разнонаправленное масштабное вращение континента в рассматриваемое время (рис. 1, рис. 2), при этом распределение полюсов хорошо аппроксимируется дугой большого круга. Распределение единичных палеомагнитных направлений (по отдельным обнажениям или стратиграфическим уровням) для каждой формации подчинено единой системе — нормали к соответствующим большим кругам, хотя и определяются иногда с большой ошибкой (A95 от 12° до 39°), локализованы в одной области (рис. 1).

До последнего времени низкоширотное положение Австралии в неопротерозое, обоснованное палеомагнитными результатами по бассейну Аделаида, а также данными по скважинам бассейна Офицер [Pisarevsky et al., 2001; 2007], не вызывало сомнений, хотя и являлось нонсенсом по отношению к палеоклиматическим индикаторам — ледниковым отложениям, присутствующим в Австралии на нескольких уровнях неопротерозоя [Hill et al., 2011 и ссылки в этой работе]. Решением этого парадокса стало привлечение “экстремальной” палеоклиматической модели, предполагающей возможность длительного существования ледниковых шапок на экваторе [Kirschvink, 1992; Hoffman, Schrag, 2002]. Однако недавно по эдиакарской [Lan, Chen, 2012] формации Ranford¹, распространенной в штате Северо-Западные Территории (Кимберли), были получены палеомагнитные данные [Abrajevitch et al., 2018], вступающие в противоречие с палеомагнитными определениями по бассейнам Аделаида и Офицер. В противосто-

¹ Формация Ranford коррелируется с формацией Brachina Аделаидского бассейна [Lan, Chen, 2012 и ссылки в этой работе].

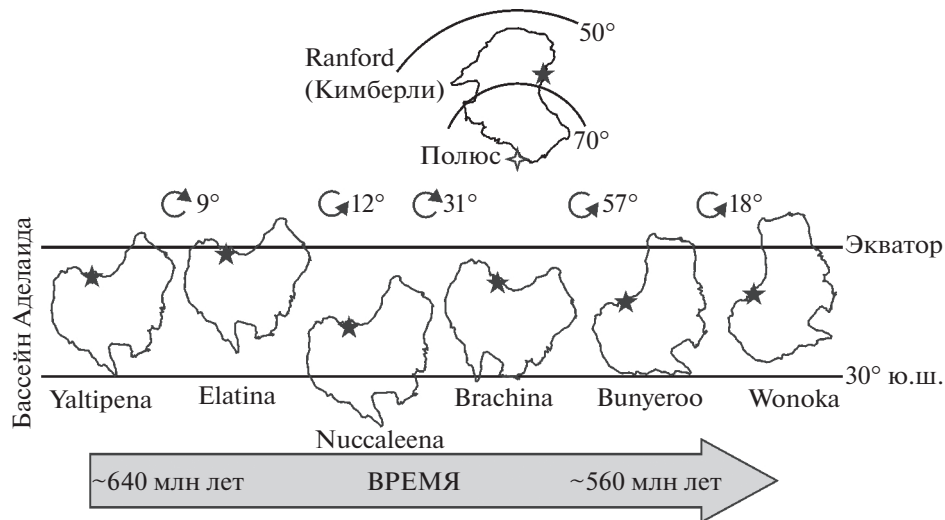


Рис. 2. Палеогеографическое положение Австралии в эдиакарии в соответствии с палеомагнитными данными по бассейну Аделаида и Кимберли: круговые стрелки и соответствующие им цифры – направление вращения и угол поворота референтной точки (звездочка) относительно меридиана. Контур Австралии современный, прочие пояснения в тексте.

вес имевшимся палеомагнитным определениям, результаты по Кимберли указывают на высокоширотное положение Австралии в неопротерозое (рис. 2). Такая палеогеографическая позиция не предполагает принципиальных отличий ледниковых эпох неопротерозоя от происходивших в недавнем геологическом прошлом и в фанерозое ([Чумаков, 2015 и ссылки в этой работе]). Как отмечается в работе [Abrajevitch et al., 2018], палеомагнитный полюс формации Ranford отличается от известных фанерозойских направлений Австралии [McElhinny et al., 2003], что свидетельствует в пользу древнего (допалеозойского) возраста намагниченности пород. Полюс формации Ranford не вписывается в общее распределение неопротерозойских полюсов бассейна Аделаида (рис. 1), а соответствующая разница в расчетных палеоширотах не может быть объяснена локальными тектоническими причинами.

Все обсуждаемые палеомагнитные направления бассейна Аделаида биполярны, однако только для формации Bunyeroo [Schmidt, Williams, 1996] тест обращения “положительный” (статистически незначимое отличие направлений прямой (N) и обратной (R) полярности от антиподальности). Для формации Nuccaleena [Schmidt et al., 2009] тест обращения не выполнен, данные по средним направлениям для N - и R -полярностей в статье не приводятся (отметим, что из всех обсуждаемых определений “табличные” данные по средним направлениям N - и R -полярностей приведены только для формации Elatina [Schmidt, Williams, 1995]). Для формации Elatina отмечается существенное отклонение направлений от антиподального – соответствующее угловое расстояние

между направлениями N - и R -полярностей составляет 32.5° , при его критическом значении 12.3° . Аналогичное отклонение от антиподальности ($30.9^\circ/15.2^\circ$ соответственно) установлено для формации Wonoka [Schmidt, Williams, 2010]. Имеются свидетельства того, что неантиподальность N - и R - направлений формации Elatina не является результатом раннепалеозойского перемагничивания, зафиксированного, в частности, в аналогах формации Brachina [Rajagopalan et al., 2011]. Соответствующие полюсы для N - и R -полярностей формации Elatina [Schmidt, Williams, 1995] и полюс раннепалеозойского перемагничивания [Rajagopalan et al., 2011] не лежат на дуге большого круга (рис. 3), что следовало бы ожидать в случае частичного перемагничивания пород. При этом полюсы N - и R -полярностей формации Elatina лежат в той же плоскости (на большом круге), что и остальные палеомагнитные направления бассейна Аделаида (рис. 3).

В работе [Abrajevitch et al., 2018] сделано предположение, что палеомагнитное направление формации Ranford (Кимберли) является записью поля во время кратковременного проявления экваториального диполя. Как отмечалось, распределение палеомагнитных полюсов бассейна Аделаида аппроксимируется дугой большого круга, близортогонального к полюсу Ranford (рис. 1, рис. 3), т.е. можно допустить, что экваториально-дипольная (в понимании авторов работы [Abrajevitch et al., 2018]) составляющая во время всего анализируемого интервала неопротерозоя имела направление, близкое к полюсу Ranford. При отсутствии свидетельств частичного перемагничивания пород вклад экваториального диполя в

Сибирь

Обоснование возраста толщ, охарактеризованных палеомагнитными данными

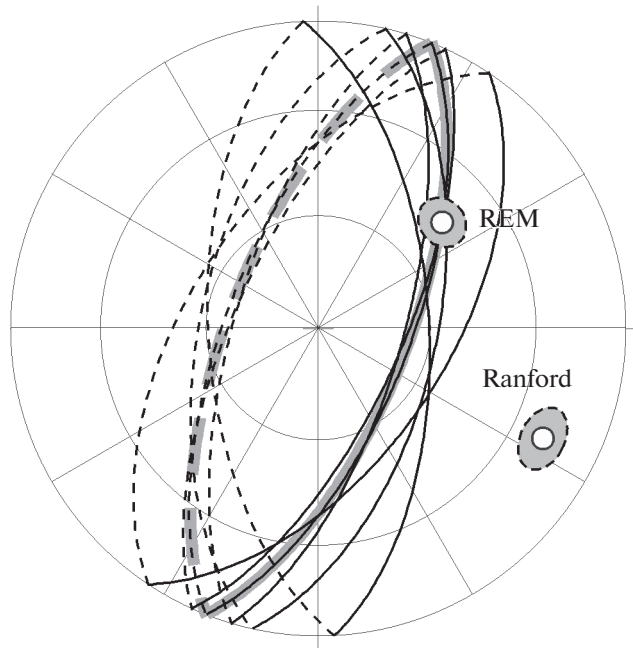


Рис. 3. Соотношение палеомагнитного полюса формации Ranford (Кимберли), полюса раннепалеозойского перемагничивания (REM) Аделаиды и больших кругов, аппроксимирующих распределение эдиакарских палеомагнитных направлений Аделаиды: открытые кружки и пунктирные линии – южное полушарие, сплошные линии – северное полушарие; жирная серая линия – большой круг, проведенный через направления *N*- и *R*-полярностей формации Elatina, остальные круги аппроксимируют распределение единичных направлений для каждой формации (пояснения в тексте).

главное геомагнитное поле рассматривается как причина неантиподальности палеомагнитных направлений [Храмов, 2007; Храмов, Иосифиди, 2012]. Т.е. следовало бы ожидать, что отклонение от антиподальности *N*- и *R*-направлений формации Elatina обусловлено вкладом направления Ranford или близким к нему. В этом случае все направления (Elatina-*R*, Elatina-*N* и Ranford) должны лежать на дуге большого круга. Проведенный анализ показывает, что это не соответствует действительности (рис. 3). Следовательно, отклонение от антиподальности палеомагнитных направлений бассейна Аделаида, равно как и характер разброса единичных направлений, не определяются вкладом направления Ranford, а, скорее, обусловлены иными неаксиальными источниками. На примере палеомагнитных данных по Австралии можно предположить, что геомагнитное поле неопротерозоя генерировалось альтернативными режимами геодинамо (аксиально-дипольным и экваториально-дипольным?), “переключение” между которыми было резким.

Обсуждаемые палеомагнитные определения² получены по разрезам юго-запада (Прибайкалье, Присяянье, Енисейский Кряж), северо-востока (Оленекское поднятие), юго-востока (Кыллахский хребет) и юга (западный склон Алданского щита) Сибирской платформы (табл. 1). Основной массив данных представляет позднеэдиакарский – раннекембрийский (немакит-далдынский) временной интервал. Осадочные последовательности юго-запада Сибирской платформы, отвечающие этому интервалу времени, характеризуются контрастным литологическим составом – преимущественно красноцветными кластическими отложениями в нижней части и терригенно-карбонатными отложениями с проявлениями солей и сульфатной минерализации в верхней части [Хоментовский и др., 1972]. Контрастный литологический состав пород позволяет коррелировать эти толщи на значительном расстоянии [Хоментовский и др., 1972; Sovetov et al., 2007; и др.] и условно разделить полученные по ним палеомагнитные определения (см. табл. 1) на две возрастные группы: 550–540 и 540–530 млн лет. Верхнее ограничение возраста (530 млн лет) определяется положением рассматриваемой осадочной последовательности ниже “трилобитовых” слоев кембрия [Кембрий..., 1992] и находками в ней ихнофоссилий и мелкораквиной фауны немакит-далдынского (фортуновского) яруса [Кочнев, Карлова, 2010; Кузнецов и др., 2017; Советов, 2018]. Нижним возрастным ограничением (550 млн лет) может служить средневзвешенное значение возраста (554 ± 12 млн лет) самой молодой популяции цирконов из ушаковской свиты [Гладкочуб и др., 2013], слагающей основание обсуждаемой секвенции в Прибайкалье, а также датировка (560 ± 30 млн лет) Pb–Pb изохронным методом подстилающих толщ байкальской серии [Kuznetsov et al., 2013], по которой также имеется палеомагнитное определение (улунтуйская свита – определение № 28 в табл. 1).

Спорное стратиграфическое положение [Кузнецов и др., 2018a] имеет лопатинская свита севера Енисейского Кряжа (таблица, определение № 21), традиционно рассматриваемая как основание чингасанской серии Тейско-Чапского прогиба [Хоментовский и др., 1972; и мн. др.]. В ряде работ [Хоментовский, 2014; Sovetov et al., 2007; Sovetov, Le Heron, 2016], на основании корреляции удаленных разрезов, отложения чингасанской серии относят к криогению. Однако магнитостратигра-

² “Старые” палеомагнитные определения, полученные с низкой интенсивностью и детальностью магнитных чисток, в работе не рассматриваются.

фические данные по лопатинской свите [Шацилло и др., 2015] в комплексе с находками арумбериеморфных отпечатков и “проблематичных” ихнофоссилий [Кузнецов и др., 2013; 2017], характерных для позднего эдиакария и раннего кембрия, указывают на позднеэдиакарский возраст (~550 млн лет) этой свиты. Принадлежность лопатинской свиты к терминальному докембрию подтверждается находками следов *Phycodes sp.* [Кузнецов и др., 2017] в подъемской свите чапской серии, которую мы, по результатам полевых наблюдений, сопоставляем с чингасанской серией р. Тея. На этом основании палеомагнитное определение по лопатинской свите включено в группу 550–540 млн лет.

Позднеэдиакарский (550–540 млн лет) возраст объектов северо-востока и юго-востока Сибирской платформы (туркутская и сарданинская = усть-юдомская свиты – определения № 23, 22) обоснован палеонтологическими находками, геохронологическими данными и хемотратиграфической корреляцией [Рогов и др., 2015; Семихатов и др., 2004; и ссылки в этих работах].

К более древним палеомагнитным определениям относятся результаты, полученные по ничатской свите западного склона Алданского щита, содержащей ледниковые отложения Среднесибирского гляциогоризонта (ССГ) [Чумаков, 2015]. Отложения ССГ имеют региональное распространение по югу Сибирской платформы: на западном склоне Алданского щита и на севере Патомского нагорья они слагают основание дальнетайгинской серии [Чумаков, 2015], в Прибайкалье залегают в основании байкальской серии [Шацилло и др., 2019б], а в пределах Присяяня – в основании оселковой серии [Советов, Комлев, 2005]. Критический анализ имеющейся стратиграфической информации, проведенный в работах [Рудько и др., 2017; Петров, 2018], показывает, что, вопреки традиционному [Чумаков, 2015] сопоставлению ССГ с глобальным оледенением “Марино”, завершающим криогений (~635 млн лет [Ogg et al., 2016]), возможно его отнесение к среднеэдиакарскому ледниковому событию “Гаскье” (~580 млн лет [Ogg et al., 2016]). Таким образом, возраст ничатской свиты определяется либо как ~635 млн лет, либо как ~580 млн лет.

Самое древнее палеомагнитное определение рассматриваемой выборки получено по вандадыкской свите р. Чапа (Тейско-Чапский прогиб, север Енисейского кряжа). По результатам наших полевых наблюдений, распространенные в бассейнах рек Чапа и Вороговка вандадыкская и перекрывающая ее чивидинская свиты, включаемые в чингасанскую серию, не соответствуют толщам, выделяемым в объеме этой серии на р. Тея, а представляют более древний “долопатинский” (см. выше) стратиграфический уровень. По данным датирования детритовых цирконов мак-

симальный возраст песчаников вандадыкской свиты р. Чапа оценивается в 728 ± 18 млн лет [Priyatkina et al., 2016, в этой работе вандадыкская свита именуется карьерной]. U–Pb возраст туфогенных цирконов из матрикса тиллитов чивидинской свиты на р. Вороговка (665 ± 10 млн лет [Кузнецов и др., 2018б]) свидетельствует, что эти ледниковые отложения соответствуют гляциопериоду “Стерт” – самому продолжительному оледенению неопротерозоя (~720–660 млн лет [Ogg et al., 2016]). Минимальный возраст детритовых цирконов (663 ± 13 млн лет [Priyatkina et al., 2016]) из песчаников чивидинской свиты р. Чапа согласуется с результатами по чивидинской свите р. Вороговка. Близкая оценка возраста (695 ± 20 млн лет) получена Rb–Sr изохронным методом по глинистым минералам вандадыкской и чивидинской свит р. Чапа [Покровский и др., 2012]. С учетом U–Pb определений, время накопления вандадыкской свиты ограничивается интервалом 728–665 млн лет, для соответствующего палеомагнитного полюса (№ 30 табл. 1) мы условно принимаем возраст ~700 млн лет³.

Спорные палеомагнитные определения и используемые поправки

Специального рассмотрения требует палеомагнитное определение [Pisarevsky et al., 2000] по Центральному Прибайкалью (истоки р. Лена), которое мы используем при интерпретации с некоторыми допущениями. Рассматриваемое определение получено по красноцветным терригенным породам, относимым [Хоментовский и др., 1972] к ушаковской свите или к более молодым уровням – мотской (куртунской) свите [Бухаров, Виниченко, 1964]. В соответствии с приведенными в предыдущем разделе ограничениями, возраст этих толщ укладывается в интервал 550–530 млн лет. Палеомагнитный полюс [Pisarevsky et al., 2000] резко отличается от всего набора сибирских неопротерозойских полюсов (табл. 1), равно как и от известных направлений фанерозоя. Отметим также, что “старое” палеомагнитное определение по этому объекту (см. определение 13–41 из работы [Палеомагнитные..., 1982]) существенно отличается от определения в работе [Pisarevsky et al., 2000], при этом находится в согласии с рядом других сибирских определений по позднему эдиакарию – раннему кембрию, полученных с примене-

³ В ряде работ [Чумаков, 2015 и ссылки в ней] приводятся обоснования того, что гляциопериод “Стерт” (в понимании авторов работы [Ogg et al., 2016]) представляет два дискретных оледенения – Стерт-I (или Рэпитен) и Стерт-II (или Стерт), разделенные продолжительным межледниковьем. Поскольку длительность оледенения “Стерт” в разрезах Енисейского кряжа пока не ясна, возраст “догляциальной” вандадыкской свиты может быть как ~700 млн лет, так и 728–720 млн лет.

нием современной методики. При геологической съемке региона [Бухаров, Виниченко, 1964] было установлено, что на участке, расположенном в непосредственной близости от места отбора проб [Pisarevsky et al., 2000], осадочные толщи кембрия находятся в запрокинутом залегании. Перечисленные обстоятельства и, в целом, интенсивная складчатость, характерная для всего Прибайкалья, позволяют предположить, что резкое отличие полюса [Pisarevsky et al., 2000] от других известных палеомагнитных направлений Сибири может быть обусловлено неверным толкованием последовательности напластования пород на изученном участке разреза. Исходя из среднего палеомагнитного направления [Pisarevsky et al., 2000] в древней и современной системах координат, мы вычислили простирание толщ и рассчитали соответствующие поправки на запрокинутое залегание. В результате скорректированный палеомагнитный полюс оказался согласованным с позднеэдиакарскими — немакит-далдынскими палеомагнитными полюсами и совпал с полюсом ушаковской свиты Южного Прибайкалья [Shatsillo et al., 2005] (угловое расстояние между этими полюсами составило $\sim 8^\circ$ против $\sim 63^\circ$ без корректировки). Мы полагаем, что такое совпадение неслучайно и используем соответствующую поправку на запрокинутое залегание при интерпретации палеомагнитного определения [Pisarevsky et al., 2000]. Очевидно, что для однозначного решения этого вопроса необходимо полное или частичное переизучение разреза р. Лена, опробованного [Pisarevsky et al., 2000] и проведение структурно-геологических исследований. Отметим, что исключение определения [Pisarevsky et al., 2000] из анализируемой выборки полюсов принципиально не влияет на результаты интерпретации.

В 2014 г. В.П. Родионовым были представлены палеомагнитные данные по усатовской свите р. Чая (Патомское нагорье). Возрастная привязка усатовской свиты обоснована палеонтологическими [Кочнев, Карлова, 2010] и соответствует переходным слоям от немакит-далдынского к томмотскому ярусу нижнего кембрия (т.е. близка к возрастной группе 540–530 млн лет). В породах усатовской свиты В.П. Родионовым были выделены разнонаправленные, в т. ч. биполярные компоненты намагниченности. Также им было отмечено, что в изученных обнажениях проявлена интенсивная локальная тектоника [Родионов, 2014]. Этот разрез ранее был независимо изучен В.А. Кравчинским с соавторами [Kravchinsky et al., 2001], а также В.Ю. Водозовым и А.Н. Диденко (данные остались не опубликованы). В интерпретации результатов лабораторных измерений коллекции В.Ю. Водозова и А.Н. Диденко принимали участие авторы настоящей статьи. Проведенный нами анализ структурных элементов показал, что породы усатовской свиты испытали неоднород-

ные или присдвиговые деформации. Это определяется тем, что породы свиты смяты в складки с наклонными шарнирами, что не исключает “блоковых” вращений толщ вокруг вертикальной оси. В этой связи мы считаем, что результаты по усатовской свите р. Чая (в таблице не приведены) можно использовать только для “палеоширотных” оценок района отбора проб. Палеомагнитные наклонения для всех выделенных в усатовской свите компонент намагниченности близки (от ~ 9 до 18° [Родионов, 2014]), что согласуется с наклоном ($\sim 12^\circ$), рассчитанным для района р. Чая из полюсов 530–540 млн лет “мадагаскарской” группы (см. следующий раздел).

Основной массив анализируемых полюсов получен по Ангаро-Анабарскому сегменту Сибирской платформы, исключение составляют определения по ничатской и сардандинской свитам (табл. 1), полученные по Алданскому сегменту. При анализе комбинированных данных для полюсов Алданского сегмента мы вводим тектоническую поправку на раскрытие Вилуйского рифта, как это предложено в работе [Pavlov et al., 2008].

Анализ палеомагнитных данных

Единичные направления и осредненные полюсы

Как уже отмечалось [Shatsillo et al., 2005; 2006], в распределении палеомагнитных полюсов Сибири для позднеэопротерозойско-раннекембрийского временного интервала наблюдается явная кластеризация (рис. 4, табл. 1). Вне зависимости от возраста пород, по которым получены палеомагнитные определения, полюсы располагаются в двух областях земного шара и соответствуют (по географической принадлежности) “мадагаскарской” и “австралийской” группам⁴. Палеомагнитные направления, отвечающие “мадагаскарской” группе, биполярны; “австралийская” группа характеризуется преимущественно монополярными направлениями (табл. 1). Исключением здесь являются: (1) определение по редколесной свите Енисейского Кряжа (№ 3 в табл. 1) и, возможно, (2) определение (№ 25 в табл. 1) по Центральному Прибайкалью, для которых отмечено присутствие компонент намагниченности разной полярности. Сравнение осредненных палеомагнитных полюсов для разных возрастных групп (540–530 и 550–540 млн лет) показывает, что “мадагаскарские” осредненные полюсы статистически не различаются, в то время как для “австралийских” полюсов различие значимо (рис. 4).

Ранее [Shatsillo et al., 2005; 2006; Павлов и др., 2004; 2018] высказывалось предположение, что

⁴ Применительно к единичным полюсам древнее 550 млн лет такое заключение мы сделать, естественно, не можем, однако очевидна их принадлежность к “мадагаскарской” группе.

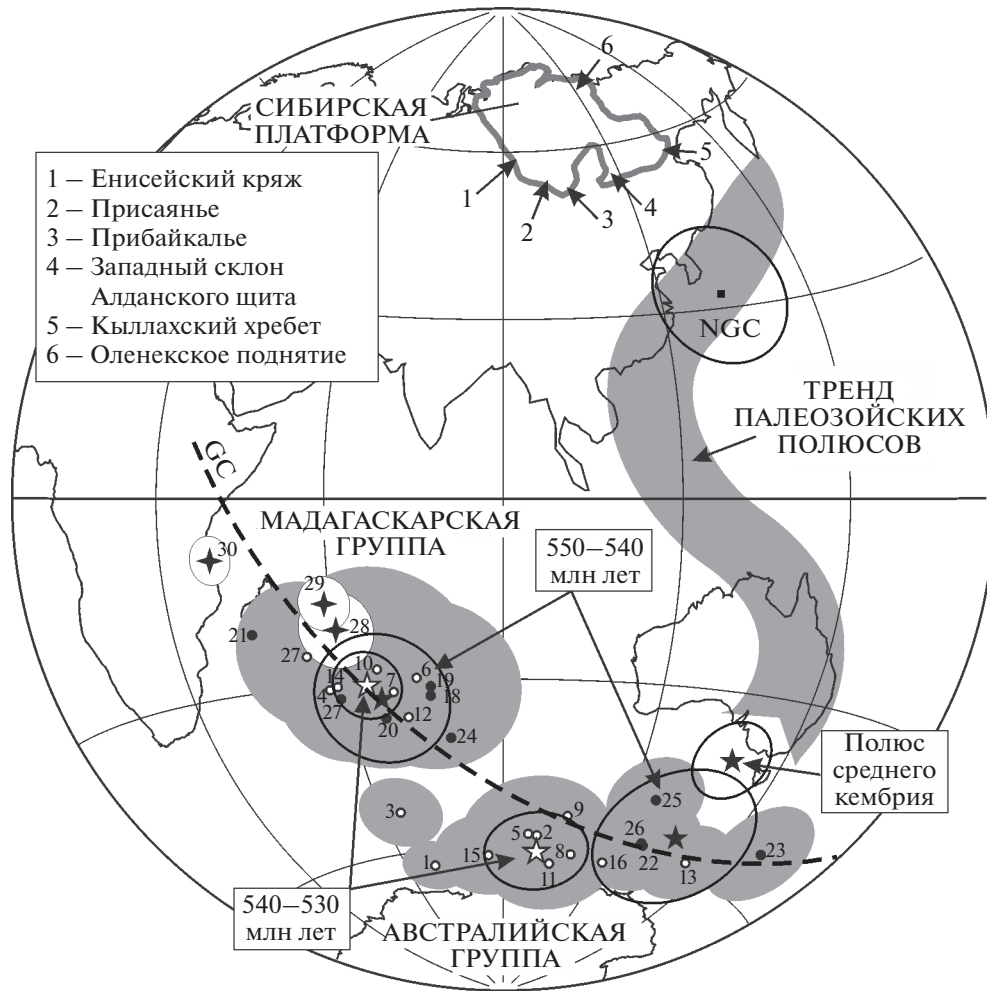


Рис. 4. Палеомагнитные полюсы позднего неопротерозоя – начала раннего кембрия Сибирской платформы: пятилучевые звездочки и соответствующие им овалы (доверия) – осредненные палеомагнитные полюсы; открытые кружки – единичные определения для возрастного интервала 540–530 млн лет; залитые кружки – единичные определения для возрастного интервала 550–540 млн лет; четырехлучевые звездочки – единичные определения древнее 550 млн лет; GC (пунктирная линия) – дуга большого круга аппроксимирующего распределения осредненных полюсов 540–530 и 550–540 млн лет и единичных определений древнее 550 млн лет; NGC – нормаль к большому кругу. Осредненный полюс для среднего кембрия из работы [Павлов и др., 2015]. Нумерация полюсов в соответствии с таблицей, прочие пояснения в тексте.

присутствие в породах эдиакария – раннего кембрия двух существенно различающихся палеомагнитных направлений (т.е. “мадагаскарской” и “австралийской” групп полюсов применительно к Сибири), сформировавшихся близко ко времени образования пород, может быть связано с особым режимом генерации геомагнитного поля. Палеомагнитная запись была интерпретирована в рамках гипотезы аномального “двухдипольного” геомагнитного поля, при котором аксиально-дипольный режим генерации (“австралийская” группа полюсов) чередовался с неаксиально-дипольным режимом (“мадагаскарская” группа полюсов). Принадлежность полюсов “австралийской” группы к аксиально-дипольному режиму

определялась их относительной близостью к полюсам раннего палеозоя [Shatsillo et al., 2005], из которых наиболее пространственно близким и хорошо статистически обоснованным является среднекембрийский полюс [Павлов и др., 2015 и ссылки в этой работе].

В контексте такой интерпретации сложное возвратно-поступательное смещение “австралийского” осредненного полюса в направлении на ЮЗ, а затем на СВ (к полюсу среднего кембрия, см. рис. 4), представляется странным, поскольку предполагает сложное разнонаправленное вращение Сибири за относительно короткий интервал времени. Допущение того, что “австралийские” полюсы позднего эдиакария частично

Таблица 1. Палеомагнитные полюсы позднего неопротерозоя—начала раннего кембрия Сибирской платформы

№	Регион	Свита	Группа/ полярность	n	LONG	LAT	A95	Источник
Возраст пород ~540–530 млн лет								
1	Енисейский Кряж, Гребень (58.2 95.0)	Редколесная	Aus/R	6(35)	68.9	-62.9	4.6	[Shatsillo et al., 2006]
2	Енисейский Кряж, Гребень (58.2 95.0)	Островная	Aus/R	10	99.2	-57.7	10.9	[Shatsillo et al., 2006]
3	Енисейский Кряж, Иркинеева (58.6 97.0)	Редколесная	Aus/NR	25	64.8	-52.6	6.2	[Shatsillo et al., 2006]
4	Енисейский Кряж, Чапа, Тея (~60.5 92.0)	Немчанская	Mad/NR	19	57.5	-30.7	7.0	[Шацилло и др., 2018]
5	Присаянье Бирюса, Тагул (55.5 97.7)	Усть-тагульская	Aus/R	21	96.8	-57.5	6.9	[Shatsillo et al., 2006]
6	Присаянье и Енисейский Кряж	Мотская/иркутская, усть-тагульская и островная (объединенные)	Mad/NR	11	74.1	-29.5	4.5	[Shatsillo et al., 2006]
7	Присаянье, Иркут (52.1 103.7)	Шаманская (мотская)	Mad/NR	40	69.5	-31.7	8.0	[Kravchinsky et al., 2001]
8	Присаянье, Иркут (52.1 103.7)	Мотская/иркутская	Aus/R	22	109.9	-60.8	6.4	[Shatsillo et al., 2005]
9	Присаянье, Ода (52.3 103.6)	Мотская/иркутская	Aus/R	8	106.2	-53.8	5.5	[Шацилло, 2006]
10	Присаянье, Ода (52.3 103.6)	Мотская/иркутская	Mad/NR	7	67.0	-27.8	16.9	[Шацилло, 2006]
11	Присаянье, Олха (52.1 104.1)	Иркутская	Aus/R	12	104.3	-62.9	9.1	[Shatsillo et al., 2005]
12	Присаянье, Олха (52.1 104.1)	Иркутская	Mad/R	11	71.6	-36.1	3.2	[Shatsillo et al., 2005]
13	Присаянье, Тойсуук (52.3 103.3)	Мотская/иркутская	Aus/R	23	143.6	-58.1	6.6	[Шацилло, 2006]
14	Присаянье, Тойсуук (52.3 103.3)	Мотская/иркутская	Mad/NR	23	59.1	-30.3	6.7	[Шацилло, 2006]
15	Присаянье, Урик (52.9 101.8)	Мотская/иркутская	Aus/R	14	85.7	-61.6	7.7	[Shatsillo et al., 2006]
16	Южное Прибайкалье (52.7 105.8)	Куртунская	Aus/R	21	120.2	-61.5	5.0	[Shatsillo et al., 2005]
17	Южное Прибайкалье (52.7 105.8)	Куртунская	Mad/NR	15	54.5	-25.3	12.0	[Shatsillo et al., 2005]
Возраст пород ~550–540 млн лет								
18	Енисейский Кряж, Гребень (58.2 95.0)	Чистяковская и мошакская	Mad/NR	28	76.4	-32.6	8.0	[Shatsillo et al., 2006]
19	Енисейский Кряж, Маньзя (58.5 96.2)	Чистяковская	Mad/NR	14	76.6	-31	14.4	[Shatsillo et al., 2006]
20	Енисейский Кряж, Тея (~60.8 92.6)	Подьемская	Mad/NR	26	67.2	-36.1	4.7	[Шацилло и др., 2018]
21	Енисейский Кряж, Тея (60.3 92.6)	Лопатинская	Mad/NR	33	45.2	-20.9	1.8	[Шацилло и др., 2015]
22	Кылахацкий хребет, Алдан (61.6 135.6)	Сарданинская	Aus/R	14	96.8	-56.5	8.5	[Павлов и др., 2018]
22	то же, с поправкой				128.8	-57.2	8.5	
23	Оленекское поднятие, Хорбусуонка (71.4 123.9)	Туртунская	Aus/R	12	160.8	-52.5	7.9	[Павлов и др., 2004]
24	Присаянье, Бирюса (55.5 97.8)	Айсинская	Mad/NR	43	79.5	-40.0	5.3	[Shatsillo et al., 2006]

Таблица 1. Продолжение

№	Регион	Свита	Группа/ полярность	n	LONG	LAT	A95	Источник
25	Центральное Прибайкалье, Лена (54 108)	Ушаковская	Aus/NR?	32	168.2	-2.7	7.4	[Pisarevsky et al., 2000]
25	То же, с поправкой				126.1	-49.2		[Pisarevsky et al., 2000]
26	Южное Прибайкалье (52.7 105.8)	Ушаковская	Aus/R	29	128.1	-56.9	4.5	[Shatsillo et al., 2005]
27	Южное Прибайкалье (52.7 105.8)	Ушаковская	Mad/N	16	59.2	-32.3	10.6	[Shatsillo et al., 2005]
28	Возраст пород ~560 млн.лет Центральное Прибайкалье, Елохин мыс (54.5 108.5)	Улунгуйская	Mad/R	46	60.6	-21.0	6.3	[Шацилло и др., 2006]
29	Возраст пород ~635/580? млн.лет Западный склон Алданского щита (58.0 118.2)	Ничатская	Mad/N	38/80	40.6	-8.1	4.4	[Шацилло и др., 2019]
29	То же, с поправкой				59.1	-16.7	4.4	
30	Возраст пород ~700 млн.лет Енисейский Кряж, Чапа (60.8 92.0)	Вандадская	Mad/NR	29	39.5	-9.2	3.7	[Шацилло и др., 2018]
Осредненные палеомагнитные полюсы								
31	Австралийская группа 540–530			10	99.6	-60.8	7.4	
32	Австралийская группа 550–540			4	136.0	-54.8	12.0	
33	Малагаскарская группа 540–530			7	64.6	-30.4	5.6	
34	Малагаскарская группа 550–540			6	66.9	-32.8	10.9	
35	Малагаскарская группа 550–530			13	65.6	-31.5	5.2	
Нормали к большим кругам								
36	Австралийская группа 550–530			14	104.7	29.7	17.9	
37	Малагаскарская группа 550–530			13	104.7	51.7	18.0	
38	Малагаскарская группа 700–560			3	114.0	59.6	7.7	
GP	№3, 30, 35			3	128.4	25.0	17.1	

Примечания: LONG/LAT – долгота/широга палеомагнитного полюса или нормали к большому кругу; A95 – радиус круга доверия на 95% уровне вероятности; n – количество образцов или сайтов, использованных в статистике; Mad/Aus – принадлежность полюсов к “малагаскарской”/“австралийской” группе; N/R – прямая/обратная полярность (за направления прямой полярности принимаются палеомагнитные полюсы, расположенные в Индийском океане); цифры в скобках в столбце “Регион” – географические координаты района в градусах (с.ш. в.д.). Нумерация палеомагнитных полюсов соответствует таковой на рисунках. GP – “географический полюс”, рассчитан по биполярным палеомагнитным определениям или группам. Прочие пояснения в тексте.

контаминированы полем среднего кембрия, маловероятно — соответствующие определения получены по удаленным регионам Сибири (Прибайкалье, Оленекское поднятие, Кыллахский хребет) с совершенно разной тектонической историей и разным литологическим составом пород, причем признаки среднекембрийского перемагничивания в этих регионах не установлены. В этой связи не менее странным выглядит совпадение “мадагаскарских” позднеэдиакарских и немакит-далдынских осредненных полюсов (рис. 4). В рамках “двухдипольной” модели поля [Павлов и др., 2004; Shatsillo et al., 2005; Abrajevitch, Van der Voo, 2010] наблюдаемые соотношения осредненных “австралийских” и “мадагаскарских” полюсов объяснить особенностями континентального дрейфа нельзя. Даже если допустить, что полюс вращения (полюс Эйлера), описывающий дрейф Сибири, располагался вблизи палеомагнитных полюсов “мадагаскарской” группы (что обеспечило бы их стабильное положение во времени), то, в этом случае, полюсы “австралийской” группы должны были лежать на дуге малого круга, ориентированной “поперек” существующего распределения единичных полюсов. Очевидно, что наблюдаемые распределения нельзя объяснить и локальными блоковыми вращениями, поскольку палеомагнитные направления, соответствующие “мадагаскарской” и “австралийской” группам, получены зачастую по одним и тем же разрезам (табл. 1). Таким образом, ни глобальной, ни региональной тектоникой особенности распределения полюсов “австралийской” и “мадагаскарской” групп не объясняются.

Распределения единичных полюсов “мадагаскарской” и “австралийской” групп имеют выраженную “банановую” форму, хорошо аппроксимирующуюся дугами больших кругов, нормали к которым располагаются в близкой географической области, но имеют значимое различие (рис. 5). В эту же систему симметрии вписываются нормали к большим кругам, проведенным через полюсы для N - и R -полярностей некоторых определений⁵ той и другой группы (рис. 5). Это позволяет предполагать, что как банановое распределение полюсов, так и отклонение от антиподальности N - и R -направлений могли быть обусловлены общей причиной.

Такой причиной мог быть “паразитный” вклад некоторого долгоживущего слабого источника, назовем его условно “третий слабый источник —

TLS” (Third Low Source), нарушавшего дипольную конфигурацию поля. В этом случае меньший разброс полюсов биполярной “мадагаскарской” группы (по отношению к преимущественно монополярной “австралийской”) может быть объяснен частичной компенсацией вклада TLS при обращении N - и R -направлений, а также более высокой напряженностью поля “мадагаскарского” главного источника по отношению к “австралийскому”. В первом приближении положение TLS можно оценить по пересечению больших кругов, аппроксимирующих распределение единичных полюсов “мадагаскарской” и “австралийской” групп (рис. 5). Более корректная оценка положения TLS может быть получена по пересечению больших кругов, проведенных через полюсы N - и R -полярностей со значительным отклонением от антиподальности, однако такие данные единичны и слабо статистически обоснованы.

В контексте влияния TLS на разброс палеомагнитных направлений заслуживает внимания зависимость между положением места отбора (сайта) и его палеомагнитного полюса относительно TLS, определяющаяся соотношением угловых расстояний (по дуге большого круга) между ними (TLS—сайт и TLS—полюс). Как видно (рис. 5, врезка), для полюсов “австралийской” группы, характеризующихся большим разбросом, устанавливается корреляция этих параметров. Единственное определение (№ 22), нарушающее эту зависимость, получено по наиболее удаленному от TLS объекту (к обсуждению этого определения мы вернемся ниже). Для остальных палеомагнитных определений “австралийской” группы, несмотря на их слабую статистическую обоснованность и соответствующие неточности в определении палеомагнитных направлений, коэффициент детерминации (R^2), составляет ~ 0.7 , что, в соответствии с классификацией Чеддера, говорит о том, что связь этих параметров высокая. Такая зависимость должна означать, что в пределах единой плиты для разных ее географических точек положение одновозрастных палеомагнитных полюсов различно и изменяется по мере приближения/удаления к/от TLS. Т.е., даже если принять позицию [Shatsillo et al., 2005] о соответствии полюсов “австралийской” группы “нормальному” аксиально-дипольному режиму генерации магнитного поля, использование монополярных направлений этой группы (с некомпенсированным вкладом TLS) для палеогеографических построений некорректно.

Отмеченная для “австралийской” группы обратная корреляционная зависимость (рис. 5, врезка) труднообъяснима, поскольку предполагает усиление воздействия TLS на главный источник поля по мере удаления от TLS, при этом известно, что напряженность земного поля по мере удаления от полюса убывает, т.е., исходя из общих соображе-

⁵ Приводятся данные по объектам, где направления N - и R -полярностей получены в едином разрезе. Мы не приводим соответствующие нормали для определения 18 (табл. 1), для которого отклонение N - и R -направлений от антиподальности объяснимо контаминацией метакристаллической компонентой, а также для определений 7 и 21, где отклонение от антиподальности мало и не превышает критического значения.

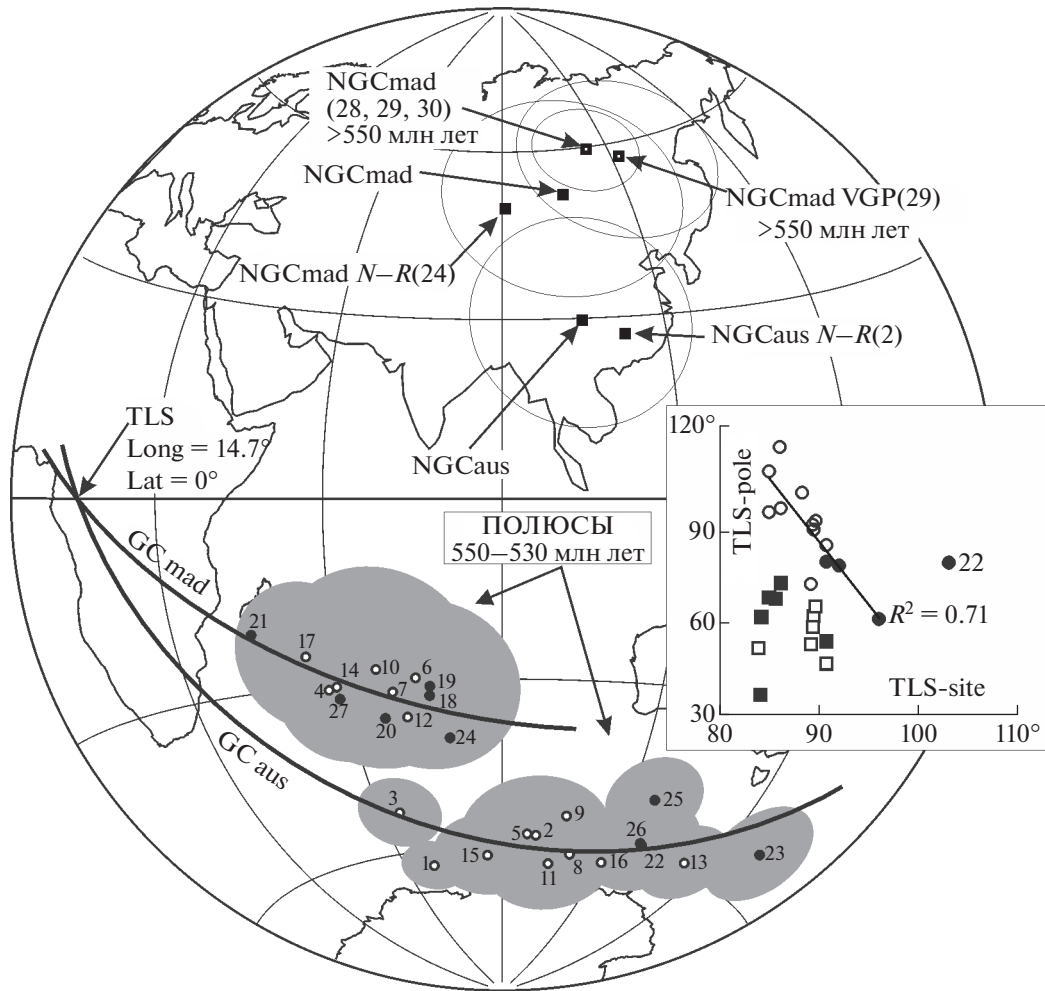


Рис. 5. Особенности распределения палеомагнитных полюсов Сибири “австралийской” и “мадагаскарской” групп: открытые кружки – единичные определения для возрастного интервала 540–530 млн лет; залитые кружки – единичные определения для возрастного интервала 550–540 млн лет (номера полюсов в соответствии с таблицей); GC – большие круги, аппроксимирующие распределение полюсов; NGC – нормали (и овалы доверия) к большим кругам. Индекс mad/aus означает принадлежность к “мадагаскарской”/“австралийской” группе; цифры в скобках – номера определений, по которым рассчитаны нормали к большим кругам. Индекс $N-R$ – большой круг проведен через средние направления для прямой и обратной полярности. Индекс VGP – большой круг аппроксимирует распределение виртуальных геомагнитных полюсов. TLS – гипотетический источник, определяемый точкой пересечения больших кругов (пояснения в тексте). График на врезке: отклонение палеомагнитного полюса от TLS (вертикальная ось) в зависимости от удаленности сайта (точки отбора проб) от TLS (горизонтальная ось). График иллюстрирует зависимость положения полюсов “австралийской” группы от географического положения сайта, обусловленную влиянием TLS. Кружки – “австралийская” группа полюсов, квадратики – “мадагаскарская” группа полюсов. Открытые значки – возрастная группа 540–530 млн лет, закрытые значки – возрастная группа 550–540 млн лет. При расчете полюсы “австралийской” группы были инвертированы. Корреляционная зависимость для данных по “австралийской” группе рассчитана без учета определения № 22 (для всей “австралийской” группы коэффициент детерминации $R^2 = 0.45$). Прочие пояснения в тексте.

ний об изменении напряженности поля, эта зависимость должна быть “прямой”. Определенное влияние на масштаб отклонения палеомагнитных полюсов в зависимости от географического положения точек отбора, должен оказывать “геометрический фактор”, обусловленный разницей между направлением вектора поля главного источника и TLS. Эта разница, т.е. угол между на-

правлением поля главного источника и TLS, будет меняться в зависимости от географического положения, что должно отражаться на результирующем векторе поля, определяющем палеомагнитное направление в каждой точке наблюдения. Очевидно, что чем больше разница между двумя направлениями, тем большим будет отклонение результирующего вектора (т.е. палеомагнитного

направления) от этих направлений. Расчет (по дипольной модели) “ожидаемых” склонений и наклонений для TLS и главного источника⁶ показал, что в пределах Сибирской платформы соответствующий угол между направлениями изменяется на $\sim 20^\circ$ при движении с запада на восток. Эта условная оценка — максимальная, поскольку предполагает равный (по модулю) вклад главного источника и TLS. Аналогичная тенденция, описываемая рассмотренной выше обратной корреляционной зависимостью (рис. 5 врезка), отмечается для палеомагнитных полюсов “австралийской” группы — чем восточнее сайт, тем больше отклонение палеомагнитного полюса от TLS. При этом, однако, фактический разброс палеомагнитных полюсов по дуге большого круга (более 50° , см. рис. 5) значительно превышает расчетные “дипольные” оценки. Возможно, отмеченные особенности распределения палеомагнитных полюсов, которые мы объясняем паразитным влиянием TLS, указывают на то, что TLS, если и являлся дипольным(?) источником, не был геоцентрическим — следует ожидать, что на земной поверхности, по мере удаления от полярной области малоглубинного источника, наклонения должны меняться не по дипольному закону. Отметим, однако, что предпринятые нами первые попытки моделирования “смеси” малоглубинного и геоцентрического дипольных источников пока не позволили найти такое их соотношение, которое бы реализовало выявленную на фактических данных зависимость между положением палеомагнитного полюса, географическим положением точки отбора и положением TLS.

Виртуальные геомагнитные полюсы (VGP)

Определение № 22 “австралийской” группы (сарданинская свита Кыллахского хребта [Павлов и др., 2018]), несмотря на слабую статистическую обоснованность, важно для понимания причин смещения палеомагнитных полюсов и оценки географического масштаба этого явления. Виртуальные геомагнитные полюсы сарданинской свиты, как и все палеомагнитные полюсы “австралийской” и “мадагаскарской” групп, характеризуются банановым распределением (рис. 5, рис. 6). Аппроксимация VGP сарданинской свиты дугой

⁶ В качестве главного источника австралийской группы используется полюс № 3 (табл. 1), поскольку в этом палеомагнитном направлении за счет биполярности частично компенсируется паразитный вклад TLS (при обращении полярностей полная компенсация TLS возможна лишь при ортогональном положении TLS относительно контаминируемого им источника). Для преимущественно биполярной “мадагаскарской” группы используется осредненный (по всей группе) полюс. Расчет “ожидаемых” склонений и наклонений для TLS по дипольной модели имеет иллюстративный характер, поскольку природа этого источника не ясна.

большого круга показывает, что нормаль к этому кругу близка и статистически не отличается от нормали, характеризующей распределение палеомагнитных полюсов “австралийской” группы. При аппроксимации VGP образцов сарданинской свиты с наиболее четкой палеомагнитной записью (ошибка определения альфа 95 не больше 5°), соответствующая нормаль определяется с высокой точностью и совпадает с нормалью “австралийской” группы (рис. 6). Как видно из стереограммы (рис. 6), большая часть VGP образует явную растяжку между “австралийским” полюсом с компенсированным вкладом TLS и самим TLS. Это показывает, что (1) масштаб отклонения палеомагнитного полюса может быть связан с соотношением напряженности поля главного источника и TLS и (2) разброс VGP может быть обусловлен контрастной динамикой напряженности этих источников во времени. Разрез сарданинской свиты является наиболее удаленным от TLS (около 10 тыс. км), т.е. это расстояние может определять минимальный географический размах (радиус?) влияния TLS, охарактеризованный фактическими данными. Естественно, что это заключение справедливо при условии, что поле, описываемое “мадагаскарскими” и “австралийскими” палеомагнитными направлениями (используемыми при расчете TLS), имело преимущественно дипольную конфигурацию.

Для “мадагаскарской” группы полюсов влияние вклада TLS на палеомагнитные направления может быть проиллюстрировано на примере распределения VGP лопатинской свиты Енисейского Кряжа (№21 в таблице, рис. 7), представляющей один из “ближайших” к TLS объектов. Палеомагнитное определение по лопатинской свите является наиболее ярким представителем “мадагаскарской” группы — это обусловлено аномально высокой частотой инверсий, зафиксированных в разрезе свиты, и очень хорошим качеством палеомагнитной записи [Шацилло и др., 2015]. Направления *N*- и *R*-полярностей для VGP лопатинской свиты близки к антиподальности — соответствующее угловое расстояние при обращении составляет 3.5° при его критическом значении 3.8° ⁷. Как видно (рис. 7), большой круг, аппроксимирующий VGP, проходит вблизи TLS. Нормаль к этому кругу, в связи с малым разбросом VGP определяется с большой ошибкой, но статистически не отличается от нормали для палеомагнитных полюсов “мадагаскарской” группы. При использовании в расчетах VGP для образцов с лучшей палеомагнитной записью ($\alpha_{95} \leq 2^\circ$, представ-

⁷ В действительности *N*- и *R*-направления лопатинской свиты неантиподальны — существенное наращивание статистики по разрезу показало, что отличие от антиподальности составляет $\sim 2.5^\circ$, но это отличие статистически значимо (неопубликованные авторские данные).

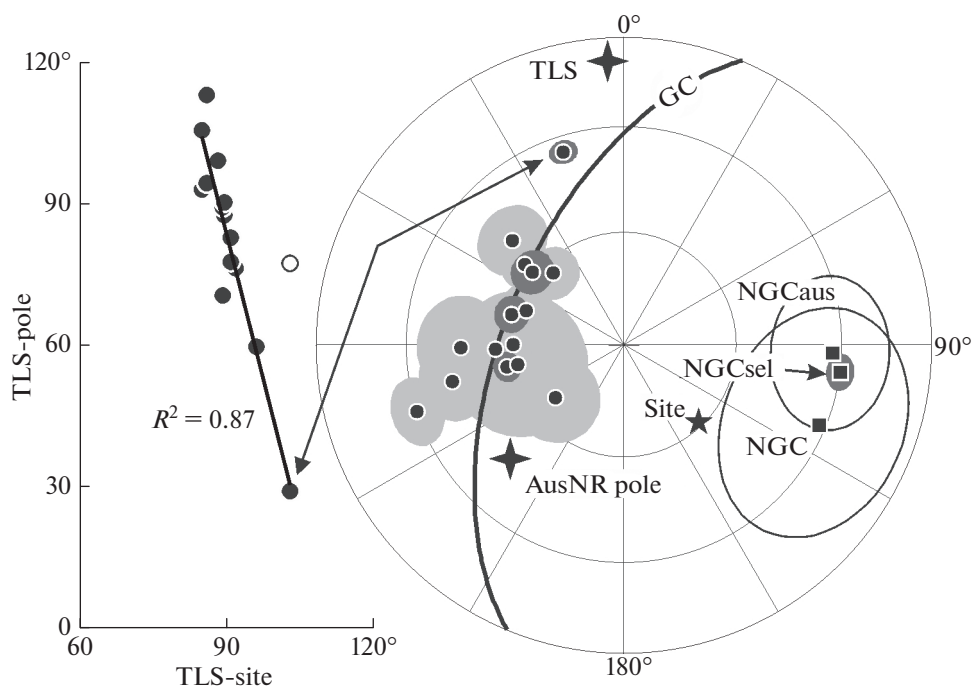


Рис. 6. Особенности распределения виртуальных геомагнитных полюсов (VGP) сардининской свиты Кыллахского хребта (Алданский блок Сибирской платформы) в контексте влияния TLS на палеомагнитные направления. На стереограмме: кружки и соответствующие им круги доверия (A95) – VGP по единичным образцам сардининской свиты (в соответствии с работой [Павлов и др., 2018]). Для направлений с $A95 \leq 5^\circ$, заливка более темная. GC/NGC – большой круг/нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение VGP; NGCsel – то же для VGP с $A95 \leq 5^\circ$. NGCaus – нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение единичных палеомагнитных полюсов австралийской группы 550–530 млн лет; TLS – гипотетический источник (см. рис. 5); AusNR pole – положение полюса австралийской группы для преобладающей (обратной) полярности с компенсацией вклада TLS (рассчитан по биполярному определению № 3 при обращении *N*- и *R*-направлений). NGCaus, TLS и AusNR pole приведены в системе координат Алданского сегмента Сибирской платформы, в соответствии с работой [Pavlov et al., 2008]. Звездочка – положение точки отбора (сайт). Проекция на нижнюю полусферу. Пояснения к графику см. на рис. 5. На графике представлены параметры, рассчитанные по “австралийской” группе полюсов, незаполненный кружок – по среднему полюсу сардининской свиты (при расчете корреляционной зависимости не используется). Прочие пояснения в тексте.

ляют 2/3 выборки), отмечается почти полная сходимость обсуждаемых нормалей (рис. 7), т.е., как и в случае с сардининской свитой, отмечается связь между геометрией разброса VGP и положением TLS, обусловленная, вероятно, контрастной динамикой напряженности источников поля во времени.

Анализ более древних палеомагнитных определений (№ 28, 29, 30) показывает (рис. 5, табл. 1), что нормаль к большому кругу, аппроксимирующему полюсы, близка к соответствующей нормали для полюсов “мадагаскарской” группы. Для определения № 29 (ничатская свита, рис. 8) эта же система симметрии описывает разброс VGP в масштабе вековых вариаций (подробнее см. [Шаццлло и др., 2019]) – по сути, приведенный пример аналогичен описанному для сардининской и лопатинской свит. Незначительное отклонение от TLS большого круга, аппроксимирующего VGP ничатской свиты, может быть объяснено существенной разницей в возрасте между ничатской свитой и стратиграфическими уровнями, по которым рассчитан TLS. Т.е. в данном случае это расхождение может

быть связано с незначительным дрейфом Сибири в интервале 635/580?–550–530 млн лет.

Учитывая почти полную аналогию в палеомагнитной записи всех приведенных примеров, можно предполагать существование единого “механизма”, определявшего распределение палеомагнитных направлений позднего неопротерозоя и “работавшего” на временных масштабах от первых тысяч лет (вековые вариации) до десятков миллионов лет. Важно отметить, что близкое положение “мадагаскарских” полюсов и соответствующих нормалей для значительно различающихся по возрасту объектов (от 530–540 до 700 млн лет) должно означать, что в течение позднего неопротерозоя Сибирская платформа практически не испытывала континентального дрейфа.

Распределение единичных полюсов с учетом занижения наклонения

Известно, что палеомагнитная запись, содержащаяся в осадочных породах, часто искажена в результате занижения наклонения [Tauxe et al.,

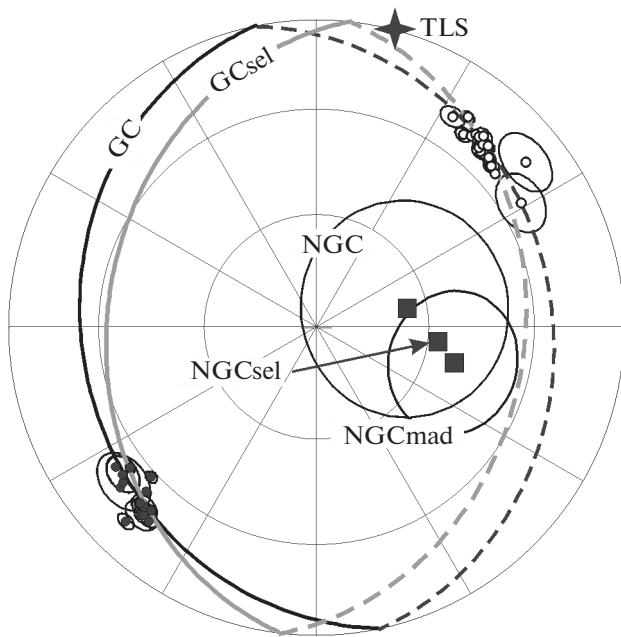


Рис. 7. Особенности распределения виртуальных геомагнитных полюсов (VGP) лопатинской свиты Енисейского Кряжа (Ангаро-Анабарский блок Сибирской платформы) в контексте влияния TLS на палеомагнитные направления. На стереограмме. Кружки и соответствующие им круги доверия (A95) – VGP лопатинской свиты по единичным образцам (в соответствии с работой [Шацилло и др., 2015]). GC/NGC – большой круг/нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение всех VGP; индекс sel – для VGP с $A95 \leq 2^\circ$. NGCmad – нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение единичных палеомагнитных полюсов “мадагаскарской” группы 550–530 млн лет; TLS – гипотетический источник. Залитые/открытые значки – проекция на нижнюю/верхнюю полусферу.

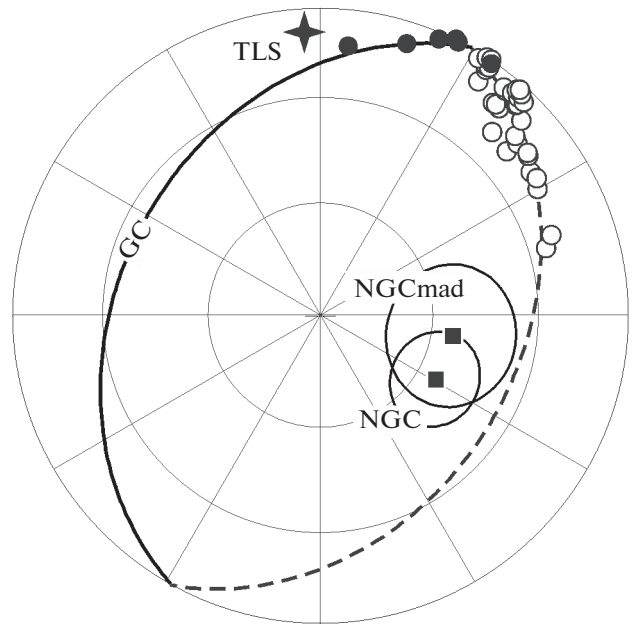


Рис. 8. Особенности распределения виртуальных геомагнитных полюсов (VGP) ничатской свиты (635/580? млн лет) западного склона Алданского щита в контексте влияния TLS на палеомагнитные направления: кружки – VGP ничатской свиты по стратиграфическим уровням (сплошной отбор ~1.5 м разреза), в соответствии с работой [Шацилло и др., 2019]. GC/NGC – большой круг/нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение VGP; NGCmad – нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение единичных палеомагнитных полюсов “мадагаскарской” группы 550–530 млн лет; TLS – гипотетический источник. NGCmad и TLS в системе координат Алданского сегмента Сибирской платформы. Залитые/открытые значки – проекция на нижнюю/верхнюю полусферу.

2008 и ссылки в этой работе]. Вклад этого эффекта в результирующие палеомагнитные направления (полюсы) приводит к их смещению, что теоретически может являться причиной бананового распределения, отмеченного для рассмотренных позднекембрийских объектов. Т.е. банановое распределение, которое мы объясняем паразитным влиянием гипотетического TLS, может являться артефактом, связанным с занижением наклона. Искажение палеомагнитных направлений в результате занижения наклона должно быть максимальным для объектов, характеризующихся (первоначально) средними наклонами, а разброс палеомагнитных полюсов в пределах единого в тектоническом отношении блока будет тем большим, чем больше расстояние между сайтами (объектами опробования) по (палео)долготе.

Для обсуждаемого набора единичных палеомагнитных полюсов Сибири “австралийской” и “мадагаскарской” групп были введены поправки

на занижение наклона (в соответствии с работой [King, 1955]) и проанализированы скорректированные данные. Как видно (рис. 9а), при введении поправки на занижение наклона точность (A95) определения нормалей к большим кругам, аппроксимирующим распределение единичных полюсов, падает и, при коэффициенте занижения наклона (f) ~ 0.5 (характерном для осадочных пород [Bilardello, Kodama, 2010]) составляет ~30°. При таком занижении наклона кучность распределения единичных полюсов для “мадагаскарской” и “австралийской” групп становится сопоставимой, приближаясь к ~50. На стереограмме видно (рис. 9б), что при занижении наклона ($f \geq 0.5$), нормали к большим кругам, аппроксимирующим распределение единичных полюсов, а также положение TLS, смещаются, однако эти смещения незначительны. Т.е. поправки на занижение наклона “разумных масштабов” не приводят к существенному изме-

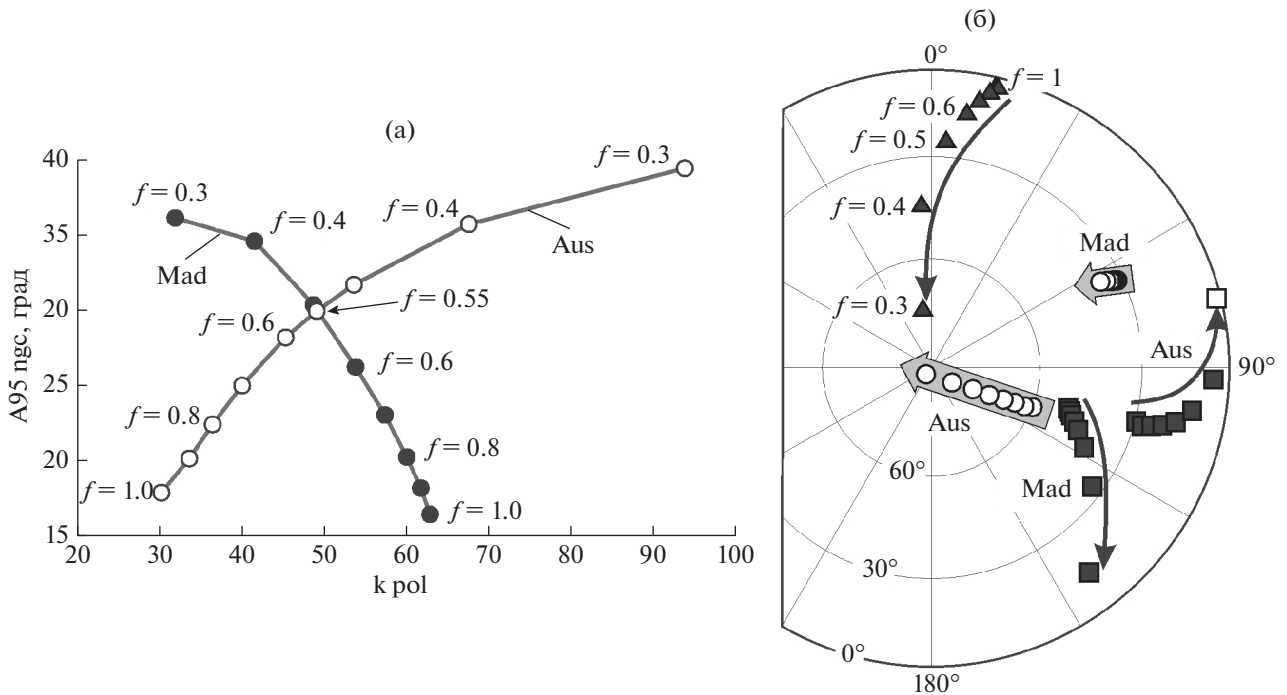


Рис. 9. Влияние занижения наклона на распределение палеомагнитных полюсов Сибири “мадагаскарской” и “австралийской” групп (550–530 млн. лет): (а) — изменение кучности распределения единичных полюсов (k_{pol}) — горизонтальная ось и радиуса круга доверия для нормалей к большим кругам (A_{95} ngс), аппроксимирующим распределение единичных полюсов — вертикальная ось, в зависимости от коэффициента занижения наклона (f); (б) — смещение осредненных палеомагнитных полюсов (кружки), нормалей к большим кругам, аппроксимирующим распределение единичных палеомагнитных полюсов (квадратики) и TLS (треугольнички) при увеличении занижения наклона от $f = 1$ (исходные данные) до $f = 0.3$. Смещение всех направлений по мере увеличения занижения наклона в соответствии с направлением стрелок. Залитые значки — северное полушарие, открытые значки — южное. Mad/Aus — данные для “мадагаскарской”/“австралийской” групп.

нению симметрии, описывающей банановое распределение единичных полюсов.

Симуляция бананового распределения⁸, выполненная на основе “австралийской” выборки показала, что растяжка полюсов на сфере при занижении наклона с $f = 0.55$ должна составлять $\sim 8^\circ$ (для $f = 0.3 \dots \sim 22^\circ$), при растяжке $> 50^\circ$ для исходных полюсов. Аналогичная симуляция для “мадагаскарской” выборки свидетельствует, что наблюдаемое для этой группы банановое распределение не может быть связано с занижением наклона, поскольку смоделированное распределение описывается совершенно иной системой симметрии (ориентировкой растяжки полюсов

на сфере), а разброс модельных полюсов составляет первые градусы.

Выполненные построения показывают, что эффект занижения наклона возможно и искажает палеомагнитную запись анализируемых выборок, однако не является определяющим для бананового распределения единичных палеомагнитных полюсов. Учитывая все приведенные доводы, более вероятно, что отмеченные особенности в распределении полюсов обусловлены спецификой геомагнитного поля времени накопления пород. В пользу этого заключения свидетельствует также неантиподальность палеомагнитных направлений прямой и обратной полярности (см. выше), поскольку данный факт нельзя объяснить с привлечением гипотезы о занижении наклона.

ВЫВОДЫ

Анализ палеомагнитных данных по позднему неопротерозою Сибири и Австралии позволяет высказать следующие предположения:

1) геомагнитное поле неопротерозойского времени имело сложную структуру, определяющуюся

⁸ Для каждого сайта рассчитывались палеомагнитные полюсы с введением общей поправки на занижение наклона [King, 1955]. Далее, из осредненного (скорректированного на занижение наклона) палеомагнитного полюса рассчитывались палеомагнитные направления для сайтов. В этих модельных палеомагнитных направлениях соответствующим образом “обратно” занижалось наклонение, и они вновь пересчитывались в палеомагнитные полюсы. Масштаб разброса (растяжка по дуге большого круга) полученных модельных полюсов сравнивался с таковым для исходных полюсов выборки.

сочетанием относительно короткоживущих “главных” источников, выявляемых непосредственно в палеомагнитной записи, и долгоживущего “паразитного” источника (TLS). На реальность существования TLS указывают особенности распределения палеомагнитных направлений и, в частности, отклонение направлений прямой и обратной полярности от антиподальности;

2) главные источники могли быть “монополярными”, однако для большей части позднего неопротерозоя эти источники биполярны (испытывали инверсии), и для них определяется дипольная (или близкая к дипольной) конфигурация поля. Дипольная конфигурация поля нарушалась влиянием долгоживущего TLS, определявшего также и геометрию вековых вариаций. Вероятно, что степень влияния TLS на палеомагнитное направление могла определяться двумя основными факторами: а) — соотношением напряженности поля главного источника и TLS (смещение палеомагнитного полюса) и вариациями напряженности этих источников (разброс виртуальных геомагнитных полюсов) и б) — относительным географическим положением главного источника, TLS и точки наблюдения (палеомагнитного отбора);

3) возможно, что сложный возвратно-поступательный характер миграции неопротерозойских палеомагнитных полюсов на продолжительных (десятки млн лет) интервалах времени не является отражением континентального дрейфа, а связан с несистематическими “скачками” главных источников поля в некоторой предпочтительной области. Это вполне очевидно для описанных “мадагаскарских” и “австралийских” разновозрастных групп полюсов Сибири. Вероятно, этот же механизм мог определять и распределение всех неопротерозойских палеомагнитных полюсов Аделаидского бассейна Австралии;

4) соответствие подавляющей части неопротерозойских палеомагнитных направлений аксиальному диполю вызывает обоснованные сомнения, что определяется противоречием рассчитанных палеоширот индикаторам палеоклимата (наличие ледниковых и сезонных отложений в экваториальных областях). Отметим, что рассмотренные в статье примеры такого “климатического парадокса” не являются редкостью в палеомагнитной практике (сводка в работе [Evans, Raub, 2011]), а соответствующие палеомагнитные данные лежат в основе “экстремальных” палеоклиматических моделей [Kirschvink, 1992; Hoffman, Schrag, 2002];

5) среди рассмотренных примеров только в единственном случае (Австралия, формация Rapford) установлено палеомагнитное направление, не вписывающееся в общую систему распределения полюсов и предполагающее высокоширотное положение континента в неопротерозое. Это направление было интерпретировано как кратко-

временное проявление экваториального диполя [Abrajevitch et al., 2018]⁹, однако именно это направление может соответствовать аксиальному диполю, поскольку наилучшим образом согласуется с индикаторами палеоклимата. В этом случае наборы палеомагнитных данных по Сибири и Австралии, предполагающие низкие неопротерозойские широты для этих континентов и демонстрирующие очень схожий характер распределения полюсов, следует рассматривать как результат записи экваториально-дипольных составляющих геомагнитного поля.

БЛУЖДАЮЩИЙ ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ДИПОЛЬ

Из проведенного анализа следует, что построение адекватных палеогеографических реконструкций для неопротерозоя на основе палеомагнитных данных проблематично, поскольку конфигурация геомагнитного поля того времени разительно отличалась от поля современности. Очевидно, что для решения этой проблемы необходима разработка соответствующей неактуальной модели поля. Исходя из рассмотренных наборов палеомагнитных данных и выявленных на их основе закономерностей, мы предлагаем к рассмотрению модель “Блуждающего Экваториального Диполя” — DED (Devious Equatorial Dipole). DED-модель не рассматривает физические аспекты динамо-процесса, однако принципиальная возможность устойчивой генерации экваториального диполя показана теоретическими расчетами и результатами моделирования [Ishihara, Kida, 2002; Aubert, Wicht, 2004; Gissinger et al., 2012], что, в определенном смысле, поддерживает развитаемую нами гипотезу.

В первую очередь отметим, что DED-модель основывается на допущении, что миграция неопротерозойских палеомагнитных полюсов определялась, главным образом, особенностями поведения геомагнитного поля, а не континентальным дрейфом. Идеологическая основа модели — поиск компромисса между палеомагнитными и палеоклиматическими данными, который должен реализовать полярное—среднеширотное положение континентов во время неопротерозойских оледенений с одной стороны, и согласовать имеющиеся наборы палеомагнитных данных с другой.

В общем виде (рис. 10) DED-модель предполагает, что главное геомагнитное поле позднего неопротерозоя имело сложную структуру и описывалось, главным образом, инвертирующим экваториальным диполем (ED), испытывавшим несистематическое разнонаправленное “блужда-

⁹ Близкий по сути палеомагнитный результат был получен по эдиакарским интрузиям Гренвилльского дайкового пояса (Северная Америка) [Halls et al., 2015].

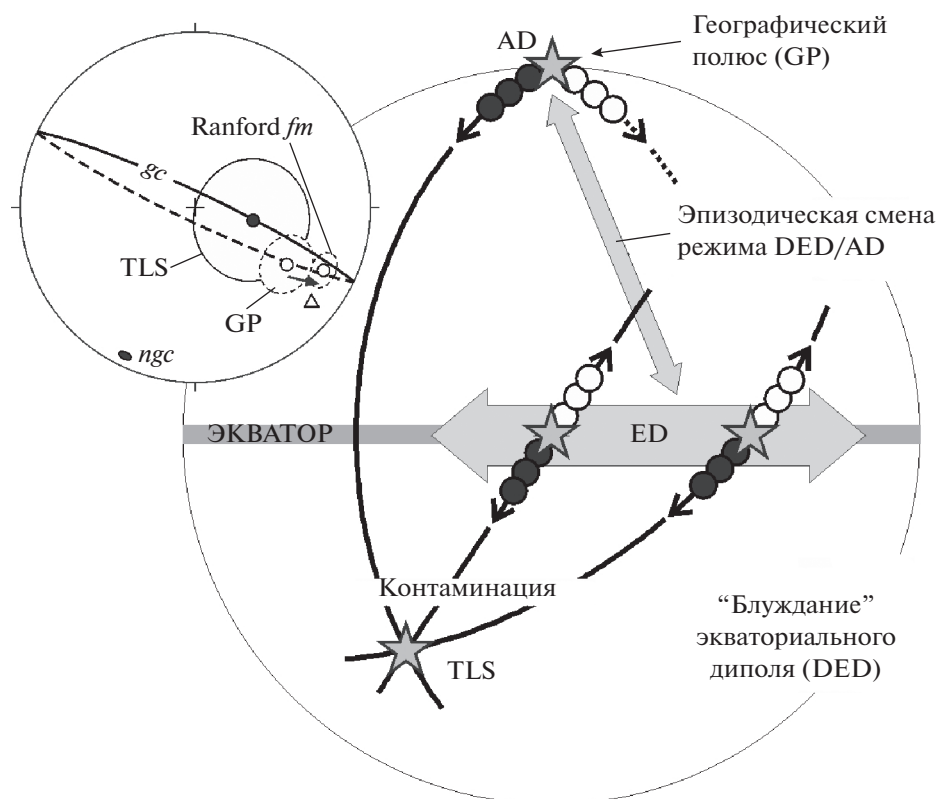


Рис. 10. Схема, объясняющая особенности распределения неопротерозойских палеомагнитных полюсов в пространстве/времени как результата контаминации экваториально- и аксиально-дипольных источников “третьим слабым источником”: звездочки — положения аксиального диполя (AD), экваториальных диполей (ED) и третьего слабого источника (TLS); затененные/открытые кружки — палеомагнитные полюсы для направлений прямой/обратной полярности, в разной степени контаминированные вкладом TLS. На врезке слева: соотношение направлений TLS, GP (рассчитаны по палеомагнитным данным для бассейна Аделаида, отвечающим экваториально-дипольному режиму генерации поля) и полюса формации Ranford (Кимберли), отвечающего аксиально-дипольному (AD) режиму генерации; *gc* — большой круг, аппроксимирующий направления; *ngc* — овал доверия (A95) для нормали к большому кругу; треугольник — географическое положение формации Ranford; затененные/открытые значки — северное/южное полушарие, прочие пояснения в тексте.

ние” в плоскости экватора. Такое состояние поля, характерное для большей части позднего неопротерозоя, эпизодически и кратковременно могло “переключаться” на аксиально-дипольный режим (AD). Конфигурация поля осложнялась влиянием слабого долгоживущего источника (TLS), положение которого было устойчивым. На возможность ощутимого влияния на главный источник слабого TLS и, как следствие, искажение дипольной конфигурации поля, указывают данные об общей ультранизкой напряженности поля в эдиакарское время [Bono et al., 2019; Shcherbakova et al., 2020]. Ранее нами было высказано дискуссионное предположение [Шацлло и др., 2019], что слабые неаксиальные источники могли быть пространственно связаны с краевыми областями низкоскоростных нижнемантийных провинций (LLSVP) — “Tuzo” и “Jason”, т.е. иметь стационарное положение в пространстве и времени как это можно заключить из работы [Torsvik et al., 2014].

Палеогеографические приложения

Блуждание экваториального диполя может быть геометрически описано движением палеомагнитного полюса вдоль дуги большого круга, нормаль к которому соответствует географическому полюсу. Таким образом, нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение палеомагнитных ED-полюсов для некоторого континентального блока, отражает, в первом приближении, положение искомого географического полюса (GP) (рис. 10). Принадлежность палеомагнитных направлений к ED или AD определяется по их согласованности с индикаторами палеоклимата. Возможно, что положение долгоживущего TLS может быть дополнительно использовано для определения относительного долготного положения континентальных блоков. Очевидно, что на текущем уровне разработки и обоснования нашей модели, перспектива этого не ясна.

Для реализации таких реконструкций нужны качественные и статистически обоснованные палеомагнитные данные, имеющие точную возрастную привязку и характеризующие направления прямой и обратной полярности с разверткой во времени. К сожалению, определения, удовлетворяющие этим требованиям, пока единичны, часто в публикациях отсутствуют необходимые табличные данные. Имеющиеся палеомагнитные определения по неопротерозою Сибири и Австралии, интерпретированные в рамках DED-модели, позволяют получить ожидаемое для формирования ледниковых отложений средне- и высокоширотное положение этих континентов (между 45 и 60° и между 60 и 85° широты соответственно).

Палеогеографическое положение Австралии, рассчитанное на основе полюса формации Ranford [Abrajevitch et al., 2018], соответствующего, в нашем понимании, аксиально-дипольного режиму генерации поля, определяется между 60 и 90° широты. Анализ соотношения направлений AD (формация Ranford), GP и TLS¹⁰ Австралии показывает (рис. 10, врезка), что некоторое расхождение AD и GP (~20°) может быть обусловлено контаминацией монополярного направления AD направлением TLS. Это еще раз подчеркивает, что: (1) существование долгоживущего “стационарного” TLS реально; (2) за счет влияния TLS полюсы, рассчитанные по монополярным направлениям, будут систематически смещены, и для объективной оценки положения GP (или AD) необходимы данные по биполярным направлениям, позволяющие при обращении частично компенсировать паразитный вклад TLS.

“Обратная сторона медали”

Казалось бы, поставленная цель достигнута – палеомагнитные данные согласованы, а континенты занимают широты, соответствующие палеоклиматическим индикаторам. Однако возникает другая, и весьма серьезная проблема. Положения неопротерозойских GP и Сибири, и Австралии оказываются на значительном удалении (70–80°) от среднекембрийских палеомагнитных полюсов этих континентов (см., например, [McElhinny et al., 2003; Павлов и др., 2015]), начинающих палеозойские участки кривых кажущейся миграции полюса. Формально это может означать, что в течение раннего кембрия произошел эпизод “истинного смещения полюса” (TPW), предполагающий быстрое и масштабное “проскальзывание”

¹⁰GP (Long = 122.3°; Lat = -38.1°; A95 = 12.8°) рассчитывалось как нормаль к большому кругу, аппроксимирующему распределение осредненных полюсов по формациям Yaltirepa, Elatina, Nuccaleena, Brachina, Bunyeroo, Wonoka; TLS (Long = 103.3°; Lat = 62.2°; A95 = 27.8°) рассчитывалось по пересечению больших кругов, аппроксимирующих распределение единичных VGP каждой формации.

всей литосферной оболочки планеты относительно ее оси вращения (см., например, [Raub et al., 2007]). Здесь надо отметить, что в основах гипотезы TPW (в частности, кембрийского [Kirschvink et al., 1997; Meert, 1999] и среднепалеозойского [Piper, 2007] эпизодов) лежат трудно интерпретируемые палеомагнитные данные, т.е. фактическое обоснование этой гипотезы изначально небезупречно [Torsvik et al., 1998]. Результаты, представленные в работах [Павлов и др., 2004; 2018; Шацилло, Павлов, 2019], показывают, что палеомагнитная запись во время предполагаемых TPW-событий (кембрийского и среднепалеозойского) не отражает процесс континентального дрейфа, а, более вероятно, обусловлена аномальным поведением геомагнитного поля. В пользу этого заключения свидетельствуют и данные об ультранизкой напряженности поля в близкие к обсуждаемым интервалам времени [Shcherbakova et al., 2017; 2020; Bono et al., 2019]. Другими словами, реальность существования в геологическом прошлом таких “геодинамических катастроф” как TPW-события не является общепризнанной и находится под вопросом.

Другое возможное объяснение расхождения неопротерозойских GP и раннепалеозойских полюсов не менее проблематично. Как сибирские, так и австралийские раннепалеозойские палеомагнитные полюсы близки к полюсам неопротерозоя, отвечающим в нашей терминологии DED-режиму генерации геомагнитного поля. В этой связи возникает вопрос: не является ли такое сходство палеомагнитных полюсов свидетельством того, что геомагнитное поле раннего палеозоя также имело экваториально-дипольную конфигурацию? Обьективного ответа на этот болезненный вопрос мы пока не нашли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования могут быть сведены к следующим основным положениям:

1. Анализ палеомагнитных данных по позднему неопротерозою Сибири и Австралии показывает, что геомагнитное поле этого времени имело сложную конфигурацию и его соответствие модели “Центрального Осевого Диполя” вызывает серьезные сомнения. Особенности распределения палеомагнитных полюсов трудно объяснить континентальным дрейфом, локальными тектоническими причинами, эффектом занижения наклона или перемагничиванием пород. Расчетные “палеомагнитные” широты для позднего неопротерозоя Сибири и Австралии, как правило, противоречат индикаторам климата, т.е. весь комплекс данных недвусмысленно указывает на существенное отличие поля терминального докембрия от актуалистической модели. Предложенные к настоящему времени неактуалистические “описа-

тельные” модели поля позднего неопротерозоя—раннего кембрия [Павлов и др., 2004; Shatsillo et al., 2005; Abrajevitch, Van der Voo, 2010], также не дают удовлетворительного объяснения имеющимся наборам палеомагнитных данных, при этом “эволюционные” модели геодинамо предполагают, что геомагнитное поле позднего неопротерозоя было мультиполярным [Driscoll, 2016; 2019].

2. Особенности распределения неопротерозойских палеомагнитных направлений Сибири и Австралии обнаруживают общие черты и позволяют, с использованием простых геометрических построений, определить положение основных источников поля, сочетание которых определяет наблюдаемое распределение палеомагнитных направлений и, вероятно, генеральную конфигурацию поля. Исходя из имеющихся наборов палеомагнитных данных по Сибири и Австралии, можно предположить, что геомагнитное поле неопротерозойского времени определялось существованием “паразитного” слабого, но долгоживущего источника неясной природы и “главного” дипольного источника. Паразитный источник имел стационарную позицию, в то время как главный источник испытывал несистематические скачкообразные перемещения в некоторой предпочтительной области. Комбинация этих источников определила, в первом приближении, наблюдаемый разброс неопротерозойских палеомагнитных полюсов.

3. Предложена неактуалистическая модель геомагнитного поля неопротерозоя — гипотеза “Блуждающего Экваториального Диполя” — позволяющая согласовать существующие для Сибири и Австралии наборы палеомагнитных данных и оценить палеогеографическое положение этих палеоконтинентов. В соответствии с нашей моделью в неопротерозойское время Сибирский и Австралийский палеоконтиненты располагались в средне-высокоширотных областях, что согласуется с присутствием в разрезах ледниковых отложений, для объяснения которых теперь не требуется привлечения экстремальной палеоклиматической модели “Snowball Earth”. С другой стороны, гипотеза “Блуждающего Экваториального Диполя” остро ставит вопрос о времени и механизме перехода геомагнитного поля от предполагаемого для неопротерозоя экваториально-дипольного режима к аксиально-дипольному режиму фанерозоя. Для решения этих вопросов, равно как и для тестирования предложенной гипотезы, необходимо получение новых палеомагнитных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Анализ палеомагнитных данных по неопротерозою Сибири и Австралии выполнен при поддержке РФФИ (грант № 17-05-00021), синтез результатов стратиграфического изучения неопротерозойских толщ Енисейского кряжа и Байкало-Патомского региона вы-

полнен при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00794) и РНФ (грант № 18-77-00059) соответственно. Палеомагнитные, регионально-геологические и изотопные исследования в юго-западных регионах Сибирской платформы проведены в рамках тем государственных заданий ИФЗ РАН и ГИН РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бухаров А.А., Виниченко В.Н. Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200000. Серия Прибайкальская. Лист N-49-XIII (ред. В.Д. Мац). Л.: ВСЕГЕИ. 1964.
- Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Писаревский С.А., Николь Г., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. Ранние этапы развития Палеоазиатского океана: данные по LA ICP-MS датированию детритовых цирконов из позднекембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1472–1490.
- Кембрий Сибири / А.Ю. Розанов, Л.Н. Репина, М.К. Апполонов и др. Новосибирск: ВО “Наука”. Сибирская издательская фирма. 1992. 135 с.
- Кочнев Б.Б., Карлова Г.А. Новые данные по биостратиграфии немакит-далдынского яруса венда юга Сибирской платформы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2010. Т. 18. № 5. С. 28–41.
- Кузнецов Н.Б., Прияткина Н.С., Рудько С.В., Шаццло А.В., Коллинз В.Д., Романюк Т.В. Первые данные о U/Pb-изотопных возрастах и Lu/Hf-изотопно-геохимической систематике детритных цирконов из лопатинской свиты (пограничные уровни венда-кембрия) и тектоническая природа Тейско-Чапского прогиба (СВ Енисейского кряжа) // Докл. РАН. 2018а. Т. 479. № 1. С. 49–53.
- Кузнецов Н.Б., Рудько С.В., Шаццло А.В., Рудько Д.В. Новые находки ихнофоссилий из пограничных уровней венда/кембрия западной периферии Сибирской платформы (вести с полей 2017). Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. Вып. 15. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2017. С. 153–155.
- Кузнецов Н.Б., Рудько С.В., Шаццло А.В., Рудько Д.В., Дуденский А.С., Шешуков В.С., Каньгина Н.А., Романюк Т.В. Первые геохронологические доказательства оледенения Стерт в Сибири — U-Pb датировки цирконов из диамиктитов р.Вороговка на севере Енисейского Кряжа (вести из лаборатории). Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. Вып. 16. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2018б. С. 142–145.
- Кузнецов Н.Б., Шаццло А.В., Павлов В.Э., Прияткина Н.С., Данилко Н.К., Козионов А.Е. Первые находки ихнофоссилий и арумбериеморфных отпечатков в породах чингасанской и чапской серий Тейско-Чапского прогиба (северо-восток Енисейского Кряжа). Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Материалы совещания. Вып. 11. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2013. С. 143–147.
- Павлов В.Э., Галле И., Шаццло А.В., Водовозов В.Ю. Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р. Лена — новые ограничения на кривую кажущейся

- шейся 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., Шаццлло А.В., Паверман В.И., Щербакова В.В., Мальшев 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.
- Павлов В.Э., Шаццлло А.В., Петров П.Ю.* Палеомагнетизм верхнерифейских отложений Туруханского и Оленекского поднятий и Удинского Присянья и дрейф Сибирской платформы в неопротерозое // *Физика Земли*. 2015. № 5. С. 107–139.
- Палеомагнитные направления и полюса. Материалы мирового центра данных Б. Данные по СССР. Вып. 5 / отв. ред. А.Н. Храмов. М. 1982. 47с.
- Петров П.Ю.* Постледниковые отложения дальнетайгинской серии: ранний венд Уринского поднятия Сибири. Сообщение 1. Баракунская свита // *Литология и полезные ископаемые*. 2018. № 5. С. 459–472.
- Покровский Б.Г., Буякайте М.И., Кокин О.В.* Геохимия изотопов С, О, Sg и хемостратиграфия неопротерозойских отложений севера Енисейского Кряжа // *Литология и полезные ископаемые*. 2012. № 2. С. 197–220.
- Рогов В.И., Карлова Г.А., Марусин В.В., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Гражданкин Д.В.* Время формирования первой биостратиграфической зоны венда в сибирском гипостратотипе // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 4. С. 735–747.
- Родионов В.П.* Палеомагнитная характеристика разреза рубежа венда–кембрия (река Чая, северное Прибайкалье). Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Материалы международной школы-семинара “Проблемы палеомагнетизма и магнетизма горных пород”. СПб.: СОЛЮ. 2014. С. 147–152.
- Рудько С.В., Петров П.Ю., Кузнецов А.Б., Шаццлло А.В., Петров О.Л.* Уточненный тренд $\delta^{13}\text{C}$ в дальнетайгинской серии Уринского поднятия (венд, юг средней Сибири) // *Докл. РАН*. 2017. Т. 477. № 5. С. 590–594.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Подковыров В.Н., Бартли Дж., Давыдов Ю.В.* Юдомский комплекс стратотипической местности: С-изотопные хемостратиграфические корреляции и соотношение с вендом // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2004. Т. 2. № 5. С. 3–28.
- Советов Ю.К.* Седиментология и стратиграфическая корреляция вендских отложений на юго-западе Сибирской платформы: выдающийся вклад внешнего источника кластического материала в образовании осадочных систем // *Литосфера*. 2018. Т. 18. № 1. С. 20–45.
- Советов Ю.К., Комлев Д.А.* Тиллиты в основании оселковой серии Присянья и нижняя граница венда на юго-западе Сибирской платформы // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2005. Т. 13. № 4. С. 3–34.
- Хоментовский В.В.* Ангарий Енисейского Кряжа как стандартное подразделение неопротерозоя // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 3. С. 464–472.
- Хоментовский В.В., Шенфиль В.Ю., Якишин М.С., Бутаков Е.П.* Опорные разрезы отложений верхнего докембрия и нижнего кембрия Сибирской платформы. М.: Наука. 1972. 355 с.
- Храмов А.Н.* Геомагнитные инверсии в палеозое: переходное поле, полярная асимметрия и мантийная конвекция // *Физика Земли*. 2007. № 10. С. 4–14.
- Храмов А.Н., Иосифиди А.Г.* Асимметрия геомагнитной полярности: экваториальный диполь, Пангея и земное ядро // *Физика Земли*. 2012. № 1. С. 30–43.
- Чумаков Н.М.* Оледенения Земли: История, стратиграфическое значение и роль в биосфере. Труды Геологического института. Вып. 611. М.: ГЕОС. 2015. 160 с.
- Шаццлло А.В.* Палеомагнетизм венда юга Сибирской платформы и некоторые аспекты позднедокембрийской геодинамики. Дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: ИФЗ РАН. 2006. 238 с.
<https://drive.google.com/drive/folders/0B1kxy81cx-WN3X1FwY1BQN0UxRm8>
- Шаццлло А.В., Латышева И.В., Колесникова А.А.* Тиллиты основания байкальской серии – новое местонахождение и предварительные хемостратиграфические и палеомагнитные данные по карбонатным постгляциальным толщам (Прибайкалье, разрез Риты). Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2019б. Т. 2. С. 346–351.
- Шаццлло 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 верхнепротерозойской лопатинской свиты (северо-восток Енисейского кряжа): проблемы ее возраста и палеогеографии Сибирской платформы на рубеже протерозоя и фанерозоя // *Докл. РАН*. 2015. Т. 465. № 4. С. 464–468.
- Шаццлло А.В., Кузнецов Н.Б., Рудько С.В.* Новые палеомагнитные данные по терминальному докембрию Енисейского Кряжа (чингасанская и чапская серии Тейско-Чапского прогиба): дрейф Сибири, истинное смещение полюса или специфика геомагнитного поля неопротерозоя? Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Том 2. Материалы L Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2018. С. 311–316.
- Шаццлло А.В., Павлов В.Э.* Систематика палеомагнитных направлений раннего-среднего девона Минусинских впадин: новые данные и старые проблемы // *Физика Земли*. 2019. № 3. С. 97–116.
- Шаццлло А.В., Писаревский С.А., Кочнев Б.Б.* Результаты палеомагнитных исследований неопротерозоя разреза “Елохин мыс” (юго-запад Сибирской платформы). Палеомагнетизм и магнетизм горных пород; теория, практика, эксперимент. Материалы семинара. Борок. 19–22 октября 2006 г. М.: ГЕОС. 2006. С. 162–165.
- Шаццлло А.В., Рудько С.В., Латышева И.В., Рудько Д.В., Федюкин И.В., Мальшев 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.
- Abrajevitch A., Pillans B.J., Roberts A.P., Kodama K.* Magnetic properties and paleomagnetism of Zebra Rock, Western Australia: Chemical remanence acquisition in hematite pigment and Ediacaran geomagnetic field behavior // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018. V. 19. № 3. P. 732–748.
- Abrazhevich A., Van der Voo R.* Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 293. P. 164–170.

- Aubert J., Wicht J.* Axial vs. equatorial dipolar dynamo models with implications for planetary magnetic fields // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 221. P. 409–419.
- Bilardello D., Kodama K.P.* Rock magnetic evidence for inclination shallowing in the early Carboniferous Deer Lake Group red beds of western Newfoundland // *Geophysical J. International*. 2010. V. 181. № 1. P. 275–289.
- Bono R.K., Tarduno J.A., Nimmo F., Cottrell R.D.* Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity // *Nature Geoscience*. 2019. V. 12. № 2. P. 143–147.
- Driscoll P.E.* Simulating 2 Ga of geodynamo history // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 5680–5687.
- Driscoll P.* Geodynamo recharged // *Nature Geoscience*. 2019. V. 12. № 2. P. 83–84.
- Embleton B.J.J., Williams G.E.* Low palaeolatitude of deposition for late Precambrian periglacial varvites in South Australia: implications for palaeoclimatology // *Earth planet. Sci. Lett.* 1986. V. 79. P. 419–430.
- Evans D.A.D., Raub T.D.* Neoproterozoic glacial palaeolatitudes: a global update. *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations* / Eds E. Arnaud, G.P. Halverson, G. Shields-Zhou. Ldn: Geol. Soc. London Mem. 2011. № 36. P. 93–112.
- Gissinger C., Petitdemange L., Schirner M., Dormy E.* Bistability between Equatorial and Axial Dipoles during Magnetic Field Reversals // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. № 23. P. 234501.
- Halls H.C., Lovette A., Hamilton M., Söderlund U.* A paleomagnetic and U–Pb geochronology study of the western end of the Grenville dyke swarm: Rapid changes in paleomagnetic field direction at ca. 585 Ma related to polarity reversals? // *Precambrian Research*. 2015. V. 257. P. 137–166.
- Hill A.C., Haines P.W., Grey K.* Chapter 67 Neoproterozoic glacial deposits of central Australia. *Geological Society. London: Memoirs*. 2011. V. 36(1). P. 677–691.
- Hoffman P.F., Schrag D.P.* The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change // *Terra Nova*. 2002. V. 14. P. 129–155.
- Ishihara N., Kida S.* Equatorial magnetic dipole field intensification by convection vortices in a rotating spherical shell // *Fluid Dynamics Research*. 2002. V. 31. P. 253–274.
- King R.F.* The remanent magnetism of artificially deposited sediment // *Mon. Not. R. Astron. Soc. Geophys. Suppl.* 1955. № 7. P. 115–134.
- Kirschvink J.L.* Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball earth. *The Proterozoic Biosphere* / Eds J. W. Schopf and C. Klein. Cambridge: Cambridge University Press. 1992. P. 51–52.
- Kirschvink J.L., Ripperdan R.L., Evans D.A.* Evidence for a large-scale reorganization of Early Cambrian continental landmasses by inertial interchange true polar wander // *Science*. 1997. V. 277. P. 541–545.
- Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Cogne J.P.* Palaeomagnetic study of Vendian and Early Cambrian rocks of South Siberia and Central Mongolia: was the Siberian platform assembled at this time? // *Precamb. Res.* 2001. V. 110. P. 61–92.
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Letnikova E.F., Kaurova O.K., Konstantinova G.V.* Age constraints on the Neoproterozoic Baikal Group from combined Sr isotopes and Pb–Pb dating of carbonates from the Baikal type section, southeastern Siberia // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013. V. 62. P. 51–66.
- Lan Z.-W., Chen Z.-Q.* Possible animal body fossils from the Late Neoproterozoic interglacial successions in the Kimberley region, northwestern Australia // *Gondwana Research*. 2012. V. 21. № 1. P. 293–301.
- McElhinny M.W., Powell C.M., Pisarevsky S.A.* Paleozoic terranes of eastern Australia and the drift history of Gondwana // *Tectonophysics*. 2003. V. 362(1–4). P. 41–65.
- Meert J.* A paleomagnetic analyses of Cambrian true polar wander // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 168. P. 131–144.
- Ogg J.G., Ogg G.M., Gradstein F.M.* A Concise Geologic Time Scale. Chapter 4. Cryogenian and Ediacaran. Elsevier. 2016. P. 29–39.
- Pavlov V., Bachtadse V., Mikhailov V.* New Middle Cambrian and Middle Ordovician palaeomagnetic data from Siberia: Llandelian magnetostratigraphy and relative rotation between the Aldan and Anabar-Angara blocks // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. V. 276. № 3–4. P. 229–242.
- Piper J.D.A.* Palaeomagnetism of the Loch Doon Granite Complex, Southern Uplands of Scotland: The Late Caledonian palaeomagnetic record and an Early Devonian episode of True Polar Wander // *Tectonophysics*. 2007. V. 432. P. 133–157.
- Pisarevsky S.A., Komissarova R.A., Khramov A.N.* New paleomagnetic result from Vendian red sediments in Cisbaikalia and the problem of the relationship of Siberia and Laurentia in the Vendian // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 140. P. 598–610.
- Pisarevsky S.A., Li Z.X., Grey K., Stevens M.K.* A palaeomagnetic study of Empress 1A, a stratigraphic drillhole in the Officer Basin: evidence for a lowlatitude position of Australia in the Neoproterozoic // *Precambrian Research*. 2001. V. 110. P. 93–108.
- Pisarevsky S.A., Wingate M.T.D., Stevens M.K., Haines P.W.* Palaeomagnetic results from the Lancer 1 stratigraphic drillhole, Officer Basin, Western Australia, and implications for Rodinia reconstructions // *Australian J. Earth Sciences*. 2007. V. 54. P. 561–572.
- Priyatkinina N., Collins W.J., Khudoley A.K., Kusnetsov N.B., Hui-Qing Huang.* Detrital zircon record of Meso- and Neoproterozoic sedimentary basins in northern part of the Siberian Craton: characterizing buried crust of the basement // *Precambrian Research*. 2016. V. 285. P. 21–38.
- Rajagopalan S., Schmidt P.W., Clark D.A.* Magnetic overprinting of the Brachina Formation/Ulupa Siltstone, Southern Adelaide Foldbelt, prior to Delamerian deformation // *Australian Journal of Earth Sciences*. 2011. V. 58(4). P. 407–416.
- Raub T.D., Kirschvink J.L., Evans D.A.D.* True Polar Wander: Linking Deep and Shallow Geodynamics to Hydro- and Biospheric Hypotheses. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Treatise on Geophysics (Second Edition)*. 2007. V. 5. Amsterdam: Elsevier. P. 511–530.
- Schmidt P.W., Williams G.E.* Ediacaran palaeomagnetism and apparent polar wander path for Australia: no large true polar wander // *Geophysical Journal International*. 2010. V. 182. P. 711–726.
- Schmidt P.W., Williams G.E.* The Neoproterozoic climatic paradox: equatorial palaeolatitude for Marinoan glaciation near sea level in South Australia // *Earth planet. Sci. Lett.* 1995. V. 134. P. 107–124.
- Schmidt P.W., Williams G.E., McWilliams M.O.* Palaeomagnetism and magnetic anisotropy of late Neoproterozoic strata, South Australia: implications for the palaeolatitude

of late Cryogenian glaciation, cap carbonate and the Ediacaran System // *Precambrian Res.* 2009. V. 174. P. 35–52.

Schmidt P.W., Williams G.E. Palaeomagnetism of the ejecta-bearing Bunyeroo Formation, late Neoproterozoic, Adelaide fold belt, and the age of the Acraman impact // *Earth planet. Sci. Lett.* 1996. V. 144. P. 347–357.

Shatsillo A.V., Didenko A.N., Pavlov V.E. Paleomagnetism of Vendian Deposits of the Southwestern Siberian Platform // *Rus. J. Earth Sci.* 2006. V. 8. ES2003, <https://doi.org/10.2205/2005ES000182>

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 // *Russian Journal of Earth Sciences.* 2005. V. 7. № 4.

Shcherbakova V.V., Biggin A.J., Veselovskiy R.V., Shatsillo A.V., Hawkins L.M.A., Shcherbakov V.P., Zhidkov G.V. Was the Devonian geomagnetic field dipolar or multipolar? Palaeointensity studies of Devonian igneous rocks from the Minusa Basin (Siberia) and the Kola Peninsula dykes, Russia // *Geophysical J. International.* 2017. V. 209. № 2. P. 1265–1286.

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 // *Geophysical J. International.* V. 220. № 3. P. 1928–1946.

Sohl L.E., Christie-Blick N., Kent D.V. Paleomagnetic polarity reversals in Marinoan (ca. 600 Ma) glacial deposits of Australia: implications for the duration of low-latitude glaciation in Neoproterozoic time // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1999. V. 111. P. 1120–1139.

Sovetov J.K., Le Heron D.P. Birth and evolution of a Cryogenian basin: Glaciation, rifting and sedimentation in the Vorogovka Basin, Siberia // *Sedimentology.* 2016. V. 63(2). P. 498–522.

Sovetov J.K., Kulikova A.E., Medvedev M.N. Sedimentary basins in the southwestern Siberian Craton: Late Neoproterozoic–Early Cambrian rifting and collisional events. In: *The Evolution of the Rheic Ocean: From Avalonian–Cadmian Active Margin to Alleghenian–Variscan Collision* (Eds U. Linnemann, R.D. Nance, P. Kraft and G. Zulauf), *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 2007. V. 423. P. 549–578.

Tauxe L., Kodama K.P., Kent D.V. Testing corrections for paleomagnetic inclination error in sedimentary rocks: A comparative approach // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2008. V. 169. № 1–4. P. 152–165.

Torsvik T.H., Meert J.G., Smethurst M.A. Smethurst Polar Wander and the Cambrian // *SCIENCE.* 1998. V. 279. P. 9a.

Torsvik T.H., Van der Voo R., Doubrovine P.V., Burke K., Steinberger B., Ashwal L.D., Trønnes R.G., Webb S.J., Bull A.L. Deep mantle structure as a reference frame for movements in and on the Earth // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2014. V. 111(24). P. 8735–8740.

A Devious Equatorial Dipole Hypothesis: on the Low-Latitude Glaciations Problem and Geomagnetic Field Configuration in Late Precambrian

A. V. Shatsillo^{a, *}, S. V. Rud'ko^{b, c}, I. V. Latysheva^b, D. V. Rud'ko^a, I. V. Fedyukin^a, V. I. Powerman^{a, d}, and N. B. Kuznetsov^b

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^b*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

^c*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, 199034 Russia*

^d*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia*

*e-mail: shatsillo@gmail.com

The paleomagnetic data for the Late Neoproterozoic complexes of Siberia and Australia are analyzed. It is shown that the existing paleomagnetic data are poorly consistent with the concept of the axial-dipole configuration of the Late Neoproterozoic geomagnetic field: the proposed non-actualistic models of the field also do not reasonably explain the distribution of the paleomagnetic poles. The analysis of the distribution of paleomagnetic and virtual geomagnetic poles with simple geometric calculations suggests that the configuration of the Late Neoproterozoic geomagnetic field was determined by the coexistence of a weak long-lived source stably fixed in space and a main dipole source which experienced sporadic multidirectional jumps within a certain preferred region of the Earth. With the use of the paleoclimate proxies, the predominantly equatorial orientation of the main dipole source is substantiated. We propose a “descriptive” non-actualistic model of the Late Neoproterozoic geomagnetic field—the Devious Equatorial Dipole hypothesis, which harmonizes the paleomagnetic and paleoclimate data.

Keywords: paleomagnetism, reconstructions, Neoproterozoic, glaciations, equatorial geomagnetic dipole, true polar shift, Snowball Earth hypothesis