

РАЗРАБОТКА ШКАЛЫ МАГНИТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ КЕМБРИЯ И ОРДОВИКА: ТЕКУЩИЕ ДАННЫЕ И ПОПЫТКА ИХ СИНТЕЗА

© 2020 г. В. Э. Павлов^{1,2,*}, И. Галле³

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

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

³Парижский институт физики Земли, Сорбонна Париж Сите, Университет Париж Дидро, УМР 7154, НЦНИ, F-75005, г. Париж, Франция

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

Поступила в редакцию 30.11.2018 г.

После доработки 27.01.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Шкала геомагнитной полярности представляет собой квинтэссенцию наших знаний об изменении полярности магнитного поля Земли в геологическом прошлом. Характер изменения полярности магнитного поля относительно хорошо известен для кайнозоя, мезозоя и позднего палеозоя. В то же время, наши знания о полярности магнитного поля более древних эпох обрывочны и фрагментарны. Следующим важным шагом должно стать получение надежной высококачественной информации по нижнему и среднему палеозою. В настоящей работе сведены вместе основные данные, полученные нами и нашими коллегами в последние десятилетия при изучении магнитной стратиграфии нижнего палеозоя (кембрия и ордовика) Сибирской платформы и других регионов. Синтез этих данных позволяет предложить рабочий макет Шкалы магнитной полярности раннего палеозоя, описывающий имеющиеся на настоящий момент знания о характере изменения полярности геомагнитного поля в течение этого интервала геологического времени. Наиболее важными характеристиками, описывающими процесс смены полярности геомагнитного поля в раннем палеозое, являются следующие: а) существование на протяжении значительной части раннего и среднего ордовика суперхрона обратной полярности (третьего фанерозойского суперхрона “Мойеро”); б) высокая (возможно, максимальная в фанерозое) частота геомагнитных инверсий в среднем кембрии; в) уменьшение частоты геомагнитных инверсий в позднем кембрии и тремадоке при приближении к суперхрону; г) наличие аномального периода в поведении геомагнитного поля вблизи границы фанерозоя и докембрия; д) отсутствие двойного суперхрона в ордовике [Algeo, 1996].

Ключевые слова: палеомагнетизм, палеозой, магнитостратиграфия, шкала магнитной полярности, кембрий, ордовик.

DOI: 10.31857/S0002333720040079

ВВЕДЕНИЕ

Характер изменения полярности магнитного поля Земли на протяжении геологической истории является фундаментальной характеристикой, несущей в себе информацию о процессах, протекающих в ядре и на границе ядро–мантия, имеющей принципиальное значение для разработки физической теории геомагнетизма, для понимания эволюции нашей планеты, для решения ряда важных фундаментальных и прикладных проблем наук о Земле. Шкала геомагнитной полярности представляет собой квинтэссенцию наших знаний об изменении полярности магнитного поля Земли в геологическом прошлом.

Характер изменения полярности магнитного поля хорошо известен, начиная с поздней юры, благодаря исследованию морских линейных ано-

малий. Интенсивные магнитостратиграфические работы последних десятилетий способствовали существенному прогрессу в построении шкалы магнитной полярности раннего мезозоя и позднего палеозоя (см., напр., [Opdyke, Channel, 1996; Hounslow, 2016]).

В то же время наши знания о полярности магнитного поля более древних эпох обрывочны и фрагментарны. Следующим важным шагом должно стать получение надежной высококачественной информации по раннему и среднему палеозою.

Основным методом построения шкалы геомагнитной полярности палеозоя является магнитостратиграфическое исследование разрезов, максимально подробно запечатлевших в себе геологическую летопись рассматриваемого вре-

менного интервала. Из-за меньшей вероятности последующего перемагничивания лучшей биостратиграфической изученности, а также в силу целого ряда других причин, первоочередным объектом магнитостратиграфических исследований являются стратотипические разрезы платформенных областей.

Силур, девон и нижний карбон Восточно-Европейской и Сибирской платформ представляют собой достаточно сложный, а в ряде случаев и малоперспективный объект для магнитостратиграфических исследований. С сожалением следует отметить, что в других регионах нашей планеты также до сих пор не найдено объектов, исследование которых позволило бы достаточно уверенно и полно восстановить характер изменения полярности магнитного поля в среднем палеозое. В то же время в пределах Сибирской платформы широко развиты нижнепалеозойские ордовикские и кембрийские отложения, образующие уникальные по полноте геологической летописи, качеству палеомагнитной записи, мощности, обнаженности и проч., разрезы, не имеющие себе аналогов в мире.

Благодаря этим обстоятельствам, а также существенному заделу, созданному в истекшие десятилетия российскими палеомагнитологами [Храмов и др., 1974; 1982], именно при изучении этих объектов в настоящее время возможен существенный прогресс в деле создания шкалы магнитной полярности палеозоя. Именно поэтому, разработка шкалы геомагнитной полярности раннего палеозоя является одним из основных направлений наших исследований.

На продолжении последней четверти века выполнена серия магнитостратиграфических исследований практически всех основных опорных разрезов кембрия и ордовика Сибирской платформы (СП) – см. рис. 1. Более двух десятков нижекембрийских разрезов было изучено нами на северо-западе, севере, северо-востоке, юго-востоке и юге Сибирской платформы. Средний и верхний кембрий изучен нами в разрезах, выходящих на поверхность в долинах рек Кулюмбэ (северо-запад СП), Хорбусуонка (северо-восток СП) Мая (юго-восток СП). Нижний ордовик изучался в разрезах рек Мойеро (север СП), Кулюмбэ (северо-запад СП), среднего течения реки Ангары (вблизи устья р. Рожковой, юг СП). Магнитостратиграфическая характеристика среднего ордовика была получена по разрезам рек Мойеро и Кулюмбэ, среднего течения р. Лена (разрезы Кудрино, Половинка и др.) и среднего течения реки Ангары. Верхний ордовик был обследован в опорных разрезах правых притоков р. Подкаменная Тунгуска – рек Большая Нирунда и Столбовая. В качестве дополнения к проводимым исследованиям был изучен также ряд ордовикских разрезов

из других регионов – Тувы (верхний ордовик), Тянь-Шаня (верхний ордовик), Восточно-Европейской платформы (лланвирн и лландейло). В общей сложности из кембрийских и ордовикских разрезов было изучено более 4500 образцов, отобранных в десятках обнажений из разных регионов.

Результаты подавляющего большинства этих исследований опубликованы в различных научных журналах [Gallet, Pavlov, 1996; Pavlov, Gallet, 1998; 2001; 2005; Gallet et al., 2003; Kouchinsky et al., 2008; Pavlov et al., 2008; Павлов и др., 1999; 2012; 2017; 2018; Родионов и др., 2001; и др.]. Там же приводятся подробные описания изученных геологических разрезов, методов исследований, характера палеомагнитной записи, обоснование ее надежности. В настоящей статье дается сводка результатов, полученных нами и нашими коллегами в последние десятилетия при изучении магнитостратиграфии кембрия и ордовика Сибирской платформы и других регионов, а также делается попытка синтеза этих данных в рамках предлагаемого рабочего макета шкалы магнитной полярности раннего палеозоя.

Вопрос о выборе опции магнитной полярности для палеозоя Сибирской платформы можно считать в значительной степени решенным уже с момента появления первых обзорных работ по палеомагнетизму Сибирской платформы (см. напр., [Храмов и др., 1974]), где был рассмотрен общий тренд кажущейся миграции полюса для Сибири для фанерозоя. Согласно этим данным, в начале палеозоя Сибирская платформа была расположена в южном полушарии и развернута к северу своей современной южной–юго-восточной стороной. Последующее накопление данных и новые обобщающие работы [Храмов и др., 1982; Smethurst et al., 1998; Cocks, Torsvik, 2007; Powerman et al., 2013; и др.] только подтвердили эти выводы. Соответственно, сибирские раннепалеозойские палеомагнитные направления с южным–юго-восточным склонением и отрицательным наклоном должны рассматриваться как отвечающие прямой полярности геомагнитного поля, а противоположные им направления с северным–северо-западным склонением и положительным наклоном – как отвечающие обратной полярности геомагнитного поля.

Описание результатов магнитостратиграфических исследований дано ниже, начиная с завершающей части раннего кембрия (тойонское время) и среднего кембрия. Большая часть раннего кембрия, по-видимому, характеризовалась очень необычным поведением геомагнитного поля (см., напр., [Павлов и др., 2018]), поэтому описание и обсуждение соответствующих данных вынесено нами в отдельный раздел.

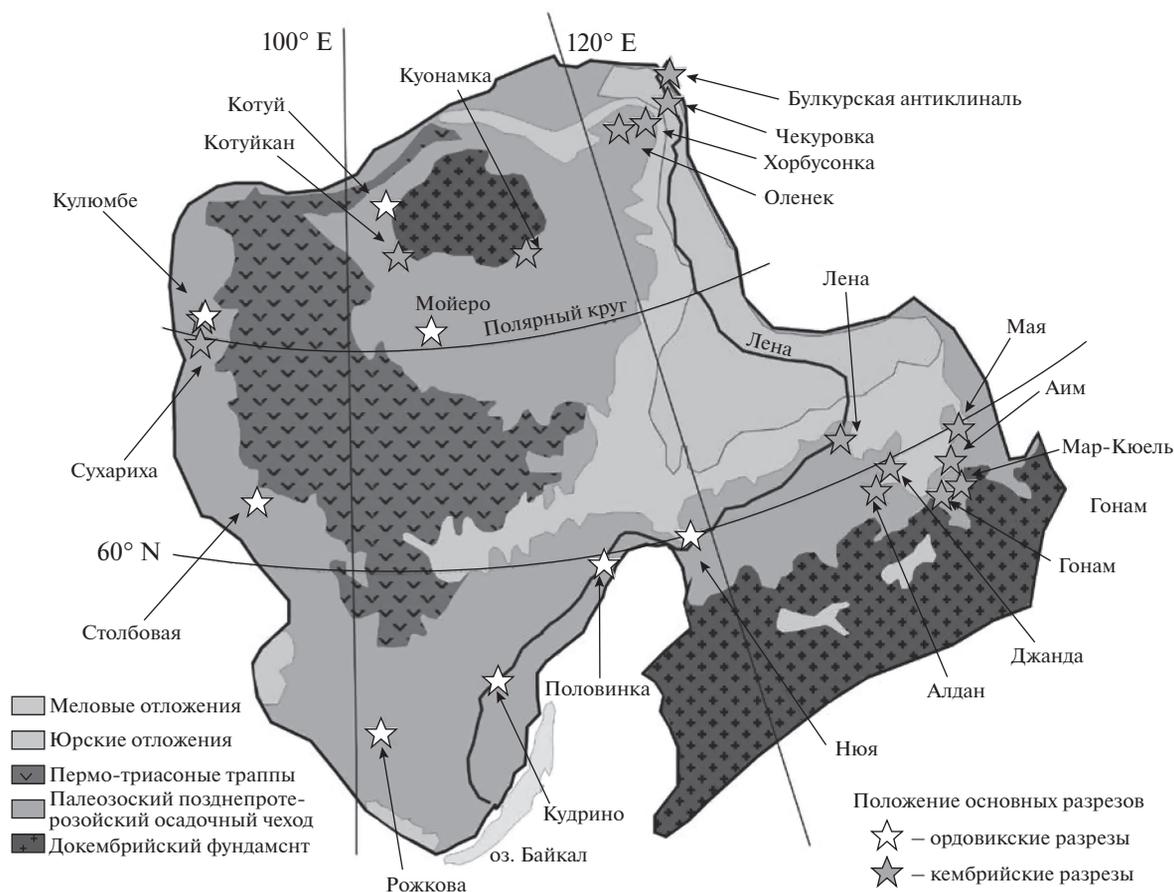


Рис. 1. Положение основных изученных разрезов.

МАГНИТОСТРАТИГРАФИЯ СРЕДНЕГО КЕМБРИЯ

Вплоть до конца 90-х годов 20 века практически единственным источником систематической информации о характере изменения полярности геомагнитного поля среднего кембрия являлись публикации сотрудников Палеомагнитной лаборатории ВНИГРИ, выполнивших под руководством А.Н. Храмов в 60–70-х и, отчасти, в 80-х годах ряд магнитостратиграфических исследований разрезов, расположенных в долинах рек Мая и Алдан, в верхнем и нижнем течении р. Оленек, в нижнем течении р. Лена [Храмов и др., 1974; Писаревский, 1986; Комисарова, Осипова, 1986; Осипова, 1988]. Наиболее интересными и информативными, как нам представляется, явились результаты, полученные по оленекским разрезам. В целом же, в результате пионерских работ, выполненных сотрудниками Палеомагнитной лаборатории ВНИГРИ, были найдены объекты, содержащие запись среднекембрийского геомагнитного поля, полученные данные, заложившие основы современных представлений о характере инверсионного процесса в середине первого периода фанерозойской истории. Дальнейшая ло-

гика исследований требовала более подробного изучения магнитостратиграфической записи, получения результатов, удовлетворяющих существенно возросшим требованиям к качеству данных, расширения географии работ.

В те же годы за рубежом был выполнен ряд исследований, целью которых, среди прочего, было получение магнитостратиграфической характеристики среднекембрийских разрезов, изучение характера изменения магнитного поля Земли в течение среднего кембрия. Следует признать, однако, что эти работы носили эпизодический и реконструктивный характер.

Результаты магнитостратиграфических исследований среднекембрийских пород Австралии (южная Австралия и бассейн Амадеус) были представлены, в частности, в статье [Klootwijk, 1980], опубликованной в 1980 г. В этой работе было отмечено, что изученные породы содержат довольно неоднозначную палеомагнитную запись, интерпретация которой сталкивается с определенными затруднениями. Более того, близкие по возрасту породы имеют разную магнитостратиграфическую характеристику, в частности, известняки Вирреальпа (*Wirrealpa limestones*), по-

роды свит Moodlatana и Valcorasana намагничены обратно, тогда как песчаники Pantapinna характеризуются частой сменой прямой и обратной полярности. С другой стороны породы верхней части свиты Giles Creek и нижней части свиты Shannon бассейна Амадеус намагничены обратно [Shergold, 1995].

На территории Северной Америки (Северная Аризона) Элстоном и Бресслером [Elston, Bressler, 1977] были изучены среднекембрийские песчаники Tareats амгинского возраста. В ходе этих исследований было показано, что изученные породы содержат древнюю стабильную намагниченность как прямой, так и обратной полярности, которая достаточно легко выделяется и, вероятно, является первичной. Нижняя и средняя часть свиты Tareats sandstones характеризуется смешанной полярностью (всего обнаружено более 12 интервалов полярности), тогда как верхняя часть намагничена преимущественно обратно.

В 1997 г. в *Geophysical Journal International* была опубликована статья Писаревского С.А. с соавторами [Pisarevsky et al., 1997], где были представлены результаты лабораторного переизучения коллекций, отобранных С.А. Писаревским и Е.Л. Гуревичем в начале 80-х годов в нижнем течении р. Оленек. Авторы этой работы не ставили, вероятно, своей целью детальное магнитостратиграфическое исследование оленекского разреза; главной задачей статьи, видимо, было получение ниже- и среднекембрийских полюсов Сибирской платформы, отвечающих современным требованиям надежности. Тем не менее, в этом исследовании авторы касаются также рассматриваемой нами в этом разделе темы и дают генеральную магнитостратиграфическую характеристику среднекембрийской части изученного разреза. Согласно этой характеристике в первой половине амгинского века и в самом начале майского века геомагнитное поле часто меняло свою полярность, в конце амгинского времени геомагнитное поле имело обратную полярность, а в середине майского времени – прямую. Важно отметить, что в этой работе, как и во всех предыдущих исследованиях, магнитостратиграфические данные не привязаны к биостратиграфической зональности исследуемых разрезов, что существенно ограничивает возможности использования этих данных для построения современного макета шкалы магнитной полярности.

Представляется, что работы, выполненные нами в конце 1990–начале 2000-х годов на опорных разрезах рек Кулюмбэ и Хорбусуонка явились началом нового этапа в изучении магнитостратиграфии среднего кембрия, этапом, характеризующимся значительно большей детальностью и привязкой полученных данных к биостратигра-

фическим зонам. Еще раз подчеркнем, что выполненные нами работы опираются на результаты масштабных исследований магнитостратиграфии палеозоя Сибирской платформы, проведенных ранее сотрудниками Палеомагнитной лаборатории ВНИГРИ, и являются, фактически, их продолжением.

К сожалению, до настоящего времени в мире не существует ни одного другого среднекембрийского разреза, чья магнитостратиграфия была бы изучена на сопоставимом уровне. Поэтому для составления макета среднекембрийской части магнитостратиграфической шкалы нижнего палеозоя мы можем в настоящий момент привлекать только данные, полученные по разрезам рек Кулюмбэ и Хорбусуонки. Запись магнитной полярности, полученная по этим разрезам, “покрывает” практически все биостратиграфические зоны, что позволяет получить достаточно полный сводный магнитостратиграфический разрез.

Однако при составлении сводного разреза мы сталкиваемся с трудностями, обусловленными некоторой неопределенностью в корреляции разрезов Кулюмбэ и Хорбусуонки. Эти трудности связаны с тем, что более древняя магнитостратиграфическая запись разреза реки Хорбусуонки кончается внутри зоны *A.limbataeformis*, тогда как основание более молодой записи разреза Кулюмбэ, только начинается внутри этой зоны. Ясно, что в данном случае, для точной корреляции разрезов необходимо привлекать средства, позволяющие проводить корреляцию на более детальном уровне, чем это допускает биостратиграфический метод. Для сопоставления этих разрезов нами были использованы хеостратиграфические данные, полученные А. Кучинским с соавторами (персональное сообщение).

Полученные ими изотопные кривые вместе с данными по магнитной стратиграфии показаны на рис. 2. Из сопоставления этих кривых ясно, что, несмотря на то, что верх Хорбусуонского разреза и низ Кулюмбинского относятся к одной и той же биостратиграфической зоне, они различаются и не перекрываются даже частично, т.е. между ними имеется некоторый, вероятно, небольшой стратиграфический перерыв. Соответственно, магнитостратиграфическая запись разреза Кулюмбэ должна помещаться в сводном разрезе выше магнитостратиграфической записи разреза р. Кулюмбэ. Этот вывод имеет большое значение для оценки частоты инверсий геомагнитного поля в среднем кембрии.

В заключение отметим, что результаты более поздних исследований среднего кембрия разреза р. Мая [Pavlov et al., 2008], цель которых состояла в получении современного палеомагнитного полюса среднего кембрия Алданского блока Сибирской платформы, демонстрируют наличие боль-

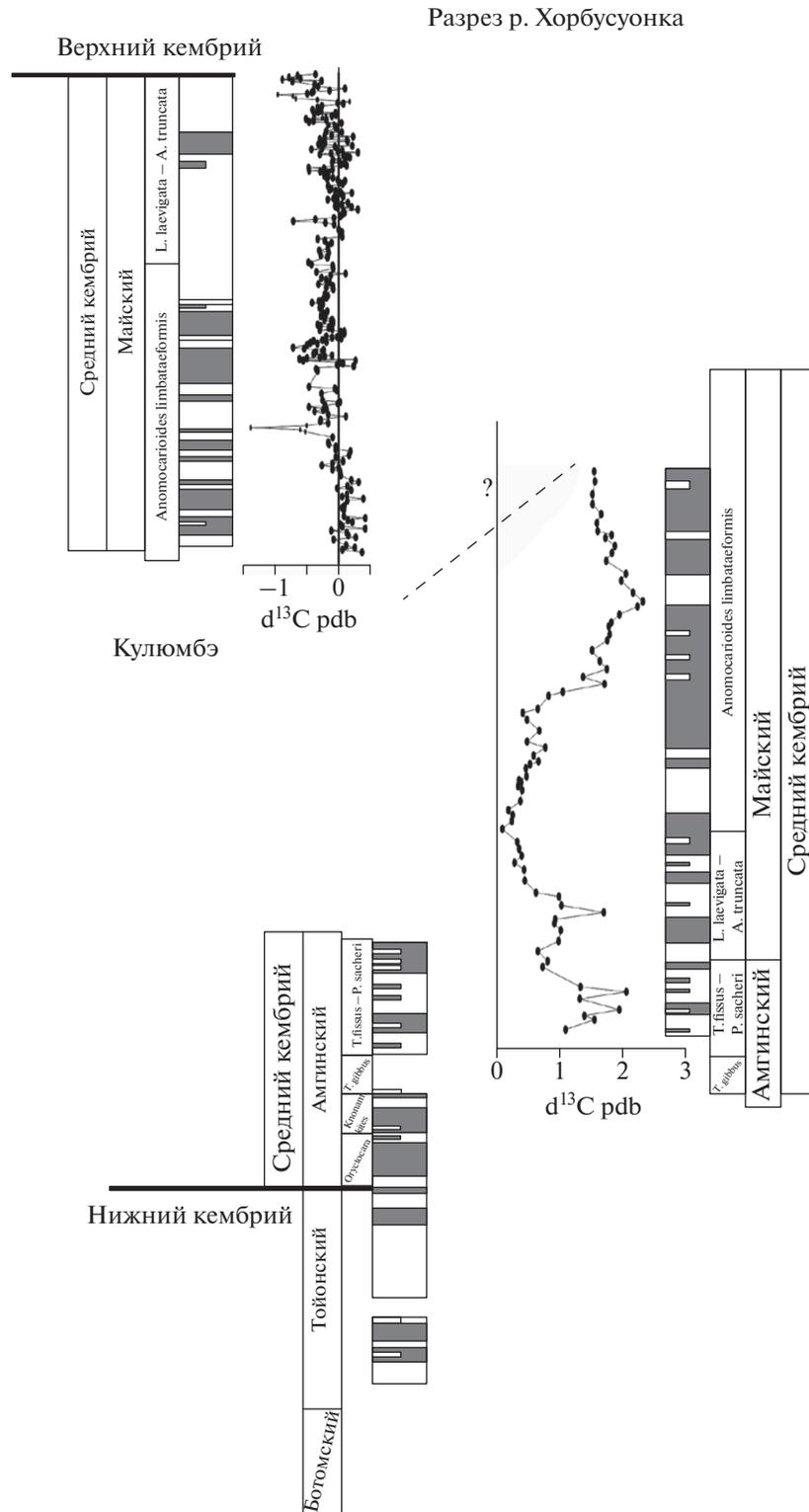


Рис. 2. Магнито- и хемотратиграфические характеристики среднего кембрия разрезов Кулюмбэ и Хорбусуонка. Здесь и далее черной заливкой показана прямая полярность, белой – обратная. Зоны полярности показаны согласно работе [Pavlov, Gallet, 2005]. Латинскими буквами обозначены биостратиграфические зоны.

шого числа зон магнитной полярности, что отлично согласуется с магнито-стратиграфическими

данными, полученными по разрезам Кулюмбэ и Хорбусуонка.

ПОЛЯРНОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОЗДНЕГО КЕМБРИЯ И ТРЕМАДОКА

В настоящее время в мире подробно изучена магнитостратиграфия трех важнейших опорных разрезов пограничных кембрийско-ордовикских отложений: разреза Блэк Маунтин (Black Mountain) в Австралии [Ripperdan, Kirschvink, 1992], разреза Даянчга (Dayangcha) в северо-восточном Китае [Ripperdan et al., 1993] и разреза Кулюмбэ на Северо-Западе Сибирской платформы [Gallet, Pavlov, 1998; Kouchinsky et al., 2008]. Важные данные по магнитной стратиграфии тремадока — раннего аренита опубликованы также авторами в статье [Yang et al., 2002], изучившими разрез Тангчан в Северном Китае. Информация, полученная при изучении всех этих объектов, может быть использована для построения сводного магнитостратиграфического разреза для переходного позднекембрийско-раннеордовикского интервала геологической истории.

Необходимым условием для успешного решения этой задачи является установление надежной биостратиграфической корреляции названных разрезов. Как отмечается в монографии [Розанов и др., 1992], три группы фауны — конодонты, граптолиты и трилобиты — являются основными при расчленении и корреляции пограничных кембро-ордовикских отложений. Возможности использования граптолитов существенно ограничены их практическим отсутствием в ряде крупнейших регионов. Трилобиты имеют исключительно важное значение при решении внутрирегиональных проблем, однако корреляция разных провинций только по трилобитам может привести и уже приводила к противоречивым результатам. Что же касается конодонтовых зональных шкал верхов кембрия и низов ордовика, то они практически тождественны во всех регионах мира, что делает их незаменимым и наиболее важным инструментом для планетарных корреляций.

Однако в то время как конодонтовая стратиграфия разрезов Black Mountain и Dayangcha разработана хорошо и подробно, имеющаяся на настоящий момент конодонтовая характеристика Кулюмбинского разреза достаточно бедна, что обусловлено, с одной стороны, ограниченным присутствием конодонтов в данном разрезе, с другой стороны, вероятно, недостаточной его (в этом направлении) изученностью. При этом разрез р. Кулюмбэ содержит многочисленные остатки трилобитов, подробно изученных А.В. Розовой [Розова, 1964; 1966] и коллективом под руководством А.В. Каныгина [Высоцкий и др., 1982].

Выходом из создавшегося положения является использование для корреляции названных разрезов южноказахстанского разреза Батырбай, еще недавно рассматривавшегося многими исследователями в качестве наиболее перспективного

кандидата на роль международного стратотипа границы кембрия и ордовика. Батырбайский разрез содержит одновременно богатые комплексы конодонтов и трилобитов, что позволяет использовать его в качестве промежуточного звена между австралийским и китайскими разрезами с одной стороны и разрезом р. Кулюмбэ с другой. Следует отметить, что корреляция разрезов лога Батырбай и реки Кулюмбэ не является тривиальной задачей, что связано со значительной эндемичностью кулюмбинских трилобитов и с ограниченным числом находок конодонтов. Тем не менее, усилиями А.В. Розовой [Розова, 1986] и С.В. Дубининой [Дубинина, 2000] эта корреляция выполнена, и ее результаты отражены на рис. 3. Здесь же показана корреляция разрезов Tangchan, Black Mountain и Dayangcha между собой и с разрезом лога Батырбай. Поскольку биостратиграфическая корреляция рассматриваемых разрезов строится путем их сравнения с разрезом Батырбай, естественно, поэтому, выбрать конодонтовую шкалу этого разреза в качестве основы для построения сводного магнитостратиграфического разреза. Отметим, что, насколько нам известно, попытка магнитостратиграфического изучения разреза Батырбай была предпринята Р. Рипперданом в самом начале 90-х годов. Однако, судя по полному отсутствию в течение прошедших лет каких-либо публикаций на эту тему, надо полагать, что эта попытка окончилась неудачей.

Выполненная биостратиграфическая корреляция изученных опорных разрезов является основой для их магнитостратиграфической корреляции (рис. 4). Наша задача облегчается тем обстоятельством, что такая работа уже выполнена для разрезов Даянчга и Блэк Маунтин [Ripperdan, Kirschvink, 1992].

Во всех изученных разрезах (за исключением разреза Тангчан) достаточно уверенно определяется положение основания конодонтовой зоны *Cordilodus proavus*. Вблизи этого уровня во всех разрезах наблюдается смена магнитной полярности от прямой к обратной. Далее вверх по разрезам повсеместно наблюдается довольно мощный интервал обратной полярности, внутри которого в разрезе Блэк Маунтин фиксируется два коротких эпизода обратной полярности. Далее, вплоть до основания зоны *Cordylodus angulatus*, в магнитостратиграфической записи господствует прямая полярность.

В начале зоны *Cordylodus angulatus* в разрезах Блэк Маунтин и Тангчан наблюдается обратноманмагнитный интервал, который, казалось бы, было естественно сопоставить с обратным намагнитенными породами самых верхов нийского горизонта разреза Кулюмбэ. Однако, согласно С.В. Дубининой [Дубинина, 2000], верхняя граница нийского региоюра близка основанию зо-

Корреляция верхнекембрийских–нижнеордовикских разрезов

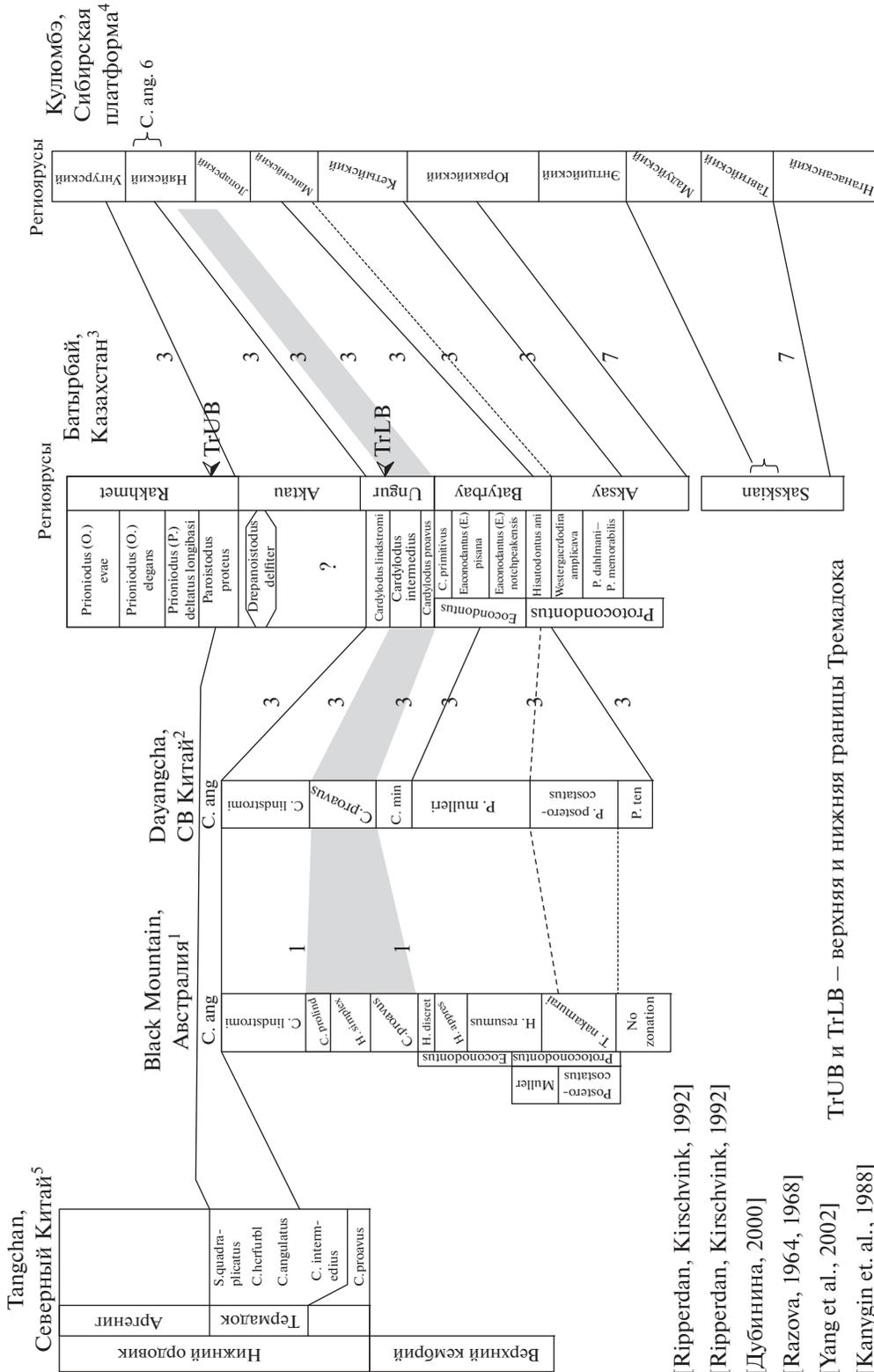


Рис. 3. Корреляция верхнекембрийских и нижнеордовикских разрезов.

- 1 – [Rippretdan, Kirschvink, 1992]
- 2 – [Rippretdan, Kirschvink, 1992]
- 3 – [Дубинина, 2000]
- 4 – [Razova, 1964, 1968]
- 5 – [Yang et al., 2002]
- 6 – [Kalygin et al., 1988]
- 7 – [Розанов и др., 1992]

TrUB и TrLB – верхняя и нижняя границы Тремадока

ны *D.delfiter*. Если так, то можно ожидать, что верхи нийского яруса соответствуют, скорее, зоне *S.herfurhi*, отвечающей интервалу, который разделяет *S.angularatus* и *D.delfiter*, а не зоне *S.angularatus*. Слои же, отвечающие зоне *S.angularatus*, должны лежать несколько ниже, возможно где-то в основании верхней трети нийского горизонта, где, согласно автором работы [Kanugin et al., 1988], были найдены эти конодонты. Поскольку в этой части Кулюмбинского разреза мы не наблюдаем обратно намагниченного интервала, мы должны допустить, что по той или иной причине (локальный размыв, локальное отсутствие палеомагнитной записи, локальное перемагничивание) этот интервал нами пропущен.

На сводном разрезе интервал обратной полярности, отвечающий (по крайней мере) низам зоны *S.angularatus*, помещен выше зоны *S.lindstromi* и ниже зоны *D.delfiter* между интервалами нормальной полярности $H+$ и $I+$.

Интервал $I+$ сводного разреза мы сопоставляем с полузоной прямой полярности разреза Тангчан $I+$, расположенной в верхней части *S.angularatus*-нижней части *S.herfurhi* и верхней частью интервала прямой полярности нийского горизонта.

Верхняя часть сводного разреза опирается на данные, полученные по разрезу Тангчан, где за исключением полуинтервала прямой полярности, расположенного на границе *S.herfurhi* и *S.quadruplicatus*, все слои намагничены обратно. С этими данными хорошо согласуется не приведенная на рисунке магнитостратиграфическая запись переходной тремадок-аренигской части разреза Мойеро. Отметим, что названный полуинтервал является последним указанием на существование поля прямой полярности перед наступлением длительного интервала господства обратной полярности в арениге, лланвирне и начале лландейло.

Теперь рассмотрим ту часть сводного разреза, которая расположена ниже зоны *S.proavus*. Следующий (вниз) более или менее надежный био-стратиграфический корреляционный уровень соответствует положению в разрезах основания зоны *P.muelleri*. Этот уровень в разрезе Батырбай проходит в середине зоны *Hsutodontus ani*, который, в свою очередь, отвечает верхам мансийского горизонта разреза Кулюмбэ. Сразу же над этим корреляционным уровнем в разрезах отмечаются обратно намагниченные породы, затем повсеместно присутствует “прямой” интервал $D+$. Затем идет интервал пород, намагниченных обратно. Этот интервал имеет относительно большую мощность в разрезе Блэк Маунтин, меньшую в разрезе Даянча, и относительно невелик в кулюмбинском разрезе. Ясно, что различную относительную мощность этого интервала легко можно объяснить различными скоростями накопления исследуемых отложений. Под основанием зоны

Cordylodus proavus во всех трех разрезах наблюдается относительно мощный, прямо намагниченный интервал $F1+–F3+$, рассекаемый в разрезе Блэк Маунтин заметным интервалом обратной полярности.

Нижняя часть мансийского горизонта сопоставляется с нижней частью разреза Даянча, где прямо намагниченному кулюмбинскому интервалу $V+$ соответствуют два относительно непродолжительных интервала прямой полярности $V1+–V3+$.

Исходя из этих корреляций для пограничных венд-кембрийских отложений, нами предлагается сводный магнитостратиграфический разрез, представленный на рис. 4. Нижняя часть этого разреза построена исключительно на основе данных по разрезу р. Кулюмбэ, поскольку других данных о магнитостратиграфии пород этого возраста в мире не имеется.

В заключении этого раздела коснемся вкратце вопросов о положении границ кембрия и ордовика, тремадока и аренига. Эти вопросы всегда вызывали горячие дискуссии и имеют длительную историю (для обзора см. [Розанов и др., 1992; Дубинина, 2000]). Несмотря на достаточно убедительные аргументы в пользу проведения границы кембрийской и ордовикской систем по основанию либо *S.proavus*, либо *S.lindstromi* zone, Международная рабочая группа при Комиссии по стратиграфии Международного союза Геологических наук приняла решение о проведении этой границы по уровню первого появления конодонтов *Iapetognastus n.sp.* [Geological ..., 2012]. Этот уровень проходит чуть выше основания зоны *S.lindstromi* и далее будет использоваться в настоящей работе как официальная граница кембрийской и ордовикских систем.

Граница тремадока и вышележащего “second stage” официальной шкалы (в нижней своей части совпадающего с аренигом) официально принята на уровне первого появления граптолита *Tetragnostus approximatus* в шведском разрезе Дябазбротест. Этот уровень примерно отвечает верхней трети конодонтовой шкалы *Paroistodus proteus*.

Таким образом, выполненная корреляция магнитостратиграфических разрезов Кулюмбэ, Даянча, Тангчан и Блэк Маунтин позволила получить сводный магнитостратиграфический разрез, описывающий характер изменения полярности геомагнитного поля, начиная с границы среднего и позднего кембрия и кончая началом аренига (рис. 4).

ПОЛЯРНОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ АРЕНИГА И ЛЛАНВИРНА

В ходе детального магнитостратиграфического исследования аренига и лланвирна опорного разреза р. Мойеро, характеризующихся довольно высокими для платформы мощностями и хорошим качеством палеомагнитного сигнала, нами не было обнаружено ни одного интервала прямой полярности [Gallet, Pavlov, 1996]. Все образцы, в которых при лабораторной обработке удалось выделить характеристическую намагниченность, были намагничены только обратно. Такой характер магнитостратиграфической записи мог быть обусловлен либо полным перемагничиванием рассматриваемых пород, либо тем, что геомагнитное поле в арениге и лланвирне практически не испытывало инверсий и не меняло своей полярности. В той же статье были приведены данные, которые противоречили гипотезе перемагничивания рассматриваемых пород и таким образом указывали на то, что полученная магнитостратиграфическая запись действительно свидетельствует о крайне низкой, если не нулевой, частоте инверсий магнитного поля Земли в арениге и лланвирне.

Для проверки этого вывода нами были выполнены подробные исследования лланвирна другого важного опорного разреза Сибири, выходящего на поверхность в долине р. Кулумбэ (гурагирская свита). Около сотни образцов, равномерно представляющих более, чем 160-метровую толщу гурагирской свиты, содержат древнюю, вероятно первичную намагниченность только обратной полярности и таким образом, полностью подтверждают результат, полученный по разрезу р. Мойеро [Pavlov, Gallet, 1998].

Этот результат достаточно хорошо согласовывался с данными, полученными нашими скандинавскими коллегами, изучавшими магнитостратиграфию шведских ордовикских известняков (Västergötland, [Torsvik, Trench, 1991a]), что позволило нам выдвинуть гипотезу о существовании нижне-среднеордовикского суперхрона обратной полярности, в течение которого магнитное поле Земли практически не испытывало инверсий.

Работа, выполненная по известнякам Orthoceras Ленинградской области [Smethurst et al., 1998], явилась новым независимым подтверждением нашей гипотезы. При этом важно отметить, что если в аренигской части магнитостратиграфической записи совпадение результатов по Мойеро, Швеции (разрезы в районах Oland, Oster-Gotland, Dalarna, Jamtland, Vaster-Gotland, Scane) и Ленинградской области (р. Тосна) было абсолютным, то в лланвирнской части имелись некоторые различия, выразившиеся в присутствии маломощного интервала прямой полярности в средней части лланвирнского разреза.

Наличие зоны прямой полярности в разрезах Gullhogen и Hallekis подтверждается крайне малым числом образцов, характеризующихся низким качеством палеомагнитного сигнала. Однако, что важно, именно на том же возрастном уровне (граница Кунда-Азери) в разрезе ордовика р. Тосна Сметарсом с соавторами [Smethurst et al., 1998] был также обнаружен маломощный интервал прямой полярности, и, таким образом, существование зоны прямой полярности в середине лланвирна как будто бы получило независимое подтверждение.

Однако при детальном рассмотрении стратиграфии разреза реки Тосна [Wogogob ..., 1997] оказывается, что граница Кунда-Азери (середина лланвирна) здесь отсутствует и верхняя часть разреза, где указано положение интервала прямой полярности, находится вблизи границы Волхов-Кунда, т.е. соответствует, скорее, середине аренига, а не лланвирна. Следовательно, взаимосогласованность скандинавских и ленинградских данных относительно среднелланвирнского эпизода прямой полярности оказывается кажущейся, а само существование этого эпизода остается требующим дополнительных доказательств. С другой стороны, подробные исследования верхов волховского, кундасского и низов азеринского горизонтов западной части Балтийского глинта (разрезы на р. Ламашка и около д. Широково) и восточной части Ладожского глинта (разрез на р. Лынна) указывают на абсолютное преобладание геомагнитного поля обратной полярности в течении лланвирна [Лубнина и др., 2003].

Отдельного обсуждения требует факт наличия прямой полярности (зон N1 и N2) в позднеаренигских-раннелланвирнских известняках Holen карьера Gullhogen [Torsvik et al., 1995a]. Образцы, отвечающие этим зонам (12 образцов с 6 стратиграфическими уровнями – зона N1 и 2 образца с 1 стратиграфическим уровнем – зона N2) демонстрируют присутствие древней компоненты прямой полярности, чье среднее направление значительно отличается от соответствующего среднего направления прямой намагниченности вышележащих известняков лландейло и карадока. При сравнении со средним направлением обратной намагниченности близких по возрасту слоев известняков Holen оказывается, что сравниваемые направления резко отличаются от антиподальности, различаясь по склонению (при инверсии одного из них) на величину порядка 60°. В качестве одного из объяснений возможных причин аномального направления выделенных векторов прямой полярности зон N1 и N2 авторы предлагают рассмотреть возможность недипольного поведения геомагнитного поля на соответствующих временных интервалах. Такое объяснение представляется малообоснованным, во-первых, потому что подобное явление не встречено ни в одном

из других изученных разрезов этого возраста; во-вторых, потому что в рассматриваемом разрезе “недипольность” странным образом проявилась только на “прямых” направлениях, не затронув обратные; в-третьих, потому, что полученное среднее дает полюс ($Plat = -8^\circ$, $Plong = 352^\circ$), довольно близкий к позднеордовикскому и раннесилурийскому полюсам Балтики (соответственно $Plat = -19^\circ$, $Plong = 352^\circ$ и $Plat = -6^\circ$, $Plong = 6^\circ$), что указывает на возможность более простого объяснения наблюдаемых аномальных направлений. Метахронная намагниченность разного возраста широко распространена в нижне-среднеордовикских известняках региона [Smethurst, 1998; Torsvik et al., 1995a; и др.], что косвенно поддерживает возможность объяснения наблюдаемых аномальных направлений через перемагничивание. Впрочем, справедливости ради надо сказать, что такое объяснение не исключают и сами авторы работы [Torsvik et al., 1995a].

Таким образом, в целом, результаты магнитостратиграфических исследований аренига и лланвирна Восточно-Европейской платформы хорошо согласуются с гипотезой суперхрона (рис. 5). В то же время в некоторых Восточно-Европейских разрезах этого возраста имеются отдельные указания на возможность существования в это время отдельных прямо намагниченных зон. Учитывая крайне конденсированный характер европейских разрезов (мощность которых составляет первые метры), наличие в них таких зон может указывать на существование в течение аренига-лланвирна значительных интервалов прямой полярности, что может привести либо к существенной корректировке гипотезы, либо даже к ее отклонению. Несмотря на явно недостаточную обоснованность существования таких зон (шумный палеомагнитный сигнал, крайне малое число образцов, единичные, несоответствующие друг другу стратиграфические уровни, возможность перемагничивания позднейшим полем), эти данные представляли определенный вызов гипотезе третьего фанерозойского суперхрона и требовали постановки дополнительных исследований магнитостратиграфии лланвирна.

Эти исследования были проведены на одном из лучших опорных разрезов юга Сибирской платформы, расположенного в среднем течении р. Ангары вблизи бывшей деревни Рожкова. Полученные результаты (рис. 5, [Павлов и др., 2012]) снова подтвердили абсолютное, если не полное, преобладание обратной полярности на протяжении аренига и лланвирна.

Через несколько лет, после наших исследований ордовика р. Кулюмбэ, на этом же разрезе работали наши коллеги В.П. Родионов и Е.Л. Гуревич [Родионов, Гуревич, 2010]. В этой работе значительное внимание было уделено аренигской

части разреза, которую, из-за темных тонов слагающих ее пород мы посчитали неперспективной для наших исследований, и поэтому не изучали. Однако результаты, полученные В.П. Родионовым и Е.Л. Гуревичем, показали, что значительная часть аренига разреза р. Кулюмбэ содержит в себе вполне интерпретируемый палеомагнитный сигнал, который показывает, что полярность геомагнитного поля на протяжении всего аренига была обратной. В самой нижней части аренига Кулюмбэ В.П. Родионовым и Е.Л. Гуревичем были обнаружены два образца, несущие, возможно, следы древней компоненты прямой полярности. Эти образцы, однако, разделены интервалом, намагниченным в обратной полярности, и характеризуются крайне шумным палеомагнитной записью. Нельзя исключить, что компонента намагниченности, принятая в этих образцах за первичную компоненту прямой полярности, на самом деле является метахронной компонентой перемагничивания, связанной с траппами, широко развитыми в этом районе. Очевидно, что существование этих полужон еще требуется доказать. Как бы то ни было, в основном и в целом, результаты В.П. Родионова и Е.Л. Гуревича блестяще согласуются с гипотезой третьего фанерозойского суперхрона.

Работа, опубликованная недавно [Grappone et al., 2017], явилась новым независимым подтверждением существования ордовикского суперхрона обратной полярности, названного нами суперхрон Мойеро [Pavlov, Gallet, 2006]. В этой работе авторы изучили магнитостратиграфию ордовикских известняков Эстонии и показали, что согласно их данным на протяжении позднего аренига, лланвирна и начальной стадии лландейло магнитное поле Земли имело обратную полярность.

ПОЛЯРНОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛЛАНДЕЙЛО

Магнитостратиграфия основных изученных разрезов лландейло представлена на рис. 6. В большинстве случаев эти данные основаны на прямом выделении компонент намагниченности, однако иногда (например, в разрезе р. Столбовой) сведения о полярности намагниченности были получены исходя из анализа тенденций смещений векторов естественной остаточной намагниченности в процессе чистки. В последнем случае определенный вывод о полярности намагниченности делался только тогда, когда соответствующий вектор обрисовывал на стереограмме в ходе чистки совершенно недвусмысленный круг перемагничивания, проходящий через область ожидаемого направления и подтвержденный четырьмя, пятью и более точками.

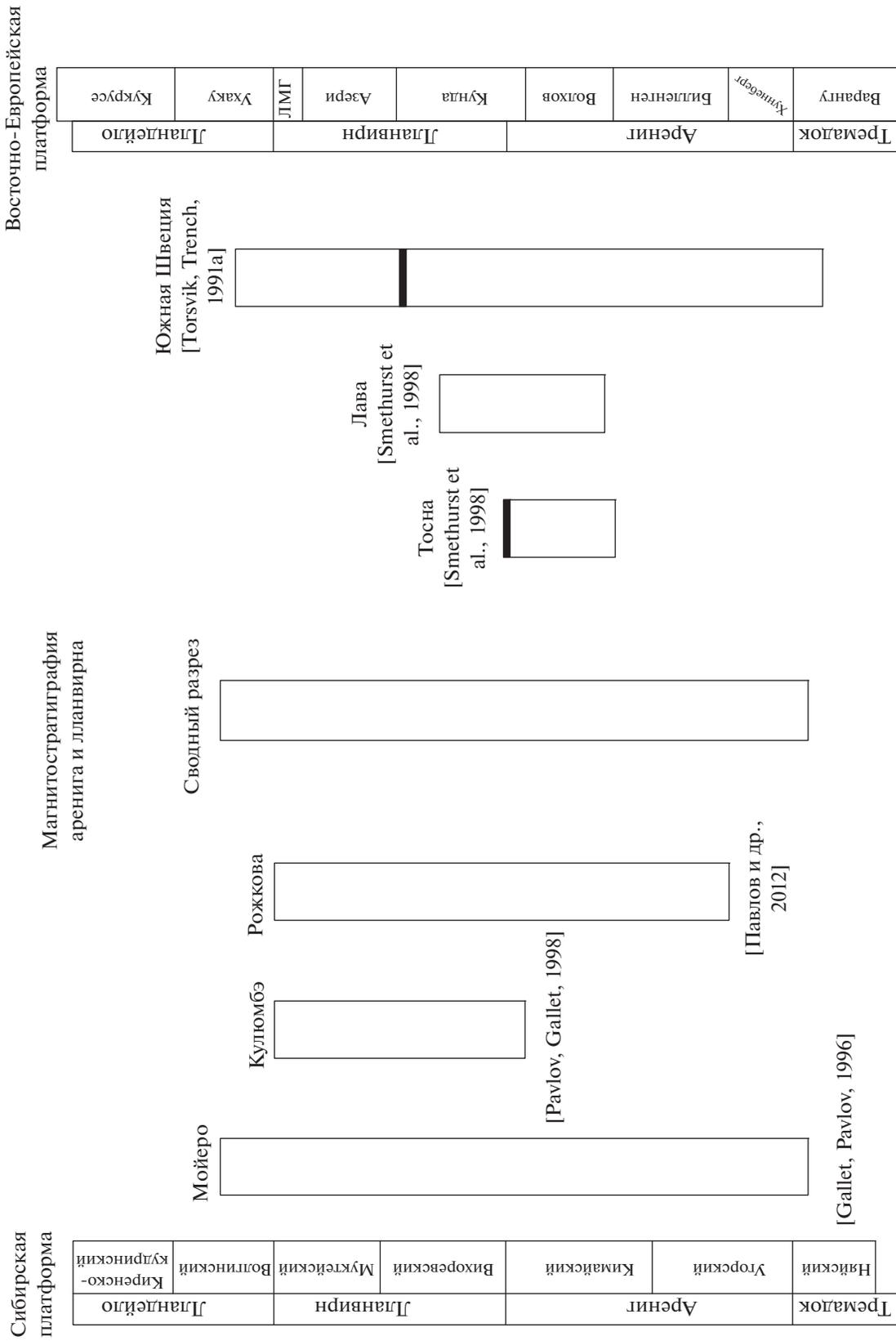


Рис. 5. Магнитостратиграфия arenas и лланвирна.

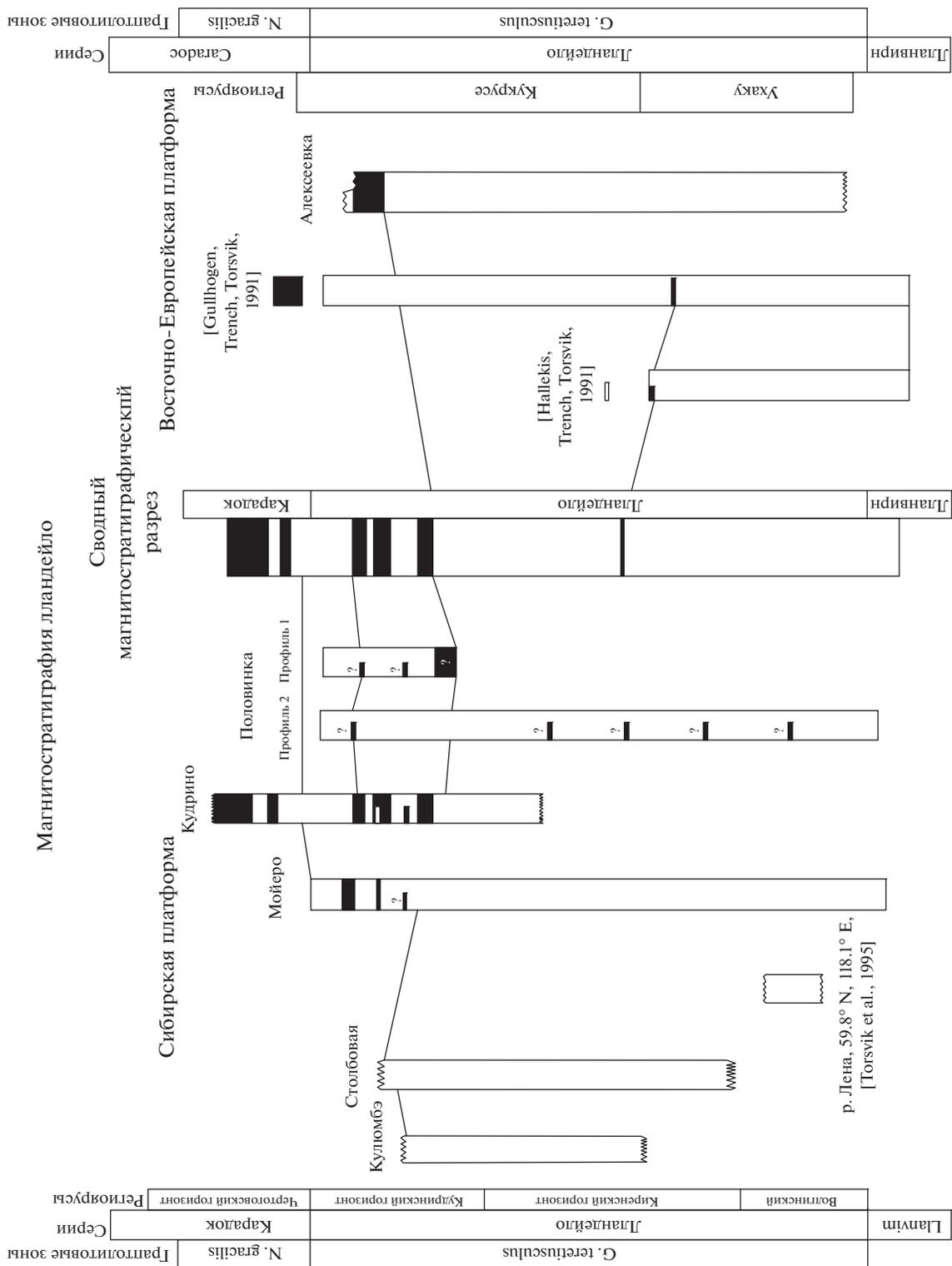


Рис. 6. Магнитостратиграфия лландейло. Зоны магнитной полярности показаны согласно [Pavlov et al., 2008].

Наиболее важная и яркая особенность полученных нами магнитостратиграфических данных состоит в том, что во всех изученных разрезах Сибирской платформы мы видим существенное преобладание обратной полярности в нижних 2/3 лландейло, практически, не отмечая, при этом, каких-либо направлений прямой полярности, которые могли бы быть проинтерпретированы как первичные. Имеется несколько отдельных образцов из волгинского и кудринского горизонтов разреза Половинка, которые, как будто, указывают на присутствие характеристических компонент нормальной полярности. Однако, как это было показано в работах [Павлов и др., 1999; Powerman et al., 2013], имеются серьезные основания рассматривать эти компоненты как следы позднейшего (раннедевонского – [Powerman et al., 2013]) перемагничивания, широко распространенного в нижнепалеозойских отложениях долины р. Лены. Никаких проявлений прямой полярности (за исключением самых верхних горизонтов) мы не находим также в магнитостратиграфической записи разреза Алексеевка. Однако в работах [Torsvik, Trench, 1991a; b], исследуя разрезы ордовика Швеции, нашли в средней части лландейло один прямо намагниченный образец в разрезе Hallekis и несколько прямо намагниченных образцов, взятых с двух стратиграфических уровней в карьере Gullhogen. Поэтому, также как и авторы работы [Trench et al., 1991] мы включаем этот интервал прямой полярности в сводную магнитостратиграфическую схему лландейло, отмечая, однако, вслед за авторами работы [Torsvik, Trench, 1991a], что новые детальные исследования необходимы для подтверждения реальности его существования.

Магнитостратиграфическая запись, полученная по разрезу Кудрино, недвусмысленно указывает на присутствие в верхней части лландейло трех интервалов прямой полярности. Существование зон прямой полярности в верхней части лландейло также поддерживается данными магнитостратиграфических исследований разрезов Мойеро, Половинка и Алексеевка. Независимо от того, было ли в конце лландейло таких интервалов три или больше, ясно, что этот период в истории магнитного поля Земли знаменуется завершением абсолютного преобладания обратной полярности, длившегося с конца тремадокского времени [Pavlov, Gallet, 1998], т.е. в течение времени порядка 20 млн лет.

Разрез Кудрино дает также информацию о полярности начала карадока. Через некоторый, относительно небольшой интервал времени, после лландейло-карадокской границы, геомагнитное поле изменяет свою полярность от обратной к прямой. Однако состояние геомагнитного поля прямой полярности длится недолго и сменяется несколько более продолжительным состоянием обратной полярности, вслед за которым следует

еще более продолжительный интервал прямой полярности. Несколько подробнее на характере изменения полярности геомагнитного поля карадока мы остановимся ниже, здесь же мы лишь отметим, что магнитостратиграфическая запись пограничного лландейло-карадокского интервала Сибири в целом неплохо согласуется с таковой, полученной по шведскому разрезу Gullhogen.

ПОЛЯРНОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КАРАДОКА И АШГИЛЛА

В ходе проведенных работ нами были выполнены магнитостратиграфические исследования опорных разрезов верхнего ордовика Сибирской платформы (чертовский, баксанский, нирундинский, долборский горизонты), расположенных в долинах реки Подкаменная Тунгуска и ее притоков рек Б. Нирунда, Чунку, Столбовая [Москаленко и др., 1978]. Все изученные разрезы оказались практически полностью перемагничены траппами, широко распространенными в этом регионе. Даже красноцветные, внешне почти не измененные слои карбонатно-глинистых пород нирундинского горизонта, опробованные в долине среднего течения р. Б. Нирунда, содержали только трапповую компоненту намагниченности.

Породы долборского горизонта, отвечающего нижнему ашгиллу, были опробованы нами в долине р. Правый Мойерокан (приток р. Мойеро), где примерно в трети образцов нам удалось зафиксировать присутствие древней компоненты, имевшей во всех случаях нормальную полярность. Чертовский горизонт, отвечающий нижнему карадоку, как об этом уже говорилось выше, был изучен нами в обнажениях долин рек Лены (Кудрино) и Ангары (Рожкова).

К сожалению, перечисленными разрезами практически ограничивается список верхнеордовикских разрезов Сибирской платформы, имеющих в той или иной степени надежную биостратиграфическую характеристику, т.е. разрезов, вывод о возрасте которых опирается на надежно установленные фаунистические находки, представляющие остатки организмов, являющихся руководящими для данного возрастного уровня.

В ряде магнитостратиграфических исследований [Храмов и др., 1974; Torsvik et al., 1995b] прошлых лет в качестве верхнеордовикских рассматриваются породы макаровской свиты и коррелируемые с ними отложения среднего и верхнего течения р. Лены. Однако данные изучения конodontов и остракод указывают на вероятный кудринский (т.е. среднеордовикский) возраст этих толщ [Каныгин и др., 1989]. В целом же, авторы монографии [Каныгин и др., 1989] указывают на то, что палеонтологически обоснованных отложений ордовика выше чертовского уровня в Лен-

ской фациальной области не установлено. Таким образом, “верхнеордовикские” магнитостратиграфические данные из этого региона не могут быть использованы для разработки шкалы магнитной полярности.

Несколько лет назад в верхнеордовикских красноцветных отложениях краснокаменной свиты, обнажающейся в нижнем течении р. Нюя, авторы работы [Berger et al., 2007] обнаружили конодонты *Drepanodistacodus victrix* Mosk. и *Acanthodina regalis* Mosk. Эти конодонты ограничивают возраст свиты поздним карадоком – ашгиллом. Опробование краснокаменной свиты на разных стратиграфических уровнях показало, что ее породы намагничены исключительно в прямой полярности [Powerman et al., 2013].

Важно отметить, что сохранившихся осадочных разрезов верхнего ордовика в мире крайне мало, что, вероятно, связано со значительным падением уровня моря, имевшим место в конце ордовикского периода. Одним из таких уникальных объектов является разрез Хонделен, расположенный непосредственно за пос. Хонделен, в западной части Тувы. В этом разрезе на поверхность выходят верхнеордовикские (ашгильские) зеленовато-серые и красные алевролиты, песчаники, мергели и доломиты хонделенской свиты (94 м), которые стратиграфически согласно сменяются алашской свитой лландоверийского возраста. Из верхнеордовикской части разреза нами было отобрано 43 образца с интервалом отбора в среднем 1.5–2.5 м. Результаты этих исследований представлены в работе [Bachtadse et al., 2000] и показывают присутствие древней намагниченности исключительно прямой полярности.

Важное значение для изучения полярности геомагнитного поля в позднем ордовике имеют результаты палеомагнитных исследований верхнего ордовика отложений Северного Тянь-Шаня, выполненных М.Л. Баженовым с соавторами. Данные по ашгильским породам свиты Ботмойнак поддерживают вывод, вытекающий из анализа сибирских и тувинских данных, о существенном преобладании в ашгилле нормальной полярности, а данные по разрезу Толук (верхний карадок) дополняют и усиливают вывод о том, что геомагнитное поле карадока характеризовалось относительно частой сменой полярности.

Как следует из данных, полученных по чертовскому горизонту разреза Кудрино, карадокское время начинается эпохой прямой полярности, вслед за которой идет чередование нескольких периодов прямой и обратной полярности, с возможным преобладанием нормальной полярности. На последнее, по всей видимости, указывают результаты, полученные по разрезам Gullhogen (Швеция, [Torsvik, Trench, 1991b]) и Алмалы (Тянь-Шань [Vazhenov et al., 2003]).

В течение позднего карадока (разрез Толук [Vazhenov et al., 2003]) поле также несколько раз меняет свою полярность. В общей сложности в течение карадока (~9 млн лет) произошло не менее 15–17 инверсий геомагнитного поля (рис. 7). В последующие несколько миллионов лет, вплоть до конца ордовикского периода, существенно преобладало поле прямой полярности. Установление этого интервала прямой полярности произошло либо в начале ашгильского времени, либо в самом конце карадока.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ГРАНИЦЫ ДОКЕМБРИЯ И ФАНЕРОЗОЯ

В последние два десятилетия выполнена широкая программа исследований важнейших опорных разрезов нижнего кембрия и верхнего венда Сибири, в ходе которой изучено более 3000 образцов из многих десятков обнажений Северо-Запада, Севера, Северо-Востока, Юго-Востока, Юга и Юго-Запада Сибирской платформы. В результате выполненных исследований показано, что палеомагнитная запись нижнекембрийских и позднеэдиакарских пород Сибирской платформы имеет аномальный характер, а именно: в ней часто присутствуют две существенно различающиеся по направлению компоненты намагниченности, ни одна из которых не может рассматриваться как метакронная. Напротив, вся совокупность имеющихся данных указывает на то, что эти компоненты образовывались во время накопления пород или вскоре после. При этом, первая компонента – KHR-монополярна, отвечает палеомагнитному полюсу, расположенному к югу от Австралии и лежащему в основании сибирской фанерозойской кривой кажущейся миграции полюса; вторая компонента – KRS-биополярна, характеризуется частой сменой полярности, соответствует палеомагнитному полюсу, расположенному в западной части Индийского океана на значительном удалении от среднекембрийских полюсов Сибирской платформы.

Необычный характер палеомагнитной записи в раннекембрийских и эдиакарских породах отмечается в различных регионах земного шара [Abrajevitch, Van der Voo, 2010] и никак не согласуется с представлением об исключительно аксиально дипольном характере палеомагнитного поля соответствующего времени.

Для объяснения наблюдаемой палеомагнитной записи нами была предложена гипотеза [Павлов и др., 2004; 2018] согласно которой геомагнитное поле на границе докембрия и кембрия имело аномальный характер и характеризовалось наличием двух квазистабильных режимов генерации, поочередно сменяющих друг друга. Согласно этой гипотезе, магнитное поле Земли на гра-

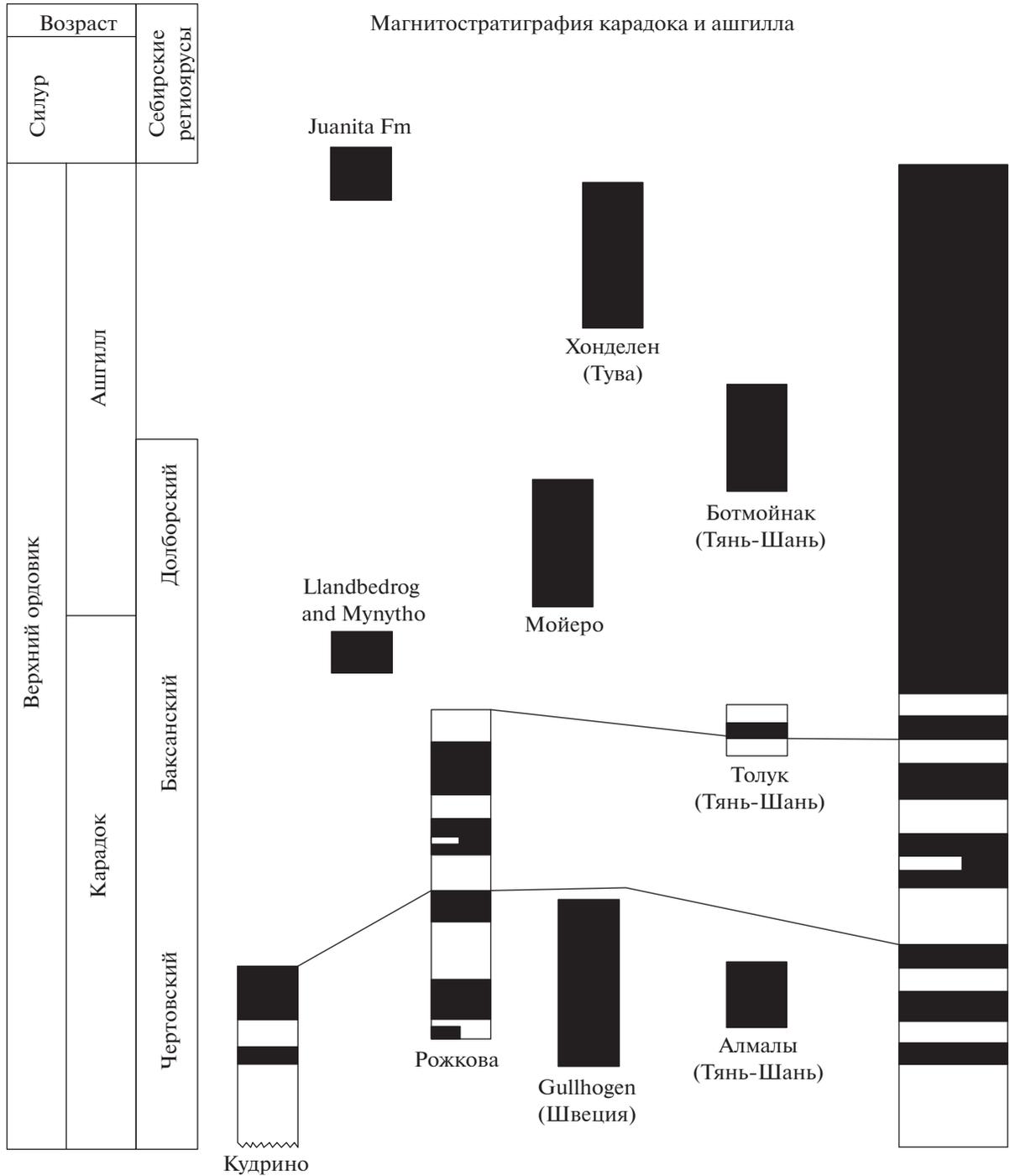


Рис. 7. Магнитостратиграфия карадока и ашгилла. Зоны полярности для разрезов Тянь-Шаня показаны согласно работе [Bazhenov et al., 2003]; для разрезов Juanita и Llandbedrog – согласно работе [Opdyke, Channel, 1996]; для разреза Хонделен – согласно работе [Bachtadse et al., 2000]; для разреза Кудрино – согласно работам [Pavlov et al., 2008; Gallet, Pavlov, 1996]; для разреза Рожкова – согласно работе [Павлов и др., 2013].

нище докембрия и кембрия может быть описано чередованием продолжительных периодов господства аксиального дипольного поля преимущественно одной полярности, записанного в виде компоненты KHR, перемежающегося с относительно кратковременными эпохами преоблада-

ния инверсирующего близэкваториального или среднеширотного диполя, записанного в виде компоненты KRS.

Подробно эта и близкие ей гипотезы рассматривались в ряде работ (см., напр., [Павлов и др.,

2018]), здесь же мы хотим только еще раз подчеркнуть, что такое поведение поля не противоречит физическим законам и, более того, существует как одно из возможных решений при рассмотрении численных моделей геодинamo при различных параметрах. В работе [Gissenger et al., 2012] показано, что такое состояние поля может быть реализовано в случае нарушения экваториальной симметрии теплового потока на границе ядро–мантия. В работе [Driscoll, 2016] аномальное поведение поля с близкими характеристиками могло непосредственно предшествовать началу формирования твердого ядра Земли.

В рамках настоящей работы важно, что накануне и в самом начале фанерозоя (в раннем кембрии) могло существовать поле, поведение которого не вписывалось в стандартные представления о чередовании аксиально-дипольных состояний прямой и обратной полярности. Следовательно, при построении шкалы магнитной полярности раннего палеозоя нам не остается ничего другого, как обозначить нижнекембрийский интервал этой шкалы как аномальный (см. рис. 8).

МАКЕТ ШКАЛЫ МАГНИТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ ДЛЯ РАННЕГО ПАЛЕОЗОЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОНЦЕ ВЕНДА, В КЕМБРИИ И ОРДОВИКЕ

Данные, полученные нами в ходе многолетних исследований магнитной стратиграфии опорных разрезов нижнего палеозоя, а также результаты наших коллег, опубликованные в последние годы, позволяют предложить новый макет шкалы геомагнитной полярности раннего палеозоя (рис. 8). Предлагаемый макет отражает существенное (по сравнению с ранее опубликованными шкалами) развитие наших представлений о характере изменения полярности геомагнитного поля в интервале геологической истории между ~550 и ~440 млн лет назад.

В качестве геохронологической основы нашей шкалы мы выбираем шкалу геологического времени в версии 2016 г. [Ogg et al., 2016], которая является самым полным и обоснованным обобщением геохронологической информации, накопленной человечеством к настоящему времени. Выбор стратиграфической основы для нашей шкалы не так очевиден. С одной стороны, для этого можно использовать новейшие стратиграфические подразделения, появившиеся в большом количестве в последние годы. С другой стороны, можно использовать более традиционные стратиграфические подразделения, широко применявшиеся при подготовке геологических карт и в биостратиграфических описаниях, на которые мы опирались при изучении опорных разрезов. Выбирая первый вариант, мы должны взять на себя не-

свойственную нам задачу перевода “старых” биостратиграфических подразделений в “новые” – работу, которую, по нашему глубокому убеждению, должны выполнять специалисты – биостратиграфы. Остановившись на втором варианте, мы рискуем создать сложности в понимании нашей шкалы специалистами, ориентирующимися на новейшие стратиграфические подразделения. К счастью, последний вопрос легко решается путем использования таблиц соответствия, которые можно найти как в отечественной [ВСЕГЕИ, Общая стратиграфическая шкала, http://www.vsegei.ru/ru/info/stratigraphy/stratigraphic_scale/index.php], так и в англоязычной литературе [Geological ..., 2012]. Кроме того, стремясь быть “современными” и используя “новейшие” стратиграфические подразделения, мы рискуем из-за того, что биостратиграфическая шкала в настоящее время быстро меняется, тем, что через несколько лет наша шкала окажется привязана вновь к ушедшему в прошлое, промежуточному варианту, привязка которого к конкретным разрезам будет вызывать все более нарастающие затруднения. Таким образом, в ожидании, когда бурно протекающий в настоящее время процесс перестройки биостратиграфической шкалы стабилизируется и изученные нами разрезы будут сопоставлены специалистами биостратиграфами с новыми шкалами, мы предпочитаем выбрать более консервативный второй вариант для нашей биостратиграфической основы.

При построении макета шкалы магнитной полярности раннего палеозоя мы не можем пройти мимо горячо обсуждавшегося в отечественной литературе вопроса о нижней границе палеозоя [Розанов и др., 1997]. Здесь, также следуя принципу здорового консерватизма, мы будем исходить из точки зрения большинства отечественных биостратиграфов, проводящих эту границу в основании томмотского яруса.

Начиная описание предлагаемой шкалы, прежде всего рассмотрим удивительные результаты, полученные нашими Санкт-Петербургскими коллегами из ВНИГРИ [Попов, Храмов, 2007] по позднему венду (эдиакарию) севера Архангельской области. Исследуя опорные разрезы, сложенные глинисто-терригенными породами с возрастом менее 550 млн лет [Маслов и др., 2018], они обнаружили десятки зон магнитной полярности, что указывает на высокую (возможно, очень высокую) частоту инверсий в рассматриваемое время. Результаты, полученные В.В. Поповым с соавторами, недавно нашли подтверждение в работах коллег из Геологического института РАН и Института геологии Уфимского научного центра РАН [Vazhenov et al., 2016]. Изучив близкие по возрасту (моложе 548 млн лет [Levashova et al., 2013]) терригенные породы верхнего эдиакария Южного Урала, они также обнаружили палеомаг-

Макет шкалы магнитной полярности кембрия и ордовика

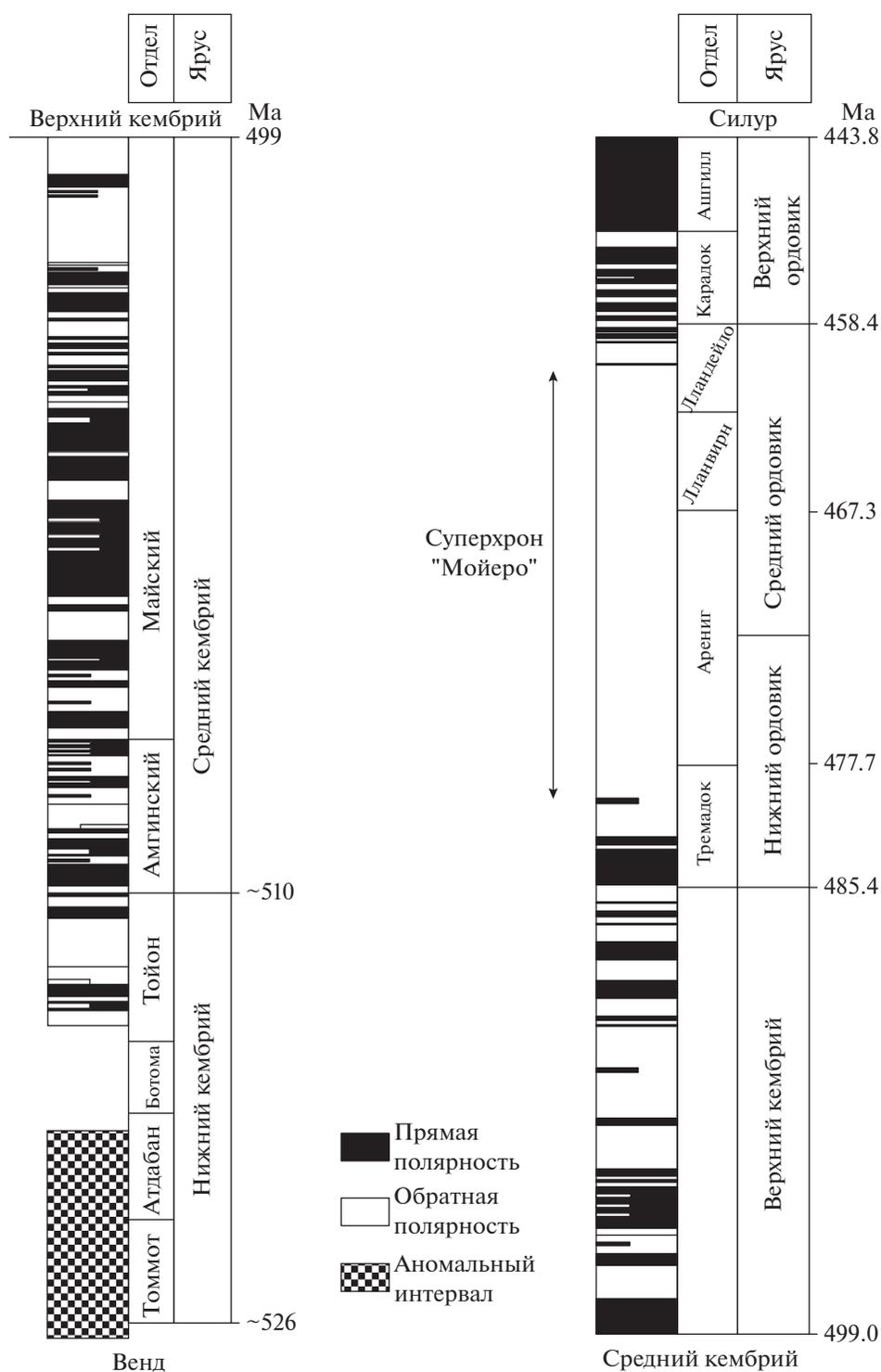


Рис. 8. Макет шкалы магнитной полярности кембрия и ордовика.

нитную запись, определенно указывающую на необычайно высокую частоту смены геомагнитной полярности в позднейшем докембрии. Взятые вместе, результаты В.В. Попова и М.Л. Баже-

нова с соавторами составляют серьезную базу для вывода о "нестандартном" поведении геомагнитного поля вблизи границы докембрия и фанерозоя. Надежность этих результатов независимо

подкрепляется работой [Федорова и др., 2013], которая, показывает согласованность полученных позднеэдиакарских полюсов как в региональных (Урал), так и в континентальных масштабах. Очень высокая частота инверсий в позднейшем эдиакарии подтверждается также данными, полученными по Енисейскому Кряжу авторами статьи [Рудько и др., 2018]. Таким образом, вся имеющаяся на настоящий момент информация указывает на возбужденное состояние геомагнитного поля в позднем эдиакарии.

В породах, формирование которых происходило вслед за этим в немакит-далдынское, томмотское и атдабанское время, мы наблюдаем повсеместно аномальную палеомагнитную запись (см., например, [Павлов и др., 2018]), которая, по всей видимости, является отражением аномального состояния геомагнитного поля, последовавшего вслед за резким возрастанием частоты геомагнитных инверсий в позднем эдиакарии. О том, что собой представляло геомагнитное поле вблизи границы докембрия и кембрия и на протяжении значительной части нижнего кембрия, в настоящий момент мы можем только догадываться. По всей видимости, оно, временами, сильно отличалось от поля центрального осевого диполя, обладало крайне низкой напряженностью, при этом вклад недипольных компонент был значительным, если не преобладающим. Существенной характеристикой этого поля было, возможно, наличие инвертирующего близэкваториального диполя. Для простоты обозначения этого периода в истории геомагнитного поля мы предлагаем рабочий термин “суперэкскурс”, принимая гипотезу о том, что состояние геомагнитного поля в рассматриваемый период напоминает таковое во время обычного экскурса, однако длящееся, в отличие от последнего, не первые тысячи, а многие миллионы лет.

Выход из этого состояния, по-видимому, наметился только в тойонское время, вслед за которым мы уверенно фиксируем среднекембрийский интервал повышенной частоты инверсий. В эту эпоху она составляла, не менее 6–8 инверсий за 1 млн лет (или даже много больше, см. [Gallet et al., 2019]) и была, вероятно, наибольшей в фанерозое. Существование симметрии в частоте инверсий при входе и выходе из суперэкскурса можно рассматривать как указание на то, что особенности геомагнитного поля, наблюдаемые на протяжении длительного периода, от позднего эдиакария до среднего кембрия, являются отражением единого процесса, происходившего в глубинных оболочках планеты на границе докембрия и фанерозоя.

Пытаясь приблизиться к пониманию природы этого процесса, трудно не обратить внимание на то, что именно в самом конце эдиакария проис-

ходит формирование Гондваны – одного из крупнейших суперконтинентов. Это событие могло привести к отрыву многочисленных слэбов с формированием последующих мантийных лавин, падавших на границу ядро–мантия и приводивших к резкому и крайне неравномерному перераспределению теплового потока, проходящего через эту границу. Как следует из многочисленных результатов компьютерного моделирования, опубликованных в последнее время (см., напр., [Olson et al., 2010]), такое перераспределение теплового потока могло привести к существенному изменению работы геодинамо вплоть до полного его разрушения. Отметим, что мы не настаиваем на этом механизме, но только приводим его в качестве примера возможного объяснения.

К концу среднего кембрия и вплоть до конца тремадока частота инверсий падает, составляя 3–4 инверсии за 1 млн лет в позднем кембрии и менее 1 за 1 млн лет – в тремадоке. Факт существенного снижения частоты инверсий в конце кембрия и в самом начале ордовика по сравнению со средним кембрием находит дополнительное подтверждение в результатах магнитостратиграфических исследований нижнего ордовика долины нижнего течения р. Котуй и верхнего кембрия долины р. Чопко, где недавно нам удалось обнаружить мощные зоны обратной и прямой полярности соответственно [Павлов и др., 2017; 2020]¹.

При обсуждении полярности геомагнитного поля в интервале времени от конца среднего кембрия до конца тремадока, нельзя не упомянуть о недавно опубликованной работе В.П. Родионова по магнитостратиграфии верхненеленской серии и усть-кутского яруса [Родионов, 2016], в которой приведен синтез данных, полученных автором на протяжении 60-х, 70-х и 80-х годов прошлого столетия. Мы не используем эти данные при построении макета шкалы магнитной полярности, в силу того, что: 1) они получены без детального размагничивания, являющегося, в настоящее время, непременным требованием для такого рода исследований; 2) крайне бедная фаунистическими остатками верхоленская серия до настоящего времени очень плохо привязана к стратиграфической шкале. Тем не менее, мы отмечаем генеральную сходимость наших данных для второй половины кембрия–начала ордовика с таковыми, полученными В.П. Родионовым. В частности, также как и наши данные, результаты В.П. Родионова указывают на повышенную частоту геомагнитных инверсий в среднем кембрии и относительно низкую их частоту – в позднем кембрии и тремадоке.

В непосредственной близости к границе тремадока и аренига происходит “выключение” инверсионного механизма и вплоть до середины лландейло на 15–20 млн лет устанавливается дли-

тельная эпоха без геомагнитных инверсий – наступает Ордовикский суперхрон обратной полярности (суперхрон “Мойеро” – [Pavlov, Gallet, 2006]). Даже, если внутри этого промежутка времени имели место кратковременные возвращения к прямой полярности, на возможность существования которых не очень уверенно указывают некоторые данные по скандинавским разрезам, подавляющее преобладание обратной полярности в это время вполне очевидно.

Наши результаты не поддерживает гипотезу двойного суперхрона, которая была выдвинута в работе [Algeo, 1996] на основе статистического анализа существовавшей на тот момент базы палеомагнитных данных. Эта гипотеза предполагала, что вслед за суперхроном обратной полярности в начале ордовика следует сопоставимый по длительности суперхрон прямой полярности. Напротив, мы видим, что вслед за завершением суперхрона Мойеро в позднем лландейло и на протяжении карадока происходит, по крайней мере, несколько смен полярности геомагнитного поля, т.е. поле, очевидно, возвращается в инверсионный режим.

При этом, однако, вывод Алгео имеет под собой некоторые основания, в том смысле, что в целом, по верхнему ордовика, прямая полярность действительно преобладает и ашгилл, в отличие от карадока, по нашим данным характеризуется исключительно прямой полярностью. Дальнейшие исследования покажут, продолжается ли в силур ашгилльский интервал прямой полярности. Если это, в самом деле, окажется так, тогда, принимая во внимание длительность ашгилла (около 7 млн лет), действительно можно будет говорить о сближенных во времени суперхронах обратной и прямой полярности (суперхронах “Мойеро” и позднеордовикском – раннесилурийском). В этом случае, однако, мы будем наблюдать не двойной суперхрон, предложенный в работе [Algeo, 1996], а два суперхрона, разделенных инверсионным интервалом.

В завершении этого раздела сравним предлагаемый макет шкалы магнитной полярности для раннего палеозоя с более ранними шкалами. Фактически этих шкал две. Первая – шкала А.Н. Храмова [Храмов и др., 1982], построенная, главным образом, на основе анализа данных, полученных в ходе многолетних исследований сотрудников его лаборатории во ВНИГРИ и, в первую очередь, В.П. Родионова. В 2000 г. эта шкала была несколько модифицирована [Храмов, Шкатова, 2000] с учетом новых (в том числе наших) данных, появившимся к концу девяностых годов прошлого столетия. Другая шкала – это шкала авторов статьи [Opdyke, Channel, 1996], являющаяся синтезом данных ВНИГРИ, Тренча,

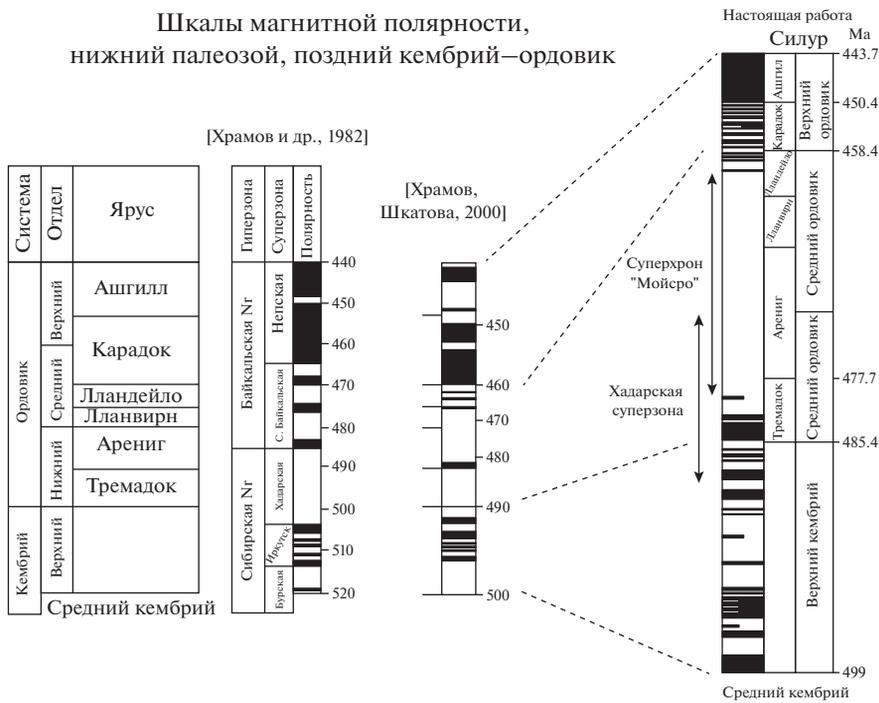
МакЭрроу и Торсвика [Trench et al., 1991], а также Фарра с соавторами [Farr et al., 1993].

Как видно из рис. 9, существенные различия между шкалами обнаруживаются уже в самой нижней их части, отвечающей нижнему кембрию. На протяжении многих лет, А.Н. Храмов с соавторами, опираясь на результаты обширных исследований магнитостратиграфии нижнего кембрия, выполненных в 60–80-ые годы прошлого века, отстаивали точку зрения, согласно которой на протяжении большей части нижнего кембрия геомагнитное поле имело обратную полярность. Противоположное мнение о значительной частоте геомагнитных инверсий в нижнем кембрии базировалось на работе [Kirschvik, Rozanov, 1984] по опорным разрезам среднего течения реки Лена, результаты которой не были подтверждены последующими работами [Torsvik et al., 1998, comments; наши неопубликованные данные]. Тем не менее, в последнем варианте шкалы [Храмов, Шкатова, 2000], А.Н. Храмов, по неизвестной причине, все-таки принял вариант Киршвинка. Наши данные (см. обсуждение выше) указывают на то, что геомагнитное поле в рассматриваемую эпоху имело, скорее всего, аномальный характер, при этом в те интервалы времени, когда поле на какое-то время возвращалось в “нормальное” состояние, оно имело, как исходно полагал А.Н. Храмов, преимущественно обратную полярность. В течение среднего кембрия А.Н. Храмов отмечал, что магнитное поле относительно часто меняло свою полярность, причем в раннем варианте своей шкалы он отмечал наличие до 18 инверсий в это время. Наши исследования существенно детализировали магнитостратиграфическую запись среднего кембрия и подтвердили мнение наших предшественников об относительно частой смене магнитной полярности в это время. Более того, нами было зафиксировано несколько десятков геомагнитных инверсий в среднем кембрии и было показано, что частота инверсий в это время была, возможно, наибольшей в течение всего фанерозоя.

Характер изменения полярности геомагнитного поля в позднем кембрии в нашем макете шкалы остается примерно таким же, как и в шкалах А.Н. Храмова с соавторами (рис. 9б), с той лишь разницей, что нам удалось зафиксировать значительно большее число геомагнитных инверсий, частота которых, при этом, становится меньше, чем в предыдущую эпоху. Для тремадокского времени наши шкалы уже значительно отличаются. А.Н. Храмов с соавторами предполагали наличие здесь длительного интервала обратной полярности, наши же данные указывают на чередование интервалов прямой и обратной полярности, причем, есть основание полагать, что прямая полярность существовала на протяжении значительной части тремадока.

(а)

Шкалы магнитной полярности,
нижний палеозой, поздний кембрий—ордовик



(б)

Шкалы магнитной полярности,
нижний палеозой, ранний и средний кембрий



Рис. 9. Сравнение шкал магнитной полярности для позднего кембрия и ордовика (а) и раннего и среднего кембрия (б). Столбцы в колонках те же, что и на рис. 8.

На протяжении аренига, лланвирна и иногда в начале лландейло, А.Н. Храмов с соавторами отмечают существование нескольких зон прямой полярности. Наш макет шкалы для этого интер-

вала времени предусматривает подавляющее преобладание геомагнитного поля обратной полярности, отвечающее суперхрону Мойеро, положение которого на геохронологической шкале, как

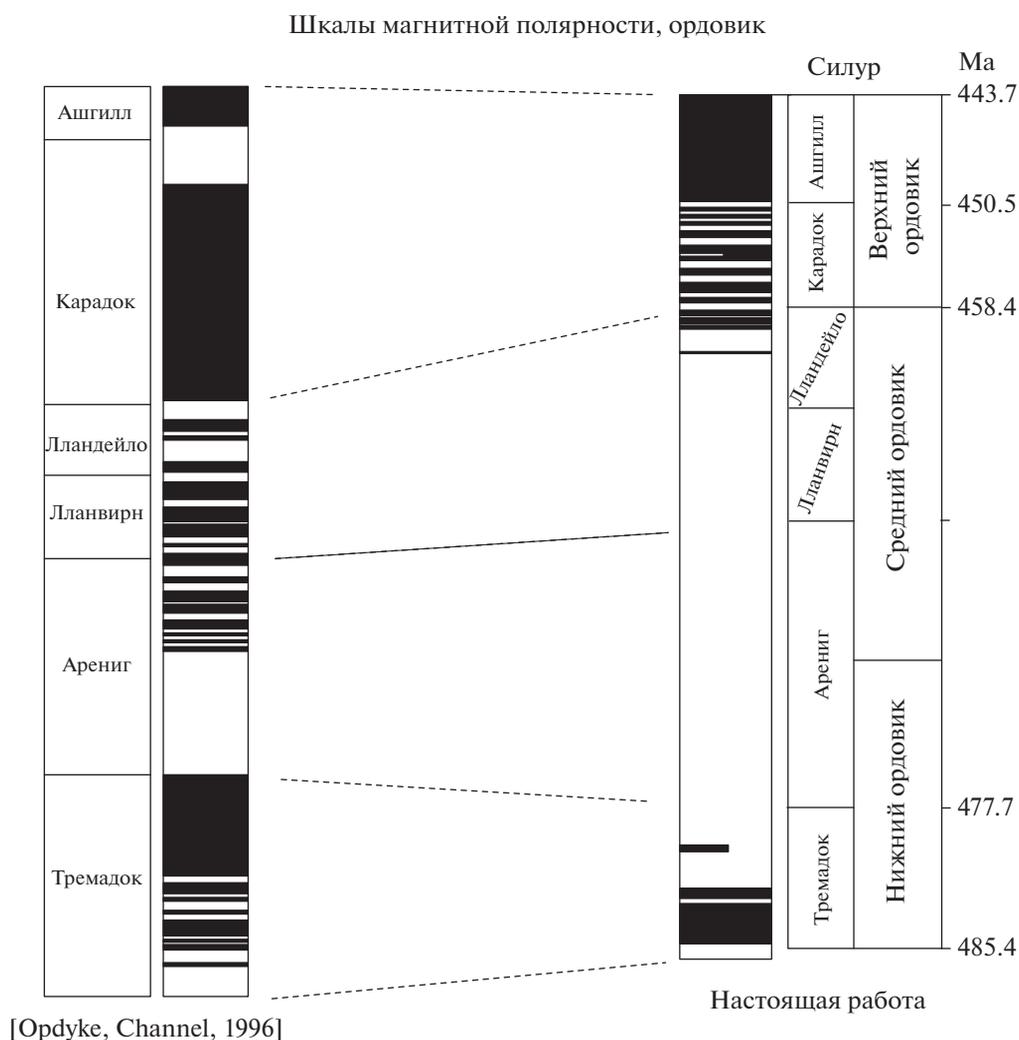


Рис. 10. Сравнение шкал магнитной полярности для ордовика. Столбцы в колонках те же, что и на рис. 8.

видно из рис. 9а, существенно отличается от положения Хадарской гиперзоны обратной полярности, предложенной А.Н. Храмовым с соавторами.

Распределения прямой и обратной полярностей поля для карадока и ашгилла существенно различаются в ранней и поздней версиях шкалы геомагнитной полярности А.Н. Храмова с соавторами (рис. 9а). В более ранней версии для этого интервала времени существенно преобладает прямая полярность, в более поздней версии такого преобладания нет. При этом частота инверсий в это время крайне невысока в обеих версиях шкалы. Наш макет характеризуется наличием довольно большого числа инверсий геомагнитного поля в карадоке и существенным преобладанием прямой полярности в ашгилле. В этом же состоит отличие нашего макета от шкалы Опдайка и Чэннела [Opdyke, Channel, 1996]. Кроме того, между последней шкалой и нашим макетом (см. рис. 10) имеется еще одно существенное, можно сказать,

принципиальное отличие. Опираясь на работу Фарра с соавторами [Farr et al., 1993], Опдайк и Чэннел, помещают значительное число геомагнитных инверсий в интервал времени, отвечающий нашему суперхрону Мойеро. В работе [Gallet, Pavlov, 1996] нами уже описывались причины, по которым такая интерпретация данных представляется мало обоснованной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе сведены вместе основные данные, полученные нами и нашими коллегами в последние десятилетия при изучении магнитной стратиграфии кембрия и ордовика Сибирской платформы и других регионов. Синтез этих данных позволяет предложить рабочий макет шкалы магнитной полярности раннего палеозоя, описывающий имеющиеся на настоящий момент зна-

ния о характере изменения полярности геомагнитного поля на протяжении раннего палеозоя.

Наиболее важными характеристиками, описывающими процесс смены полярности геомагнитного поля в раннем палеозое, являются следующие:

а) существование на протяжении значительной части раннего и среднего ордовика суперхрона обратной полярности (третьего фанерозойского суперхрона “Мойеро”);

б) высокая (возможно, максимальная в фанерозое) частота геомагнитных инверсий в среднем кембрии;

в) уменьшение частоты геомагнитных инверсий в позднем кембрии и тремадоке при приближении к суперхрону;

г) наличие аномального периода в поведении геомагнитного поля вблизи границы фанерозоя и докембрия;

д) отсутствие двойного суперхрона в ордовике [Algeo, 1996].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 16-17-10097 (сбор, анализ и интерпретация данных) и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-05-00285 (подготовка статьи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бергер А.Я., Ковалевская Е.О., Тесаков Ю.И., Хромых В.Г.* Силур Ньюско-Джербинской и Березовской впадин // Региональная геология и металлогения. 2007. № 30–31. С. 48–56.
- Высоцкий А.А., Каныгин А.В., Москаленко Т.А., Ядренкина А.Г.* Ордовик Сибирской платформы (Опорный разрез на р. Кулумбе). Тр. ИГиГ, Вып. 506. 1982. С. 9–37.
- Дубинина С.В.* Конодонты и зональная стратиграфия пограничных отложений кембрия и ордовика. 2000. Геологический институт РАН. Труды. Вып. 517. 240 с. М.: Наука.
- Каныгин А.В., Москаленко Т.А., Ядренкина А.Г., Абаимова Г.П., Семенов В.С., Сычев О.В., Тимохин А.В.* Ордовик Сибирской платформы. Фауна и стратиграфия Ленской фациальной зоны. Новосибирск: Наука. 1989. 216 с.
- Комиссарова Р.А., Осипова Э.П.* Результаты палеомагнитного изучения пород среднего рифея – кембрия р. Мая. Магнитостратиграфия и палеомагнетизм осадочных и вулканогенных формаций СССР. Палеомагнетизм и аккреционная тектоника / Храмов А.Н. Л.: ВНИГРИ. 1986. 98 с. С. 5–13.
- Лубнина Н.В., Зайцев А.В., Павлов В.Э.* Предварительные результаты палеомагнитных исследований ордовикских комплексов Ленинградской области: располагалась ли Восточно-Европейская платформа 465 млн лет назад гораздо ближе к экватору, чем предполагалось ранее? Современные вопросы геологии. М.: Научный Мир. 2003. С. 89–92.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гражданкин Д.В., Колесников А.В.* Верхний венд востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы: процессы осадконакопления и эволюция биоты // Литосфера. 2018. Т. 18. № 4. С. 520–542.
- Москаленко Т.А., Ядренкина А.Г., Семенова В.С., Ярошинская А.М.* Ордовик Сибирской платформы. Опорные разрезы верхнего ордовика. Тр. ИГиГ, вып. 340 / Каныгин А.В. М. 1978. 130 с.
- Осипова Э.П.* Палеомагнетизм отложений среднего кембрия западного крыла Чекуровской антиклинали. Палеомагнетизм и аккреционная тектоника / Храмов А.Н. Л.: ВНИГРИ. 1988. 188 с. С. 93–100.
- Павлов В.Э., Родионов В.П., Храмов А.Н., Галле И.* Магнитостратиграфия опорного разреза ордовика в районе дер. Половинка (среднее течение р. Лена): изменялась ли полярность геомагнитного поля в раннем лландейло? // Физика Земли. 1999. № 5. С. 61–71.
- Павлов В.Э., Галле И., Шацлло А.В., Водовозов В.Ю.* Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р. Лены – новые ограничения на кривую кажущейся миграции полюса Сибирской платформы и аномальное поведение геомагнитного поля в начале фанерозоя // Физика Земли. 2004. № 2. С. 28–49.
- Павлов В.Э., Веселовский Р.В., Шацлло А.В., Галле И.* Магнитная стратиграфия опорного разреза ордовика среднего течения р. Ангары – еще одно доказательство существования ордовикского геомагнитного суперхрона // Физика Земли. 2012. № 4. С. 14–22.
- Павлов В.Э., Толмачева Т.Ю., Веселовский Р.В., Латышев А.В., Фетисова А.М., Бигун И.В.* Магнитная стратиграфия ордовика нижнего течения р. Котуй: Возраст Бысы-Юряхской толщи и частота геомагнитных инверсий накануне суперхрона // Физика Земли. 2017. № 5. С. 702–713.
- Павлов В.Э., Пасенко А.М., Шацлло 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.
- Писаревский С.А.* Палеомагнетизм кембрийских отложений разреза по р. Оленек. Магнитостратиграфия и палеомагнетизм осадочных и вулканогенных формаций СССР / Храмов А.Н. Л.: ВНИГРИ. 1986. 98 с.
- Попов В.В., Храмов А.Н.* Новый палеомагнитный метод ориентирования керна скважин в пространстве. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т. 2. <http://www.ngtp.ru/rub/12/016.pdf>
- Родионов В.П., Павлов В.Э., Галле И.* Магнитополярная структура разреза стратотипа киренско-кудринского и чертовского горизонтов среднего ордовика (верхнее течение р. Лены, выше Киренска) – к проблеме ордовикского геомагнитного суперхрона // Физика Земли. 2001. № 6. С. 67–71.
- Родионов В.П., Гуревич Е.Л.* Опорный магнитостратиграфический разрез отложений нижнего ордовика Северо-Запада Сибирской платформы. Нефтегазовая геология. Теория и практика: электр. науч. журн. 2010. Вып. 3. Т. 5. <http://www.ngtp.ru>

- Розанов А.Ю., Ретина Л.Н., Аполлонов М.К., Шабанов Ю.Я. и др.* Кембрий Сибири. Новосибирск: Наука. 1992. Тр. ИГиГ. Вып. 788. С. 133.
- Розанов А.Ю., Семихатов М.А., Соколов Б.С., Федонкин М.А., Хоментовский В.В. и др.* Решение о выборе стратиграфической границы докембрия и кембрия: прорыв в проблеме или ошибка? // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1997. Т. 5. № 1. С. 21–31.
- Розова А.В.* Биостратиграфия и трилобиты верхнего кембрия и нижнего ордовика северо-запада Сибирской платформы. М.: Наука. 195 с. (Труды института геологии и геофизики. Со АН СССР. Вып. 36). 1968.
- Розова А.В.* Биостратиграфия и описание трилобитов среднего и верхнего кембрия северо-запада Сибирской платформы. М.: Наука. 1964. 146 с.
- Розова А.В.* Корреляция верхнекембрийских разрезов Южного Казахстана и Сибирской платформы // Биостратиграфия и палеонтология кембрия Северной Азии. М. 1986. С. 25–39.
- Рудько Д.В., Рудько С.В., Шацлло А.В., Кузнецов Н.Б.* Количественная оценка частоты магнитных инверсий в палеомагнитной записи красноцветов лопатинской свиты. Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 16. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2018. С. 226–227.
- Федорова Н.М., Левашова Н.М., Меерт Дж., Маслов А.В., Крупенин М.Т.* Восточно-Европейская платформа в конце венда: новые палеомагнитные данные по западному склону Среднего Урала. Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Теория, практика, эксперимент. Казань. 2013. С. 218–223.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др.* Палеомагнетизм палеозоя. Л.: Недра. 1974. Труды ВНИГРИ. Вып. 335. С. 238.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др.* Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. С. 312.
- Храмов А.Н., Шкатова В.К.* Общая магнитостратиграфическая шкала полярности фанерозоя. Приложение 9. Приложения к Стратиграфическому кодексу России. СПб.: ВСЕГЕИ. 2000. С. 24–25.
- Шацлло А.В., Кузнецов Н.Б., Павлов В.Э.* Первые магнитостратиграфические данные о стратотипе 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.
- Abrajevitch A., Van der Voo R.* Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis // Earth and Planetary Science Letters. 2010. V. 293(1–2). P. 164–170.
- Algeo T.J.* Geomagnetic polarity bias pattern through Phanerozoic // JGR. 1996. V. 101. P. 2785–2814.
- Bachtadse V., Pavlov V.E., Kazansky A.Y., Tait J.A.* Siluro-Devonian paleomagnetic results from the Tuva Terrane (southern Siberia, Russia): implications for the paleogeography of Siberia // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № B6. P. 13.509–13.518.
- Bazhenov M.L., Collins A.Q., Degtyarev K.E., Levashova N.M., Mikolaichuk A.V., Pavlov V.E., Van der Voo R.* Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism // Tectonophysics. 2003. V. 366. P. 113–141.
- Bazhenov M.L., Levashova N.M., Meert J. G., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M.* Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: Evidence for Magnetic Field Hyperactivity? // Earth and Planetary Science Letters. 2016. V. 435. P. 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.015>
- Cocks L.R.M., Torsvik T.H.* Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic // Earth-Science Reviews. 2007. V. 82. P. 29–74.
- Driscoll P.E.* Simulating 2 Ga of geodynamo history // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43.
- Elston D.P., Bressler S.L.* Paleomagnetic poles and polarity zonation from Cambrian and Devonian strata of Arizona // Earth and Planetary Science Letters. 1997. V. P. 423–433.
- Farr R., Sprowl D., Johnson J.* Identification and initial correlation of magnetic reversals in the lower to middle Ordovician of Northern Arkansas. in Application of Paleomagnetism to sedimentary geology. SEPM Spec. Pub. 1993. V. 4. P. 83–93.
- Gallet Y., Pavlov V.* Magnetostratigraphy of the Moyero river section (north-western Siberia): constraint on the geomagnetic reversal frequency during the early Paleozoic // Geophysical J. International. 1996. V. 125. P. 95–105.
- Gallet Y., Pavlov V., Courtillot V.* Magnetic reversal frequency and Apparent Polar Path of the Siberian platform in the earliest Paleozoic, inferred from the Khorbusuonka river section (northeastern Siberia) // Geophysical J. International. 2003. V. 154. P. 829–840.
- Gallet Y., Pavlov V., Korovnikov I.* Extreme geomagnetic reversal frequency during the Middle Cambrian as revealed by the magnetostratigraphy of the Khorbusuonka section (northeastern Siberia) // Earth and Planetary Science Letters. 2019. V. 528. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115823>
- Geological time scale 2012 / Eds. Felix M. Gradstein, James G. Ogg, Mark D. Schmitz, Gabi M. Ogg. 2012. V. 1. 1139 p.
- Gissinger C., Petitdemange L., Schirmer M.* Bistability between equatorial and axial dipoles during magnetic field reversals // Physical Review Letters. 2012. V. 108. Iss. 23. P. 234501.
- Grappone J.M., Chaffee T., Isozaki Y., Bauert H., Kirschvink J.L.* Investigating the duration and termination of the Early Paleozoic Moyero reversed polarity Superchron: Middle Ordovician paleomagnetism from Estonia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2017. V. 485. P. 673–686.
- Hounslow Mark W.* Geomagnetic reversal rates following Palaeozoic superchrons have a 424 fast restart mechanism. Nature Communications. 2016. V. 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms12507>
- Kanygin A.V., Moskalenko T.A., Yadrenkina A.G.* Ordovician System of the Siberian platform. The Ordovician System in most of Russian Asia: Correlation Charts and Explanatory Notes. International Union of Geological Sciences. Publication. V. 26. 1988. С. 1–28.
- Kirschvink J.L., Rozanov A.Ju.* Magnetostratigraphy of Lower Cambrian strata from the Siberian Platform: paleomagnetic pole and preliminary polarity time-scale // Geol. Mag. 1984. V. 121(3). P. 189–203.

- Klootwijk C.T.* Early Paleozoic magnetism in Australia // *Tectonophysics*. 1980. V. 64. P. 249–332.
- Kouchinsky Y., Bengtson S., Gallet Y., Korovnikov I., Pavlov V., Runnegar B., Shields G., Weizer J., Young E., Ziegler K.* The SPICE carbon isotope excursion in Siberia: a combined study of the upper Middle Cambrian–lowermost Ordovician Kulyumbe River section, northwestern Siberian Platform // *Geol. Mag.* 2008. V. 145(5). P. 609–622.
- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M.* Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals // *Prec. Res.* 2013. V. 236. P. 16–30.
- Olson P.L., Coe R.S., Driscoll P.E., Glatzmaier G.A., Roberts P.H.* Geodynamo reversal frequency and heterogeneous core-mantle boundary heat flow // *Phys. Earth. Planet. Inter.* 2010. V. 180. P. 66–79.
- Opdyke N.D., Channell, J.E.T.* Magnetic stratigraphy. London and San Diego Academic Press. 1993. P. 1–364.
- Pavlov V.E., Gallet Y.* Upper Cambrian to Middle Ordovician magnetostratigraphy from the Kulumbe river section (northwestern Siberia) // *Phys. Earth and Plan. Int.* 1998. V. 108. P. 49–59.
- Pavlov V., Gallet Y.* Middle Cambrian high magnetic reversal frequency (Kulumbe river section, northwestern Siberia) and reversal behaviour during the Early Palaeozoic // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. V. 185. № 1–2. P. 173–183.
- Pavlov V., Gallet Y.* A third superchron during the Early Palaeozoic, Episodes. 2005. V. 28. P. 78–84.
- Pavlov V., Valerian Bachtadse, 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. Is. 3–4. P. 229–242.
- Pisarevsky S.A., Gurevich E.L., Khramov A.N.* Paleomagnetism of Lower Cambrian sediments from the Olenek river section (northern Siberia): paleopoles and the problem of magnetic polarity in the Early Cambrian // *Geophys. J. Int.* 1997. № 130. P. 746–756.
- Powerman V., Shatsillo A., Coe R., Zhao X., Gladkochub D., Buchwaldt R., Pavlov V.* Palaeogeography of the Siberian platform during middle Palaeozoic (ca. 450–400 Ma): new palaeomagnetic evidence from Lena and Nyuya rivers // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 194. P. 1412–1440
- Ripperdan R.L., Kirschvink J.* Paleomagnetic results from the Cambrian-Ordovician boundary section at Black Mountain, Georgina Basin, western Queensland, Australia, In: *Global Perspectives on Ordovician Geology / Webby, Laurie* (eds). Balkema, Rotterdam. 1992. P. 93–103.
- Ripperdan R.L., Magaritz M., Kirschvink J.* Carbon isotope and magnetic polarity evidence for non-depositional events within the Cambrian-Ordovician boundary section near Dayangcha, Jilin Province, China // *Geol. Mag.* 1993. V. 130. P. 443–452.
- Shergold J.* Timescales calibration and development 1: Cambrian // *Austr. Geol. Surv. Org. Rec.* 1995. V. 30. P. 1–24.
- Smethurst M.A., Khramov A.N., Pisarevsky S.* Palaeomagnetism of the Lower Ordovician Orthoceras Limestone, St. Petersburg, and a revised drift history for Baltica in the early Palaeozoic // *Geophys. J. Int.* 1998. V. 133. P. 44–56.
- Torsvik T.H., Trench A.* The Lower-Middle Ordovician paleofield of Scandinavia: southern Sweden “revisited”. *PEPI*. 1991a. V. 65. P. 283–291.
- Torsvik T.H., Trench A.* Ordovician magnetostratigraphy: Llanvirn-Caradoc limestones of the Baltic platform // *Geophysical. J. International.* 1991b. V. 107. P. 171–184.
- Trench A., McKerrow W.S., Torsvik T.H.* Ordovician magnetostratigraphy: a correlation of global data // *J. Geological Society, London*. 1991. V. 148. P. 949–957.
- Torsvik T.H., Trench A., Lohmann K.C., Dunn S.* Lower Ordovician reversal asymmetry: artifact of remagnetization or non-dipole field disturbance // *J. Geophysical research*. 1995a. V. 100. № B9. P. 17885–17898.
- Torsvik T.N., Tait J., Moralev V.M., McKerrow W.S., Sturt B.A., Roberts D.* Ordovician paleogeography of Siberia and adjacent continents // *Geological Society, London*. 1995b. V. 152. P. 279–287.
- Torsvik T.H., Meert J.G., Smethurst M.A.* Polar wander and the Cambrian. 1998. *Science*. V. 279. P. 9a. Technical comment. www.sciencemag.org.
- Ogg J.G., Ogg G., Gradstein F.M.* A Concise Geologic Time Scale: Amsterdam, Elsevier. 2016. 240 p.
- Wogogob excursion guide. St. Peterburg, Russia. Uppsala University, department of Historical geology and paleontology / Ed. *Leonid E. Popov*. 1997. 24 p.
- Yang Z., Otofujii Y., Sun Z., Huang B.* Magnetostratigraphic constraints on the Gondwana origin of North China: Cambrian-Ordovician boundary results // *Geophys. J. Int.* 2002. V. 151. P. 1–10.

Developing the Magnetic Polarity Time Scale for the Cambrian and Ordovician: Current Data and Attempt of Their Synthesis

V. E. Pavlov^{a, b, *} and Y. Gallet^c

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

^b*Kazan (Volga) Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^c*Paris Institute of Earth Physics, Sorbonne Paris Cité, University of Paris Didro, YMP 7154, Scientific Center for Scientific Research, F-75005, Paris, France*

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

The time scale of the geomagnetic polarity is the quintessence of our knowledge about the changes in the polarity of the Earth's magnetic field in the geological past. The pattern of the Earth's magnetic field polarity reversals is relatively well known for the Cenozoic, Mesozoic, and Late Paleozoic. However, our understand-

ing of the behavior of geomagnetic polarity in the more ancient epochs is non-systematic and fragmentary. Obtaining the reliable high-quality information for the Lower and Middle Paleozoic should become the next important step. This paper compiles the main data yielded by recent studies on magnetic stratigraphy of the Lower Paleozoic (Cambrian and Ordovician) of the Siberian Platform and other regions conducted by our team and our colleagues. The synthesis of these data allows us to propose a working prototype scheme of the Early Paleozoic magnetic polarity time scale which embodies the current knowledge about the character of changes in the geomagnetic field polarity on this interval of the geological time. The process of geomagnetic field polarity reversals in the Early Paleozoic is described by the following most important characteristics: (a) the existence of a superchron of reversed polarity during a significant part of the Early and Middle Ordovician (the third Phanerozoic superchron Moyero); (b) a high (probably peaking in the Phanerozoic) frequency of the geomagnetic reversals in the Middle Cambrian; (c) a decrease in the frequency of geomagnetic reversals in Late Cambrian and Tremadocian with the approach of the superchron; (d) the presence of anomalous period in the behavior of the geomagnetic field close to the Phanerozoic/Precambrian boundary; and (e) the absence of a double superchron in the Ordovician (Algeo, 1996).

Keywords: paleomagnetism, Paleozoic, magnetostratigraphy, magnetic polarity time scale, Cambrian, Ordovician