

УДК 550.384

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАПИСИ ИНВЕРСИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДОЛЕРИТОВЫХ СИЛЛАХ НОРИЛЬСКОГО РАЙОНА: РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2019 г. Д. В. Метелкин^{1,2*}, А. В. Лавренчук^{3,1}, Н. Э. Михальцов^{2,1}

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*E-mail: metelkindv@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию 15.05.2018 г.

Принята в печать 03.12.2018 г.

Возможность восстановления геологической летописи путем выявления закономерностей вариаций магнитного поля Земли, связанных с инверсиями, является одним из фундаментальных приложений палеомагнетизма. Наиболее детальные записи инверсионных событий, длительность которых в среднем от 1 до 10 тыс лет, известны по результатам изучения базальтовых покровов крупных изверженных провинций. Вместе с тем в последнее время появляются публикации, представляющие факты, интерпретируемые как запись геомагнитной инверсии в интрузивных телах. В частности, такие данные получены для относительно маломощных долеритовых силлов ергалахского комплекса в Норильском районе Сибирской трапповой провинции, где предполагается запись «ивакинско-сыверминской» инверсии, отвечающей рубежу перми – триаса. В основу интерпретации положена гипотеза о медленном остывании интрузии, при котором ее апикальные части намагничиваются в ивакинскую эпоху обратной полярности, а центральные – после инверсии в сыверминское время, отвечающее прямой полярности. В настоящей статье, используя результаты математического моделирования, мы обсуждаем справедливость этих предположений и потенциальную привлекательность субвулканических интрузий для изучения геомагнитных инверсий. Показано, что длительность их остывания, включая интервал наиболее вероятного намагничивания, на несколько порядков меньше продолжительности инверсионных переходов, а наиболее вероятной причиной присутствия компонент прямой и обратной полярности является эффект самообращения.

Ключевые слова: палеомагнетизм, геомагнитные инверсии, долеритовый силл, математическое моделирование, динамика остывания, самообращение намагниченности.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019624-33>

ВВЕДЕНИЕ

Изучению поведения магнитного поля Земли на этапах крупных перестроек его структуры, связанных с инверсиями, посвящено значительное количество публикаций [Narteau et al., 2007; Olson et al., 2011; Valet et al., 2012; Wicht, Meduri, 2016]. Согласно имеющимся данным, время, за которое происходит полное обращение полярности, весьма короткое в геологических масштабах, по разным оценкам от 1 до 10 тыс лет [Merril, McFadden, 1999; Valet et al., 2012]. Наиболее богатым источником записи последовательности смены интервалов геомагнитной полярности являются полосовые магнитные аномалии

современных океанов. На их основе с использованием прецизионных изотопно-геохронологических данных откалибрована значительная часть современной глобальной временной шкалы геомагнитной полярности (the geomagnetic polarity time scale (GPTS) [Gradstein et al., 2012], обосновано несколько основополагающих гипотез тектоники литосферных плит и важнейших закономерностей эволюции геодинамо [Soh, 1973].

Другим важнейшим объектом, на примере которого можно с большой детальностью реконструировать историю геомагнитных инверсий являются мощные вулканические разрезы

крупных магматических провинций. Первые достоверные сведения о длительности инверсионных переходов, напряженности магнитного поля и многих других характеристиках его структуры во время инверсий получены по результатам изучения серии базальтовых покровов Исландии [McDougall, 1979]. Работы на подобных объектах активно продолжаются и в настоящее время [Herrero-Bervera, Valet, 1999; Ferk, Leonhardt, 2009; Jarboe et al., 2011; Channell et al., 2017]. Результаты этих исследований показывают, что в течение последних 5 млн лет средняя продолжительность интервалов одной полярности (хронов) составляет ~ 0.25 млн лет.

Хотя в геологической истории намечается определенная закономерность и глобальная периодичность поведения геомагнитного поля, субсинхронная проявлениям плюмового магматизма, геотектоническим и климатическим процессам планетарного масштаба [Диденко, 1999; 2011; Добрецов, 2010; 2015], сами эпизоды инверсий и моменты их «запуска» распределены во времени настолько непредсказуемо, что запись последовательности из четырех–пяти магнитохронов по своей структуре и длительности интервалов весьма индивидуальная и может, в принципе, использоваться как характерный признак для отдельных интервалов геологического времени. Это, вместе с представлением о скоротечности самого процесса смены полярности, лежит в основе магнитостратиграфии как научного направления [Opdyke, Channell, 1996]. В крупных изверженных провинциях или долгоживущих горячих точках типа Исландии, где активность магматизма и связанная с этим частота излияний высокая, запись поведения геомагнитного поля во времени также достаточно подробная. Лавовые потоки, быстро остывая, фиксируют мгновенное состояние геомагнитного поля, обеспечивая при частых излияниях возможность очень детальной записи вариаций направления и величины геомагнитного поля, вплоть до записи экскурсов – еще более кратковременных геомагнитных событий (10^2 – 10^3 лет), при которых виртуальный геомагнитный полюс отклоняется от своего положения на значительный угол (60° – 180°), после чего возвращается в исходное положение [Morris, 2003; Печерский, 2006].

Вместе с тем, в последнее время, появляются публикации, представляющие факты, интерпретируемые как запись инверсии в интрузивных телах, даже относительно небольших по размерам [Латышев и др., 2019]. В частности, в цитируемой работе представлены результаты палеомагнитного изучения трех долеритовых силлов

ергалахского комплекса, опробованных в Норильском районе вблизи пос. Талнах у юго-западного подножия Хараелахского плато. Силлы локализованы в верхнепермских породах тунгусской серии, представленной чередованием песчаников, гравелитов и алевролитов с прослоями углей, и связываются с начальным этапом формирования Сибирской крупной изверженной провинции на рубеже перми–триаса [Рябов и др., 2001; Латышев и др., 2019]. Видимая мощность интрузий составляет около 20 м. В апикальной приконтактной зоне двух из них авторы отмечают наличие характеристической намагниченности обратной полярности, тогда как центральные части силлов намагничены прямо. Долериты третьего силла, занимающего наиболее верхнее структурное положение в разрезе, целиком характеризуются прямой полярностью [Латышев и др., 2019].

Известно, что инициальный этап формирования Сибирских траппов приурочен к моменту инверсионного перехода на рубеже перми – триаса [Lind et al., 1994; Heunemann et al., 2004; Gurevitch et al., 2004; Павлов и др., 2011; Михальцов и др., 2012]. Самая нижняя в трапповом разрезе – ивакинская свита, которая в изученном районе непосредственно налегает на песчаники тунгусской серии, намагничена в эпоху обратной полярности (R -компонента), тогда как весь перекрывающий трехкилометровый разрез траппов, начиная с сыверминской свиты, характеризуется прямой полярностью (N -компонента). В связи с этим высказывается предположение о различном возрасте изученных интрузий и возможности фиксации в двух более древних, силлах эпизода «ивакинско-сыверминской» инверсии.

Авторы цитируемой работы предлагают простой «механизм» записи инверсионного перехода, который сводится к длительному постепенному остыванию силла. В конце ивакинского времени произошло охлаждение до блокирующих температур основного магнитного минерала – высокожелезистого титаномагнетита или магнетита (520 – 580°C) только верхней и нижней приконтактных зон интрузии. В результате породы этих апикальных частей, толщина которых в работе, к сожалению, не указана, но судя по рисункам может достигать трети от всей мощности силла, зафиксировали намагниченность, соответствующую R -компоненте. Затем, уже после инверсионного перехода в течение сыверминского времени, до приблизительно тех же температур, остыла центральная часть интрузии, где сохранилась только N -компонента. При этом

в некоторых образцах из приконтактной зоны, остывшей к тому моменту до температур значительно ниже 500 °С, данная N -компонента также могла быть зафиксирована, однако ее деблокирование в ходе температурного размагничивания происходит в среднетемпературном интервале, чаще всего от 120–210 °С до 330–460 °С [Латышев и др., 2019]. Таким образом, принимая даже самую минимальную оценку длительности инверсионного перехода, приходится допустить, что временная разница между остыванием апикальной и центральной части силла составляет не менее 1 тыс лет. При этом, как пишут авторы, время застывания всего интрузивного тела могло быть существенно больше 10 тыс лет [Латышев и др., 2019].

В целом, предложенная концепция вполне логична, однако сам факт неравномерного остывания, в общем, небольшого по размерам интрузивного тела с последовательной фиксацией палеомагнитного сигнала требует серьезного термохронологического обоснования. С нашей точки зрения предложенные оценки длительности остывания интрузии (под остыванием здесь понимается температурный интервал 520–580 °С, когда происходит фиксация палеомагнитного сигнала) и возникновение в процессе охлаждения значительного температурного градиента между «толстой» апикальной и центральной частями силла, нереалистичны. Для проверки предложенной гипотезы мы использовали имеющийся аппарат математического моделирования, обсуждению результатов которого и посвящена настоящая статья.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании за основу взяты петрографические описания и химические составы пород ергалахского комплекса, представленные в работе [Рябов и др., 2001]. Для оценки температурного интервала кристаллизации магмы с использованием программы Alpha MELTS [Smith, Asimow, 2005] проведено математическое моделирование равновесной кристаллизации расплава, отвечающего их среднему химическому составу. Моделирование проводилось при давлении 500 бар и активности кислорода на уровне буфера QFM. Согласно модельным расчетам температурный диапазон кристаллизации магмы составляет 1150–950 °С, модельная порода сложена плагиоклазом (62 об.%), авгитом (22 об.%), титаномагнетитом (9 об.%), калишпатом (4 об.%) оливином (3 об.%) и апатитом

(менее 1 об.%), что согласуется с петрографическим описанием трахидолеритов ергалахского комплекса [Рябов и др., 2001].

Для оценки времени кристаллизации магмы, динамики охлаждения и возможного временного интервала приобретения намагниченности долеритовыми силлами ергалахского комплекса было проведено математическое моделирование при равновесной кристаллизации расплава без учета конвективного перемешивания магмы и отсадки кристаллизующихся минералов. Для разных начальных и граничных условий получены решения уравнения теплопроводности:

$$\left(c_p + Q \frac{d\varepsilon}{dT} \right) \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

где: T – температура; t – время; x – расстояние от центра силла; c_p – теплоемкость; ρ – плотность; Q – скрытая теплота кристаллизации магмы; λ – коэффициент теплопроводности; ε – степень кристалличности магмы. Решения уравнения получены методом Галеркина с дискретизацией Скила–Берзинса [Skeel, Berzins, 1990], реализованном в программе MATLAB.

При моделировании приняты следующие значения теплофизических параметров: теплота кристаллизации расплава – 419 кДж/кг [Huppert, Sparks, 1988], теплоемкость расплава – 1340 Дж/(кг °С) [Huppert, Sparks, 1988], теплоемкость долерита – 890 Дж/(кг °С) [Schön, 1998], теплопроводность расплава – 1.5 Вт/(м °С) [Gutiérrez, Parada, 2010], теплопроводность долерита – 2.3 Вт/(м °С) [Schön, 1998]. Расчет теплоемкости и теплопроводности магмы в диапазоне температур кристаллизации выполнялся в приближении линейной диаграммы плавкости. Плотность трахибазальтового расплава и трахидолерита принята одинаковой – 3000 кг/м³, такое упрощение позволяет не учитывать в расчете эффект термоусадки. Для вмещающих песчаников приняты следующие значения теплофизических параметров: теплоемкость – 870 Дж/(кг °С), теплопроводность – 2.4 Вт/(м °С), плотность – 2600 кг/м³ [Schön, 1998]. Внедрение предполагается одноактное без длительного течения магмы по каналу, т. е. в начальный момент времени температура боковых пород предполагается постоянной. Более сложную модель, учитывающую возможность нескольких последовательных импульсов внедрения магмы, описанную в работе [Annen et al., 2015] как механизм формирования крупных субпластовых интрузий, мы не рассматриваем, поскольку имеющиеся геологические сведения о строении моделируемых ергалахских силлов не позволяют ее принять.

Первое решение получено для наиболее реалистичного, с нашей точки зрения, случая, когда температура вмещающих песчаников составляет 30 °С. При этом в модели мы сознательно увеличили мощность силла вдвое — до 40 м, чтобы полученная оценка могла быть распространена на большинство известных субвулканических интрузий Норильского района [Рябов и др., 2001]. Результаты моделирования свидетельствуют, что полная кристаллизация расплава (изотерма 950 °С) наступает в течение 17 лет (рис. 1). Все последующие изотермы (580–520 °С), соответствующие блокирующим температурам титаномагнетита и магнетита, которые были определены по результатам термомагнитного анализа как главные носители *R*-компоненты и *N*-компоненты намагниченности, имеют еще более пологовогнутую форму. К примеру, до температуры 580 °С непосредственный контакт интрузии остынет через 37 лет от момента внедрения, для остывания 10 м апикальной части понадобится еще 6 лет, а еще через 2 года указанная изотерма достигнет центра интрузии. Таким образом, даже если принять во внимание только самые крайние температурные параметры фиксации долеритами палеомагнитного сигнала на контакте — 580 °С, а в центре — 520 °С, то согласно расчетам, это произойдет не более чем за 20 лет, что, как минимум, на два порядка меньше длительности инверсии магнитного поля и на порядок меньше минимальной оценки длительности экскурса. Представленная математическая модель также полностью опровергает возможность фиксации *R*-компоненты в апикальной части (примем мощность апикальной части как 10 м) и *N*-компоненты в центральной части силла в едином диапазоне температур 520–580 °С, как это определено по результатам экспериментальных данных [Латышев и др., 2019]. По результатам моделирования отчетливо видно, что к моменту охлаждения пород центра интрузии до 580 °С, породы контактовой части нагреты свыше 540 °С. Если бы долериты действительно фиксировали инверсию и интервал деблокирующих температур *N*-компоненты 520–580 °С, то деблокирующие температуры *R*-компоненты должны быть в интервале не ниже ~540 °С, а временной интервал, необходимый для инверсионного события при принятых ограничениях по мощности апикальной части, составляет всего несколько лет (см. рис. 1).

Теоретически, чтобы достичь времен остывания интрузии до соизмеримых с минимальной

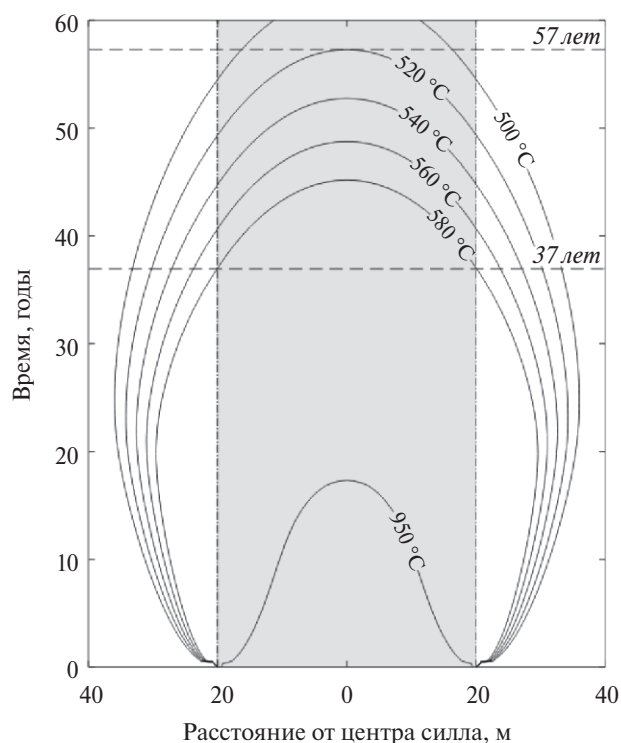


Рис. 1. Результаты математического моделирования динамики остывания долеритового силла мощностью 40 м при температуре вмещающих песчаников 30 °С. Пояснения в тексте.

продолжительностью инверсионного события ~1 тыс лет, необходимо либо значительно увеличить мощность самой интрузии, либо повысить температуру вмещающих пород. Поэтому целью построения двух последующих моделей стала оценка геологической ситуации, при которой запись инверсионного события в гипабисальном субвулканическом интрузивном теле была бы возможна.

Во второй модели мы проверяли необходимую для фиксации инверсии мощность силла, оставив температуру вмещающих пород прежней — 30 °С. По нашим оценкам минимальная мощность должна составить 281 м (рис. 2), что на порядок больше видимой мощности силлов, описанных в работе [Латышев и др., 2019]. В этом случае кристаллизация расплава наступает через 863 года, через 1828 лет контактовая часть силла остывает до температуры 580 °С и через 2829 лет центральная часть силла остывает до температуры 520 °С. Таким образом, временной интервал образования намагниченности в пределах силла достигает 1001 год. Но даже в этом случае соответствующие температурные интервалы 520–580 °С в апикальной и центральной частях значительно перекрываются

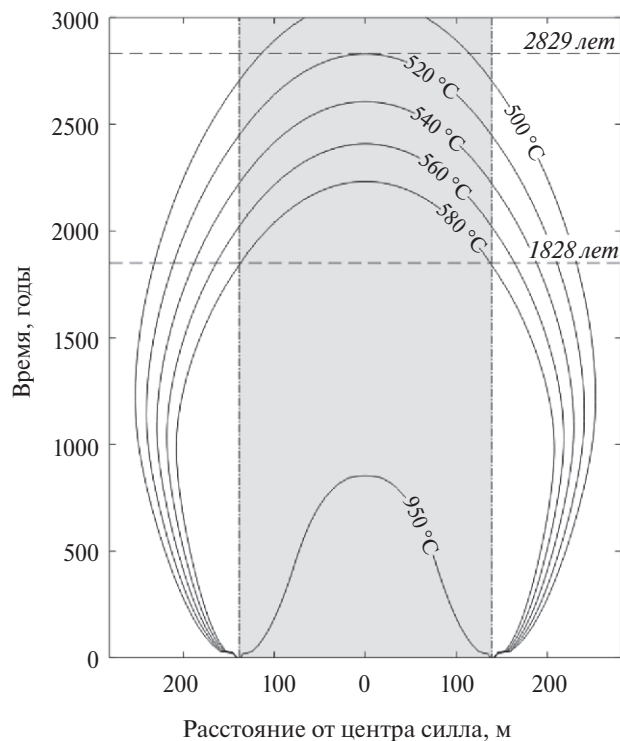


Рис. 2. Динамика остывания долеритового силла мощностью 281 м при температуре вмещающих песчаников 30 °С, когда теоретически возможна фиксация геомагнитного события продолжительностью 1 тыс лет, при условии, что носителями намагниченности являются титаномагнетит и магнетит с блокирующими температурами 520–580 °С. Пояснения в тексте.

(см. рис. 2). Поэтому, несмотря на то, что субпластовые интрузии такой мощности не являются редкостью для Норильского района [Рябов и др., 2001], реалистичность существования геологической ситуации, при которой эти породы способны записать инверсию, выглядит низкой. В том числе, надо принять во внимание, что представленные модельные оценки соответствуют минимально необходимым требованиям и по продолжительности инверсионного события, и к характеру палеомагнитной записи, когда остывание всей толщины интрузивного тела приходится на период смены полярности.

Наконец, в третьей модели мы подбирали температуру вмещающих пород, необходимую для продолжительного остывания силла, мощностью 40 м. Согласно модели, для фиксации геомагнитного события длительностью в 1 тыс лет минимальная температура вмещающих пород в момент внедрения силла должна составлять 481 °С. В этом случае кристаллизация расплава наступит через 41 год, через 690 лет

контактовая часть силла остынет до температуры 580 °С и через 1690 лет центральная часть силла остынет до температуры 520 °С (рис. 3). Следует отметить, что при таком сценарии силл будет остывать при крайне незначительном поперечном градиенте температуры, т. е. на каждом этапе температура долеритов в центральной его части мало отличается от температуры на контакте (см. рис. 3), что при одинаковом носителе намагниченности затруднит возможность фиксации компонент разной полярности и нарушит предполагаемую в работе [Латышев и др., 2019] поперечную палеомагнитную зональность, когда апикальная и центральная части интрузии фиксируют намагниченность разной полярности. С геологической точки зрения, само повышение температуры вмещающих пород до модельной может быть достигнуто только путем их прогрева предшествующими интрузиями. Вряд ли это возможно за счет перекрывающих лавовых излияний, даже очень интенсивных, поскольку в таком случае основной отвод тепла будет в атмосферу. Учитывая, что долеритовые силлы внедряются слабо разогретыми и зона

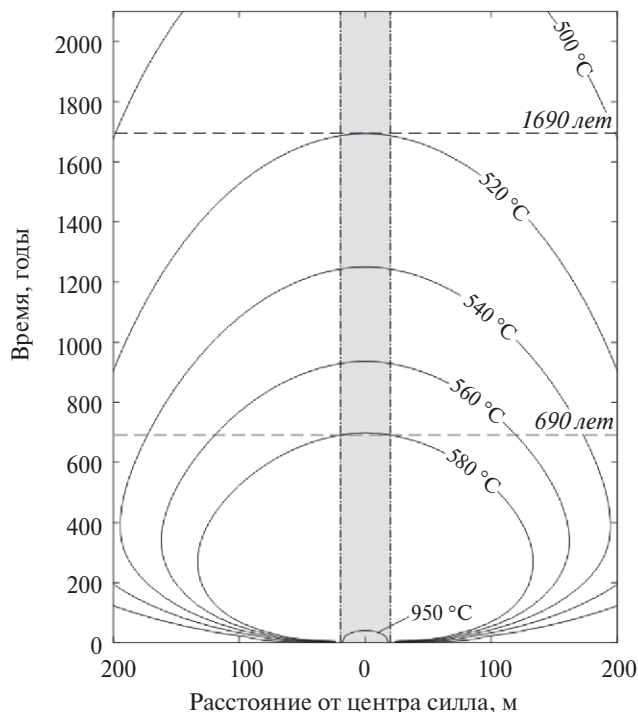


Рис. 3. Динамика остывания долеритового силла мощностью 40 м при температуре вмещающих песчаников 481 °С, когда теоретически возможна фиксация геомагнитного события продолжительностью 1 тыс лет, при условии, что носителями намагниченности являются титаномагнетит и магнетит с блокирующими температурами 520–580 °С. Пояснения в тексте.

активного температурного воздействия на вмещающие породы не более 10–15 м (см. рис 1), реалистичность описанной геологической ситуации, также невысокая. При этом представленный модельный сценарий постулирует, что вмещающие песчаники на расстоянии ~100 м от контакта силла не менее 2 тыс. лет должны находиться при температуре выше 500 °С (рис. 3). Это неминуемо приведет к их значительному, ясно видимому, метаморфическому преобразованию. Возвращаясь к геологическому описанию, представленному в работе [Латышев и др., 2019], следов предварительного прогрева вмещающих пород за счет внедрения интрузий в эпоху обратной полярности и последовавшего за этим высокотемпературного контактового метаморфизма вмещающих песчаников не обнаружено.

В определенной степени последнюю модель также можно рассматривать как первое приближение для обоснования возможности записи магнитной инверсии в крупных пластовых интрузиях при двух последовательных импульсах внедрения, когда новая «порция» расплава внедряется в уже остывающий силл [Annen et al., 2015].

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Представленные результаты математического моделирования ясно показывают ошибочность выводов о возможности записи инверсии геомагнитного поля в изученных в Норильском районе долеритовых силлах ергалахского комплекса [Латышев и др., 2019]. Более того, попытки смоделировать геологическую ситуацию, при которой долериты гипабисальных субвулканических интрузий могли бы записать геомагнитную инверсию, сталкиваются с большими трудностями. Основные параметры, критически влияющие на длительность периода фиксации намагниченности разной полярности в апикальной и центральной частях интрузии, слишком маловероятны. Достаточно просто сопоставить предполагаемое время остывания в целом небольшого по мощности силла – более 1–10 тыс. лет и оценки длительности формирования всего траппового разреза. Хотя точность имеющихся изотопно-геохронологических определений [Dalrymple et al., 1991; Renne, Basu, 1991; Campbell et al., 1992; Reichow et al., 2002; 2009] не позволяет дать корректную оценку этому событию, однако большинство исследователей, в том числе, на основе магнитохронологических данных, склоняются к мнению о его исключительной скоротечности – не более

1 млн лет или даже быстрее [Kamo et al., 2003; Heupemann et al., 2004; Павлов и др., 2011; Веселовский и др., 2012; Михальцов и др., 2012; Латышев и др., 2013]. Однако главная проблема предложенного механизма фиксации инверсии заключается не столько в узком временном диапазоне магматизма и отличии конкретной геологической ситуации от теоретически необходимой, сколько в принципиальной невозможности его реализации. Для этого необходимо выполнение двух взаимоисключающих условий. С одной стороны, для создания значительного градиента температуры от апикальной части к центру силла необходимо интенсивное охлаждение, что неизбежно ведет к сокращению общего времени остывания интрузии. С другой стороны, предположение о его длительном пребывании в горячем состоянии (не важно, за счет каких факторов) также неизбежно ведет к выравниванию температур внутри тела, т. е. невозможности выполнения первого условия.

Тем не менее, у нас нет никакого сомнения в качестве представленного в работе [Латышев и др., 2019] палеомагнитного материала и самом факте присутствия *R*- и *N*-компонент, соответственно, в апикальной и центральной частях двух изученных силлов. В чем же причина и какое другое объяснение возможно для данного факта? Авторы цитируемой работы, справедливо отмечают, что кроме принятой ими гипотезы о застывании интрузий в момент переходного интервала от обратной к прямой полярности, существует еще два альтернативных объяснения. Это, во-первых, перемагничивание приконтактной зоны силлов, и, во-вторых, эффект самообращения намагниченности.

Первое предположение, вслед за авторами работы [Латышев и др., 2019], мы считаем маловероятным. Основным возможным перемагничивающим фактором, судя по представленной геологической ситуации, может быть прогрев осадочных пород тунгусской серии, вмещающих долеритовые интрузии ергалахского комплекса, во время активного вулканизма с образованием лавовых потоков перекрывающей ивакинской свиты. Такое объяснение сталкивается с целым рядом противоречий. Достаточно напомнить, что блокирующие температуры, при которых произошла фиксация *R*-компоненты в апикальной части силлов, составляют 520–580 °С. Как было показано выше, нагреть до таких температур всю осадочную «раму» мощностью более 100 м посредством поверхностных излияний вряд ли возможно и это, без сомнения, было бы отражено в метаморфизме вмещающих песчаников.

Соответственно, наиболее правдоподобным объяснением может быть самообращение. Наличие этого эффекта, в том числе в траппах Сибирской платформы отмечалось неоднократно [Веселовский и др., 2003; Гапеев, Грибов, 2008; Михальцов и др., 2012; Фетисова и др., 2014; Щербаков и др., 2017]. В частности, при исследовании керна скважины ХС-59 на глубине 1580.9 м, в нижней части ивакинской свиты в центральной части покрова мощностью 67 м обнаружена характеристическая намагниченность прямой полярности. Образцы базальтов того же покрова выше и ниже намагничены обратно [Михальцов и др., 2012]. Поскольку скорость кристаллизации и остывания покровной фации очень высокая, единственным объяснением наличия намагниченности противоположной полярности может быть самообращение. Ее носителями в этом случае, как и в подавляющем большинстве других, являются продукты одно- и гетерофазных изменений титаномагнетита. Собственно, наиболее распространенный тип самообращения связан с наличием в зерне двух взаимодействующих фаз с разной температурой Кюри и/или последовательной кристаллизацией титаномагнетита разного состава, когда намагничивание более «поздней» магнитной фазы происходит в сильном локальном поле существующей фазы с уже приобретенной намагниченностью. Механизмы намагничивания очень разнообразны и подробно изложены в ряде работ [Гапеев, Грибов, 2002; Krasa et al., 2005; Сое et al., 2014; Щербаков и др., 2017]. С этим также связано возникновение «ложных» компонент при пошаговой температурной чистке, одним из приемов идентификации которых является непрерывная температурная чистка [Щербаков и др., 2017]. Применительно к обсуждаемым долеритовым силлам результаты такой чистки подтверждают наличие *N*- и *R*-компонент [Латышев и др., 2019]. Однако непрерывная магнитная чистка позволяет доказать, что возникновение разнонаправленных компонент не связано ни с изменениями магнитных минералов, ни с восстановлением самообращенной компоненты в процессе лабораторных экспериментов по размагничиванию [Щербаков и др., 2017], т. е. не является артефактом пошаговой магнитной чистки, обычно используемой для выявления компонентного состава естественной остаточной намагниченности. Однако в случае частичного самообращения, происходящего в результате межфазного взаимодействия продуктов окисления титаномагнетита, связанная с различными фазами намагниченность в процессе

непрерывной чистки будет разрушаться последовательно и ее результаты не позволят отличить присутствие самообращенной компоненты от действительной фиксации иной полярности внешнего поля.

По результатам термодинамического моделирования с использованием программы Alpha MELTS [Smith, Asimow, 2005], содержание ульвошпинелевой молекулы в составе модельного титаномагнетита составляет 49%. Хотя оценка состава титаномагнетита по программе MELTS неточная [Николаев и др., 2018], нет сомнения, что титаномагнетиты, кристаллизующиеся в равновесии с высокотитанистым силикатным расплавом, также будут характеризоваться повышенной титанистостью. Полученные в результате моделирования по программе MELTS оценки соответствуют крайним значениям титанистости первичномагматического титаномагнетита (47–99%), идентифицированного в ходе микрозондового анализа долеритов ергалахского комплекса [Рябов и др., 2001]. Температура Кюри такого титаномагнетита должна быть не выше 250 °С [Нагата, 1965], тогда как фиксируемые по результатам палеомагнитного анализа деблокирующие температуры не ниже 520 °С [Латышев и др., 2019]. Это косвенно свидетельствует о наличии в исследуемой породе продуктов постсолидусного распада, гетерофазного окисления первичномагматического титаномагнетита и, соответственно, подтверждает предположение о благоприятных условиях для возникновения частичного или полного самообращения. Причем на каждой из стадий изменения титаномагнетита возможны различные механизмы реализации этого эффекта, в том числе при низкой температуре [Гапеев, Грибов, 2002]. В последнем случае, образованные в результате «высокотемпературные» фазы несут химическую, а не термоостаточную намагниченность и установленные деблокирующие температуры *N*- и *R*-компонент вообще никак не связаны с остыванием интрузии. Низкожелезистый титаномагнетит очень неустойчив и момент его преобразования не будет значимо отличаться от момента кристаллизации породы. Соответственно, геологический возраст химической и термоостаточной намагниченности не различим, а временной интервал их приобретения очень короткий. При этом, в рамках представленного выше механизма самообращения, антиподальность образованных компонент вовсе не обязательна, и отрицательный тест обращения, который приводится в работе [Латышев и др., 2019], как

еще один аргумент «против» самообращения, таковым как раз не является.

Однозначно определить соответствует ли наиболее ранняя магнитная фаза, в поле которой происходит самообращение, ивакинскому или сыверминскому эпизоду не представляется возможным, прежде всего из-за отсутствия сведений о его основных причинах и преобладающем механизме. Однако, если наши предположения о гетерофазном окислении, при котором происходит самообращение химической намагниченности вторичного высокожелезистого титаномагнетита верны, «истинной» намагниченностью, скорее всего, является N -компонента. В пользу этого свидетельствует, во-первых, то, что третий из изученных силлов ергалахского комплекса имеет намагниченность исключительно прямой полярности [Латышев и др., 2019]. Во-вторых, очевидно, что процессам окисления наиболее подвержены апикальные части интрузий, где наряду с высокотемпературной R -компонентой, которую мы связываем с самообращением, зафиксированы низкотемпературные (от 120–210 °С до 330–460 °С) N -компоненты [Латышев и др., 2019].

Таким образом, по результатам проведенного математического моделирования и анализа фактического материала, представленного в работе [Латышев и др., 2019] можно заключить следующее.

Построенные математические модели отрицают возможность записи «ивакинско-сыверминской» инверсии в долеритовых силлах Норильского района и свидетельствуют о слабой привлекательности гипабиссальных субвулканических интрузий (силлов/даек) в качестве потенциальных объектов для изучения геомагнитных инверсий или экскурсов. Длительность остывания таких интрузий, включая интервал наиболее вероятного намагничивания (годы или первые десятки лет), на несколько порядков меньше продолжительности инверсионных эпизодов. Исключение составляют лишь очень значительные по мощности тела, однако и в этом случае для фиксации геомагнитной инверсии потребуется немало геологических совпадений и удачного стечения обстоятельств.

Наиболее вероятной причиной присутствия в силлах ергалахского комплекса компонент прямой и обратной полярности является эффект самообращения, что необходимо учитывать при обосновании геологического возраста и субсинхронности/комагматичности интрузивных тел и вулканических пород траппового разреза Норильского района.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФ (проекты 14-37-00030; 19-17-00091), РФФИ (проект 18-05-70035), Минобрнауки РФ (проекты 5.2324.2017/4.6; № 5.4786.2017/6.7), и программы фундаментальных исследований ИНГГ СО РАН и ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веселовский Р.В., Галле И., Павлов В.Э.* Палеомагнетизм траппов долин рек Подкаменная Тунгуска и Котуй: к вопросу о реальности послепалеозойских относительных перемещений Сибирской и Восточно-Европейской платформ // *Физика Земли*. 2003. № 10. С. 78–94.
- Веселовский Р.В., Константинов К.М., Латышев А.В., Фетисова А.М.* Палеомагнетизм субвулканических траппов севера Сибирской платформы: некоторые геологические и методические следствия // *Физика Земли*. 2012. № 9–10. С. 74–87.
- Гапеев А.К., Грибов С.К.* Магнитные свойства интрузивных траппов Сибирской платформы с признаками самообращения естественной остаточной намагниченности // *Физика Земли*. 2008. № 10. С. 75–92.
- Гапеев А.К., Грибов С.К.* Частичное самообращение термоостаточной намагниченности, созданной на гетерофазно-окисленных титаномагнетитах // *Физика Земли*. 2002. № 9. С. 3–12.
- Диденко А.Н.* О возможной причине квазипериодических колебаний частоты геомагнитных инверсий и величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в морских карбонатных породах в фанерозое // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. № 12. С. 1945–1956.
- Диденко А.Н.* О современной связи процессов в ядре и литосфере // *Рос. журн. наук о Земле*. 1999. Т. 1. № 3. С. 187–198.
- Добрецов Н.Л.* Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1155–1158.
- Добрецов Н.Л.* О периодичности и разномасштабных факторах вулканических извержений // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 12. С. 2107–2117.
- Латышев А.В., Веселовский Р.В., Иванов А.В., Фетисова А.М., Павлов В.Э.* Свидетельства кратких интенсивных пиков магматической активности на юге Сибирской платформы (Ангаро-Тасеевская впадина) на основании результатов палеомагнитных исследований // *Физика Земли*. 2013. № 6. С. 77–90.
- Латышев А.В., Ульяхина П.С., Кривоуцкая Н.А.* Признаки записи инверсии геомагнитного поля в термо-триасовых интрузиях ергалахского комплекса (Норильский район) // *Физика Земли*. 2019. № 2. С. 92–110.
- Михальцов Н.Э., Казанский А.Ю., Рябов В.В., Шевко А.Я., Куприш О.В., Брагин В.Ю.* Палеомагнетизм траппов

- северо-западной части Сибирской платформы по результатам исследований керн // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 11. С. 1595–1613.
- Нагата Т.* Магнетизм горных пород. М.: Мир. 1965. 348 с.
- Николаев Г.С., Арискин А.А., Бармина Г.С.* SPINMELT-2.0: Численное моделирование равновесия шпинелид-расплава в базальтовых системах при давлениях до 15 кбар. I. Формулировка, калибровка и тестирование модели // Геохимия. 2018. № 1. С. 28–49.
- Павлов В.Э., Флуто Ф., Веселовский Р.В., Фетисова А.М., Латышев А.В.* Вековые вариации геомагнитного поля и вулканические пульсы в пермо-триасовых траппах Норильской и Маймеча-Котуйской провинций // Физика Земли. № 5. 2011. С. 35–50.
- Печерский Д.М.* Палеомагнитология, петромагнитология и геология. Словарь-справочник для соседей по специальности. М.: ИФЗ РАН. 2006. (<http://paleomag.ifz.ru/>).
- Рябов В.В., Шевко А.Я., Гора М.П.* Магматические образования Норильского района. Т. 1. Петрология траппов. Новосибирск: Нонпарель. 2001. 408 с.
- Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Латышев А.В., Радько В.А., Павлов В.Э.* Магнитная стратиграфия пермо-триасовых траппов долины реки Котуй (Сибирская платформа) в свете новых палеомагнитных данных // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2014. Т. 22. № 4. С. 36–51.
- Щербаков В.П., Латышев А.В., Веселовский Р.В., Цельмович В.А.* Причина возникновения ложных компонент естественной остаточной намагниченности при стандартной пошаговой температурной чистке // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 9. С. 1407–1421.
- Annen C., Blundy J.D., Leuthold J., Sparks R.S.J.* Construction and evolution of igneous bodies: Towards an integrated perspective of crustal magmatism // Lithos. 2015. V. 230. P. 206–221.
- Campbell I.H., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Hill R.I., Stepanov V.* Synchronism of the Siberian Trapps and the Permian-Triassic boundary // Science. 1992. V. 258. P. 1760–1763.
- Channell J.E.T., Vázquez Riveiros N., Gottschalk J., Waelbroeck C., Skinner L.C.* Age and duration of Laschamp and Iceland Basin geomagnetic excursions in the South Atlantic Ocean // Quaternary Science Reviews. 2017. V. 167. P. 1–13.
- Coe R.S., Jarboe N.A., Le Goff M., Petersen N.* Demise of the rapid-field-change hypothesis at Steens Mountain: The crucial role of continuous thermal demagnetization // Earth Planet. Sci. Lett. 2014. V. 400. P. 302–312.
- Cox A.* Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals. – W.H. Freeman & Co Ltd., San Francisco. 1973. 702 p.
- Dalrymple G.B., Czamanske G.K., Lanphere M.A., Stepanov V., Fedorenko V.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar ages from samples from Noril'sk-Talnakh ore bearing intrusions and the Siberian flood basalts, Siberia // EOS. 1991. V. 72. P. 570.
- Ferk A., Leonhardt R.* The Laschamp geomagnetic field excursion recorded in Icelandic lavas // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009. V. 177. P. 19–30.
- Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M.* The Geological Time Scale. Elsevier. 2012. 1144 p.
- Gurevitch E.L., Heunemann C., Rad'ko V., Westphal M., Bachtadse V., Pozzi J.P., Feinberg H.* Palaeomagnetism and magnetostratigraphy of the Permian-Triassic northwest central Siberian Trap Basalts // Tectonophysics. 2004. V. 379. P. 211–226.
- Gutiérrez F., Parada M.A.* Numerical Modeling of Time-dependent Fluid Dynamics and Differentiation of a Shallow Basaltic Magma Chamber // Journal of Petrology. 2010. V. 51. Iss. 3. P. 731–762. doi:10.1093/petrology/egp101
- Herrero-Bervera E., Valet J.-P.* Paleosecular variation during sequential geomagnetic reversals from Hawaii // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 171. P. 139–148.
- Heunemann C., Krasa D., Soffel H., Gurevitch E., Bachtadse V.* Directions and intensities of the Earth's magnetic field during a reversal: results from the Permo-Triassic Siberian trap basalts, Russia // Earth and Planetary Science Letters. 2004. V. 218. P. 197–213.
- Huppert H.E., Sparks R.S.J.* The Generation of Granitic Magmas by Intrusion of Basalt into Continental Crust // Journal of Petrology. 1988. V. 29. P. 599–624. doi:10.1093/petrology/29.3.599
- Jarboe N.A., Coe R.S., Glen J.M.G.* Evidence from lava flows for complex polarity transitions: the new composite Steens Mountain reversal record // Geophys. J. Int. 2011. V. 186. P. 580–602.
- Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu., Fedorenko V.A., Davis D.W., Trofimov V.R.* Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 214. P. 75–91.
- Krásá D., Shcherbakov V.P., Kunzmann T., Petersen N.* Self-reversal of remanent magnetisation in basalts due to partially oxidised titanomagnetites // Geophys. J. Int. 2005. 162 (1). P. 115–136.
- Lind E., Kropotov S., Czamanske G., Gromme S., Fedorenko V.* Paleomagnetism of the Siberian Flood Basalts of the Noril'sk Area: A Constraint on Eruption Duration // International Geology Review. 1994. V. 36. № 12. P. 1139–1150.
- McDougall I.* The present status of the geomagnetic polarity time scale // In: The Earth: Its Origin, Structure and Evolution / McElhinny M.W. (ed). Academic Press. London. 1979. P. 543–566.
- Merrill R.T., McFadden P.L.* Geomagnetic polarity transitions // Rev. Geophys. 1999. V. 37. P. 201–226.
- Morris A.* A palaeomagnetism and rock magnetic glossary // Tectonophysics. 2003. V. 377. P. 211–228
- Narteau C., Le Mouél J.-L., Valet J.-P.* The oscillatory nature of the geomagnetic field during reversals // Earth and Planetary Science Letters. 2007. V. 262. P. 66–76.

- Olson P.L., Glatzmaier G.A., Coe R.S.* Complex polarity reversals in a geodynamo model // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 304. P. 168–179.
- Opdyke N.D., Channell J.E.T.* Magnetic stratigraphy. Academic Press., NY. 1996. 346 p.
- Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D.* The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 277. P. 9–20.
- Reichow M.K., Saunders A.D., White R.V., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.L., Medvedev A.I., Kirda N.P.* ⁴⁰Ar/³⁹Ar dates from the West Siberia basin: Siberia flood basalt province doubled // *Science.* 2002. V. 296. P. 1846–1849.
- Renne P.R., Basu A.R.* Rapid eruption of the Siberian traps flood basalts at Permo-Triassic Boundary // *Science.* 1991. V. 253. P. 176–179.
- Schön J.H.* Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Pergamon. 1998. 583 p.
- Skeel R.D., Berzins M.* A method for the spatial discretization of parabolic equations in one space variable // *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing.* 1990. V. 11. Iss. 1. P. 1–32.
- Smith P.M., Asimow P.D.* Adibat_1 ph: A new public front-end to the MELTS, pMELTS, and pHMELTS models // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2005. V. 6. Q02004.
- Valet J.-P., Fournier A., Courtillot V., Herrero-Bervera E.* Dynamical similarity of geomagnetic field reversals // *Nature.* 2012. V. 490. P. 89–93.
- Wicht J., Meduri D.G.* A gaussian model for simulated geomagnetic field reversals // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2016. V. 259. P. 45–60.

On a Possibility of Geomagnetic Reversal Recording in Dolerite Sills of Norilsk Region: Results of Mathematical Modeling

D. V. Metelkin^{a,b,*}, A. V. Lavrenchuk^{c,a}, and N. E. Mikhaltsov^{b,a}

^a*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

^b*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

^c*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

*E-mail: metelkindv@ipgg.sbras.ru

Received May 5, 2018

The possibility of reconstructing the geological chronicle by identifying the peculiarities in the variations of the Earth's magnetic field associated with the reversals is one of the fundamental applications of paleomagnetism. The most detailed records of reversal events whose duration is, on average, one to ten thousand years have been recognized from the results of studying flood basalts of the large igneous provinces. At the same time, recent publications report the facts that are interpreted as a record of a geomagnetic reversal in the intrusion bodies. Inter alia, these data have been obtained for the relatively thin Ergalakh dolerite sills in the Norilsk region of the Siberian trap province which are supposed to have recorded the «Ivakinsky-Syverminsky» reversal corresponding to the Permian–Triassic boundary. The interpretation is based on the hypothesis of slow cooling of the intrusion during which its apical parts are magnetized during the Ivakinsky epoch of reversed polarity whereas the central parts acquire magnetization after the reversal during the Syverminsky time corresponding to normal polarity. In this paper, we consider the results of mathematical modeling to discuss the validity of these assumptions and the potential eligibility of subvolcanic intrusions as a source of information for studying geomagnetic reversals. It is shown that the duration of their cooling including the interval of the most probable magnetization is a few orders of magnitude shorter than the duration of the reversal transitions, whereas the presence of the components with normal and reversed polarity is most likely to be due to the effect of self-reversal.

Keywords: paleomagnetism, geomagnetic reversals, dolerite sill, mathematical modeling, dynamics of cooling, magnetization self-reversal