

УДК 550.38

## НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА РУБЕЖЕ ПЕРМИ-ТРИАСА: К ВОПРОСУ О МЕЗОЗОЙСКОМ НИЗКОМ ДИПОЛЕ

© 2024 г. Член-корреспондент РАН Д. В. Метелкин<sup>1,2,\*</sup>, А. А. Елисеев<sup>1,2</sup>,  
В. В. Щербакова<sup>3</sup>, Н. Э. Михальцов<sup>2,1</sup>, Г. В. Жидков<sup>3</sup>, В. В. Абашев<sup>2,1</sup>

Поступило 24.07.2024 г.

После доработки 16.08.2024 г.

Принято к публикации 19.08.2024 г.

Представлены новые оценки величины напряженности геомагнитного поля для рубежа перми-триаса. На фоне преобладающих в Мировой базе данных низких значений палеонапряженности для этого периода, в разрезах трапповой формации Кузнецкого прогиба зафиксированы эпизоды повышения величины виртуального дипольного момента до  $8.9 \times 10^{22} \text{ Ам}^2$ , которые не вписываются в представления о мезозойском низком диполе. Анализ данных об изменении величины виртуального дипольного момента во время образования Сибирской крупной магматической провинции в рамках современных магнитостратиграфических корреляций свидетельствует об устойчиво слабом геомагнитном поле только на инициальной стадии, когда была сформирована большая часть ее Норильского ареала. Смена геомагнитного режима отмечается спустя  $\sim 800$  тыс. лет на уровне субхрона LT1n.1r (251.2–251.1 млн лет) общей магнитохронологической шкалы и зафиксирована в покровах андезибазальтов Кузнецкого ареала. Низкие значения виртуального дипольного момента с этого времени отвечают эпизодам инверсий, а общая напряженность в среднем лишь немного ниже современной. Таким образом, падение палеонапряженности в самом начале триаса не связано с кардинальной долгосрочной перестройкой в работе геодинамо, а носило кратковременный характер, связанный с плюмовой активностью.

**Ключевые слова:** палеонапряженность, метод Телье–Коэ, Кузнецкий прогиб, граница перми-триаса, Сибирская крупная магматическая провинция, мезозойский низкий диполь

**DOI:** 10.31857/S2686739724120035

Для адекватной оценки эволюции магнитного поля Земли необходима надежная палеомагнитная запись. По сравнению с данными о палеомагнитных направлениях и их вариациях, Мировая база данных о напряженности геомагнитного поля (<http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/database.html>) более скудная и заполнена очень неравномерно относительно шкалы геологического времени. Это, в частности, связано с особыми требованиями к анализируемому каменному материалу, ограничениями технического

и методического плана. Одним из наиболее подходящих объектов для анализа напряженности древнего магнитного поля являются породы крупных магматических провинций. Поэтому не удивительно, что позднепермский-раннетриасовый интервал мировой базы данных о палеонапряженности заполнен определениями, полученными, в основном, по Сибирским траппам. Подавляющее большинство выполненных оценок проведено по базальтам Норильского и Маймеча-Котуйского районов и указывает на минимум втрое более низкую по сравнению с современной напряженностью геомагнитного поля [1–4]. Эти данные, несмотря на их сравнительную многочисленность, не позволяют делать уверенные выводы об эволюции магнитного поля в течение всего мезозоя, однако поддерживают гипотезу о существовании длительного интервала низкого дипольного момента. Впервые эта идея была высказана на основе оценок палеонапряженности для юрско-ран-

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Геофизическая обсерватория Борок, филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук, Ярославская область, Некоузский район, пос. Борок, Россия

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

немелового (180–120 млн лет) интервала [5]. Затем, с появлением первых данных о величине виртуального дипольного момента (ВДМ) в разрезах крупной Сибирской магматической провинции, было высказано предположение о начале периода “мезозойского низкого диполя” (МНД) непосредственно на границе перми-триаса, около 250 млн лет назад [1]. Гипотеза МНД неоднократно подвергалась критике, основой которой является необходимость введения жестких критериев фильтрации данных по их надежности, включая недостатки анализа магнитных свойств изучаемых образцов и статистической обоснованности результатов [6]. Так, для пород интрузивной фации Сибирской крупной магматической провинции получены единичные, отвечающие общепринятым критериям, определения абсолютного значения древнего геомагнитного поля ( $B_{anc}$ ), сравнимые по величине с современным [7]. По мнению авторов, не исключено, что низкие значения палеонапряженности в ряду уже имеющихся определений могли быть получены на коллекциях пород с зернами многодоменного размера, без изучения доменного состояния носителей остаточной намагниченности. Как показано в лабораторных экспериментах, на образцах с крупными многодоменными частицами оценка напряженности по диаграмме Арай–Нагата (АН) дает сильно завышенные значения поля в низкотемпературном интервале и заниженные – в высокотемпературном интервале [2].

Таким образом вопрос о величине геомагнитного поля на рубеже перми и триаса, равно как и гипотеза МНД остаются открытыми. В настоящей работе мы представляем новые данные об абсолютной величине напряженности геомагнитного поля того времени по результатам палеомагнитного изучения траппов Кузнецкого ареала Сибирской крупной магматической провинции (рис. 1).

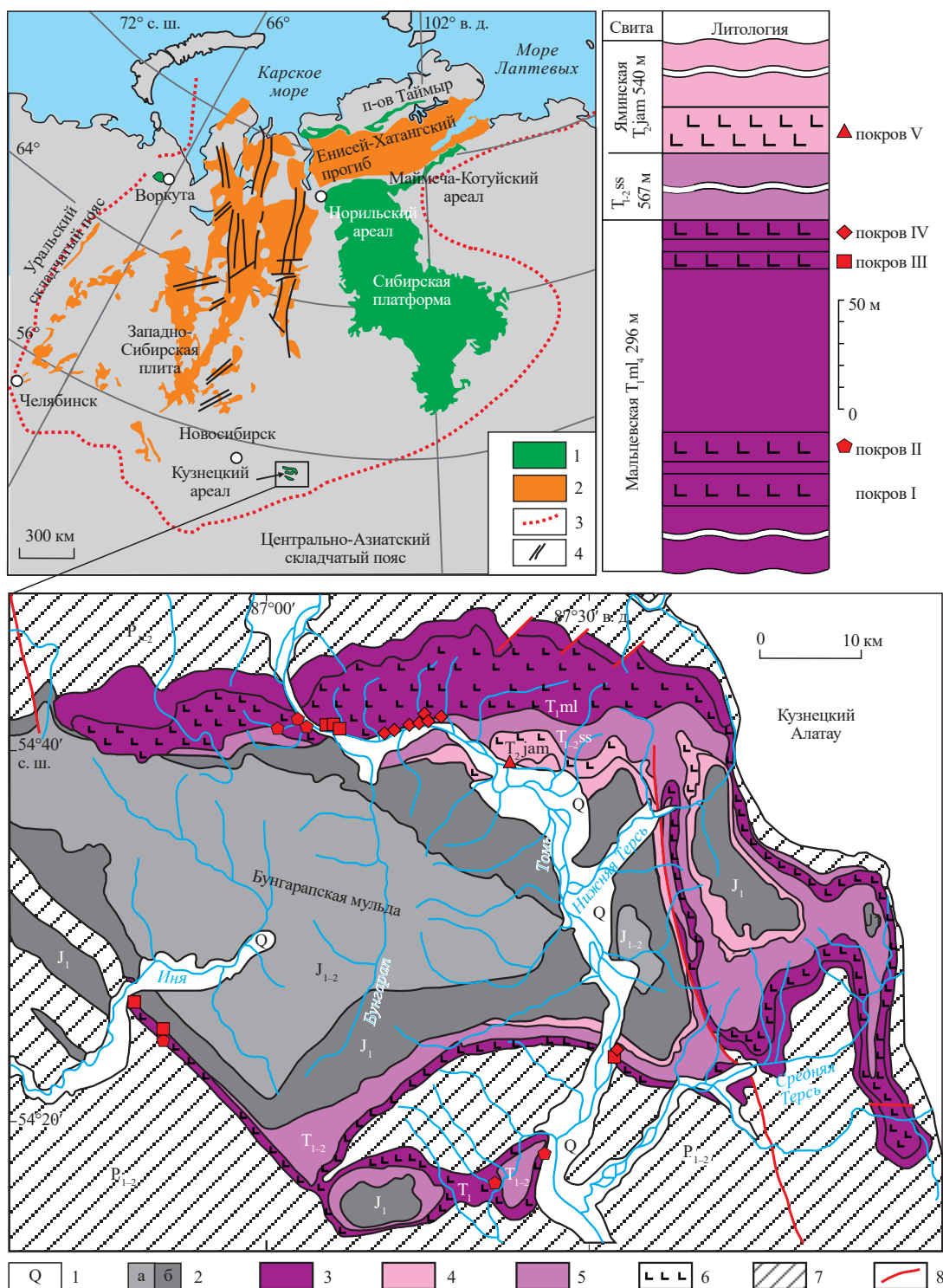
Изверженные породы Кузнецкого ареала выполняют крупную синформу в центральной части одноименного прогиба, расположенного в северо-западной части Алтае-Саянской области на юге Сибири. Покровная фация траппового комплекса включена в состав абинской вулканогенно-осадочной серии, в которой выделяют мальцевскую, сосновскую и яминскую свиты. В разрезе насчитывается не менее 5 крупных покровов базальтов и андезибазальтов [8], которые, за исключением самого нижнего, составили объект настоящего исследования (рис. 1). Основное проявление магматической активности

приходится на мальцевское вулканическое событие. На основе комплексного геохронологического, палеонтологического и палеомагнитного анализов установлено, что его начало отвечает границе субхронов  $LT1n.1n - LT1n.1r$  (251.2 млн лет) и предполагает корреляцию покровов мальцевской свиты с верхней частью онкучакской – низами тыванкитской (?) свит Маймечы-Котуйского ареала [8].

Лабораторные эксперименты проведены с использованием аппаратуры палеомагнитных лабораторий НГУ, ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) и Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН (г. Москва).

Результаты предшествующего исследования [9, 10] свидетельствуют о преобладании в магнитной фракции изученных пород титаномагнетита. Для установления его состава и степени окисления на нескольких образцах был выполнен рентгеноструктурный анализ, который показал наличие шпинельной фазы с величиной постоянной решетки от 0.843 до 0.847 нм. Согласно термомагнитным экспериментам [9, 10] температуры Кюри этих образцов изменяются от 250 до 420°C, что по диаграмме Нишитани–Коно [11] соответствует неокисленному титаномагнетиту с содержанием ульвошпинелевой компоненты от 0.35 до 0.5. Двумя методами – по диаграмме Дзя и температурному критерию – выполнялась оценка доменного состояния магнитных зерен – носителей изучаемой остаточной намагниченности. Оба способа – анализ гистерезисных параметров и полное разрушение наведенной парциальной намагниченности (“хвосты” при повторном нагреве образца) указывают на однодоменное и/или псевдооднодоменное поведение титаномагнетитовых зерен [8, 9]. Этот вывод подтверждается также микроснимками, на которых видно, что субмикронные частицы титаномагнетита запечатаны в силикатной основной массе среди крупных зерен породообразующих плагиоклаза и пироксена (рис. 2). Таким образом обеспечиваются идеальные условия для сохранности палеомагнитной записи, поскольку магнитные зерна надежно защищены от возможных химических преобразований во время “жизни” породы.

Анализ серий кривых намагниченности насыщения  $M_{si}(T)$ , записанных при последовательных нагревах до возрастающих температур  $T_i$  (см. рис. 2), указывает на стабильность  $M_s(T)$  до 300–400°C и изменение ее стабильности выше этих температур.

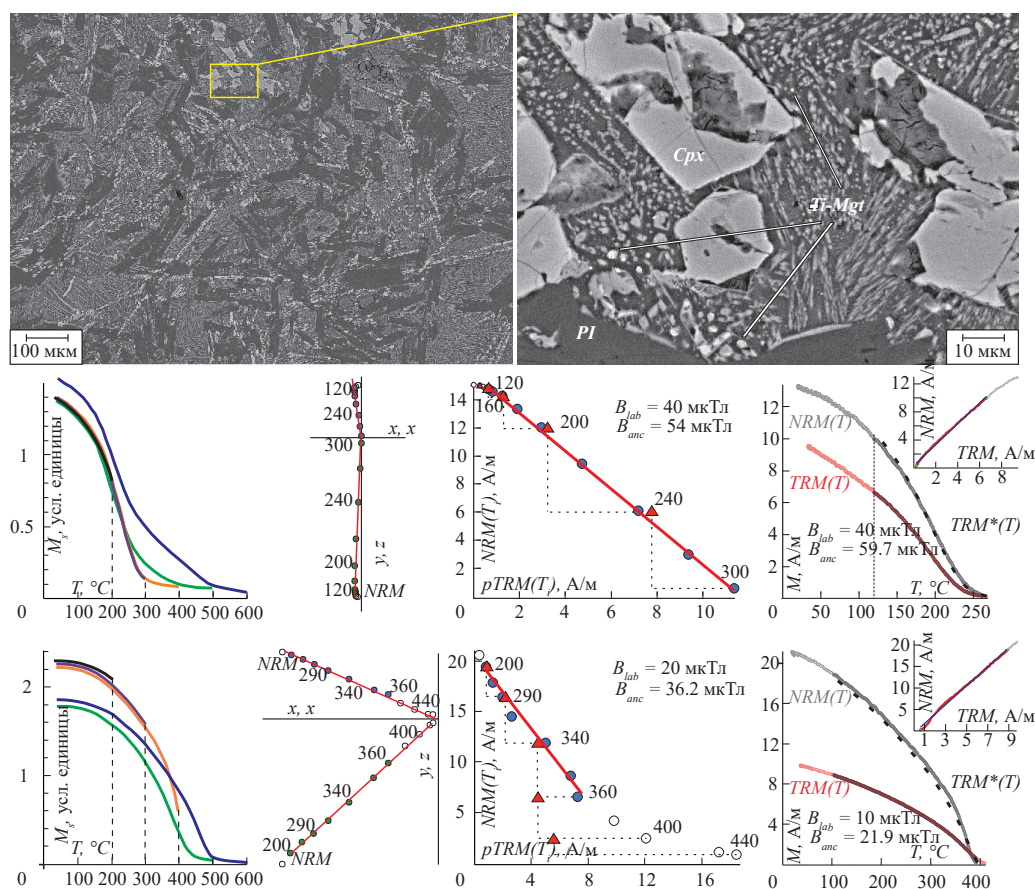


**Рис. 1.** Географическое положение и геологическое строение Кузнецкого ареала Сибирской крупной магматической провинции, по [8] с упрощениями. Условные обозначения к принципиальной схеме Сибирской крупной магматической провинции: 1 – траппы обнажённые; 2 – траппы погребённые; 3 – граница магматической провинции; 4 – крупные грабен-рифтовые структуры. Условные обозначение к схеме геологического строения Кузнецкого ареала и разреза траппового комплекса: 1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – угленосная моласса нижнеюрская (а) и среднеюрская (б); 3–5 – стратиграфические подразделения осадочно-вулканогенного траппового разреза нижнего триаса: 3 – мальцевская свита; 4 – сосновская свита; 5 – яминская свита; 6 – покровы базальтов и андезибазальтов в разрезе траппового комплекса; 7 – ниже-среднепермская угленосная моласса; 8 – разломы. Условные обозначения точек опробования на схеме и разрезе соответствуют рис. 3.

Определение абсолютных значений палеонапряженности проводилось методом Телье–Коэ с выполнением процедуры check-points (повторных нагревов до более низких температур), которая позволяет отслеживать возможные химические преобразования исходного титаномагнетита в процессе эксперимента. Результаты представлены в виде АН-диаграмм (рис. 2). У всех изученных образцов АН-диаграммы и графики ступенчатого терморазмагничивания (ортогональные диаграммы Зийдervельда) в интервале температур 200–400 °С, где магнитные свойства стабильны, являются линейными. Позиции контрольных и первичных точек на АН-диаграммах близки друг к другу (см рис. 2), что указывает на отсутствие химических изменений в образце при соответствующих

температурах. На диаграммах Зийдervельда в этой области температур прослеживается только одна характеристическая (ChRM) компонента, деблокирующие температуры которой редко превышают теоретические  $T_c$ . По линейному участку (fit-интервалу) АН-диаграмм выполнялась оценка абсолютной величины напряженности  $B_{anc}$  и рассчитывались соответствующие параметры достоверности. Результаты около 140 из 300 проделанных экспериментов удовлетворяют принятым критериям надёжности [12].

Для верификации полученных оценок выполнены процедуры определения  $B_{anc}^*$  методом Вилсона–Буракова. Соответствующие графики демонстрируют подобие кривых NRM и TRM\* (см рис. 2), а полученные значения близки к оценкам  $B_{anc}$  методом Телье–Коэ, которые



**Рис. 2.** Микроснимки представительного образца в крупном масштабе и увеличенный в 10 раз фрагмент с указанием отображений плагиоклаза (Pl), клинопироксена (Cpx), титаномагнетита (Ti-Mgt) и результаты экспериментов по изучению палеонапряженности для III (сверху) и V (внизу) покровов, слева–направо характерные: графики изменения намагниченности насыщения  $M_s$  от температуры при последовательных нагревах (разным цветом показаны соответствующие температурные интервалы); ортогональные диаграммы Зийдervельда в координатах образца по результатам ступенчатого терморазмагничивания; диаграммы Арай–Нагата (заполненные и полые точки – экспериментальные значения, вошедшие и не вошедшие в интервал аппроксимации, красная прямая – линия тренда, треугольники – проверочные точки); термомагнитные кривые NRM и TRM для оценки палеонапряженности методом Вилсона–Буракова и график зависимости NRM(T) и TRM(T), пояснения в тексте.

суммированы в таблице. Для расчета ВДМ использована стандартная формула:

$$\text{ВДМ} = 0.5 \cdot B_{\text{anc}} r^3 \sqrt{1 + 3 \cos^2 I} \cdot 10^7,$$

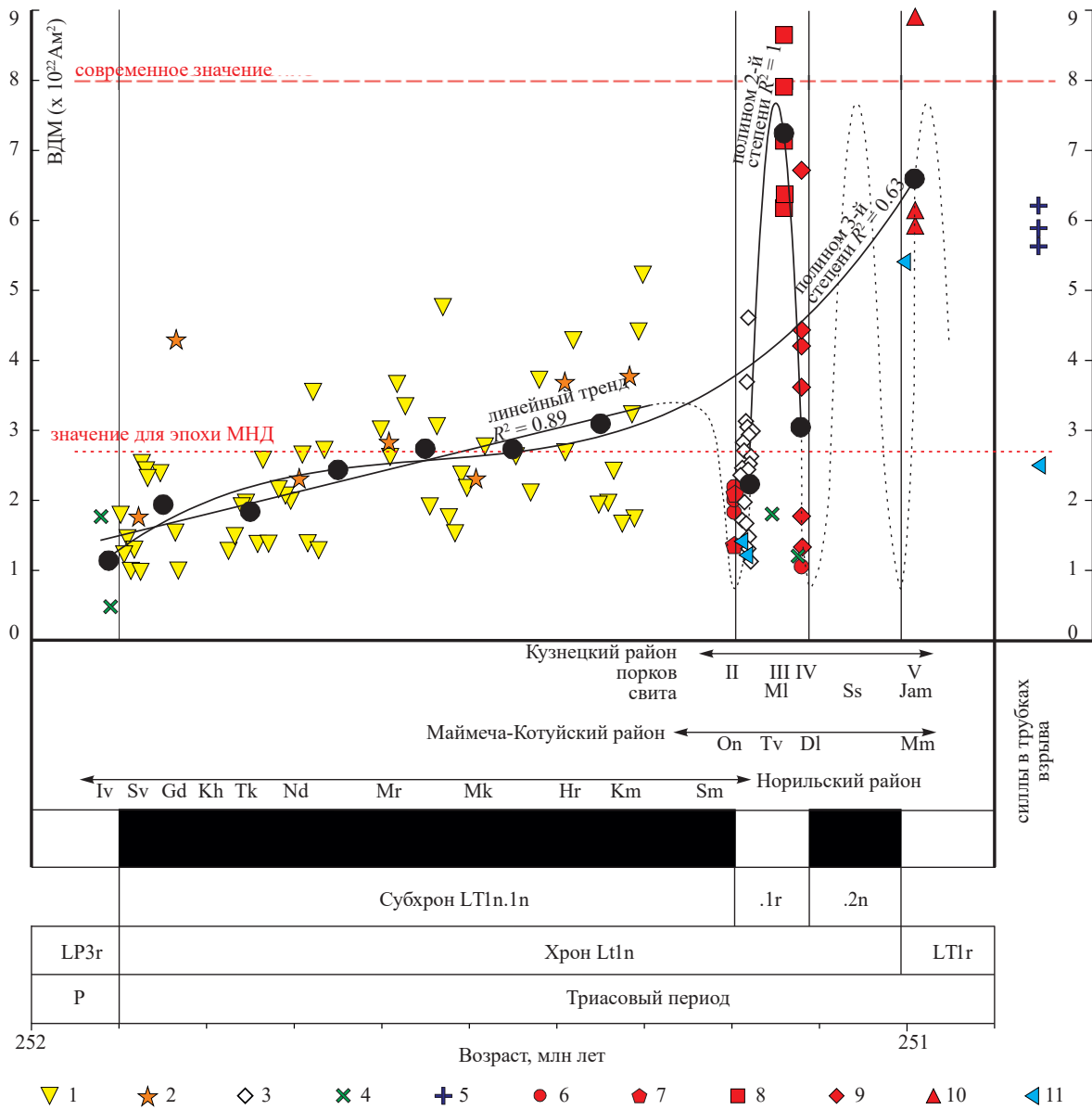
где  $B_{\text{anc}}$  — среднее в точке отбора значение палеонапряженности,  $r$  — радиус Земли,  $I$  — палеонаклонение вектора естественной остаточной намагниченности в соответствующей точке отбора.

Исключительно низкие значения ВДМ ( $1.33\text{--}2.19 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ) соответствуют только покрову II. Вновь полученные данные полностью подтверждают уже имеющиеся оценки по этому покрову Кузнецкого ареала [9] и сопоставимы с наиболее низкими ВДМ для всей Сибирской магматической провинции (рис. 3). Основную часть иллюстрируемой базы представляют определения, полученные по базальтам стратифицированных разрезов Норильского магматического ареала, формирование которых

**Таблица 1.** Результаты экспериментов по изучению палеонапряженности в траппах Кузнецкого ареала

Точка отбора			Палеонаправление					Палеонапряжённость					ВДМ · 10 <sup>22</sup> А·м <sup>2</sup>	
№	Lat	Lon	Nd	Dec °	Inc °	k	α95 °	N/n	B <sub>anc</sub> μТ	St.err. μТ	St.dev. μТ	St.dev. %	ВДМ	St.dev.
Покров V														
20Ad15	54.650	87.374	11	266.9	−49.8	361.4	2.4	12/15	30.50	2.05	7.11	23.3	5.92	1.38
20Ad16	54.650	87.369	11	267.2	−48.8	69.9	5.5	7/15	45.60	7.06	18.68	41.0	8.9	3.65
20Ad17	54.650	87.370	12	272.1	−58.9	68.0	5.3	11/13	35.38	1.99	6.60	18.7	6.14	1.15
Покров IV														
ad03*	54.683	87.220	11	248.0	−63.5	173.4	3.6	11/19	6.5	1.2	3.9	60.0	1.05	0.65
20Ad04	54.689	87.260	11	241.0	−59.3	133.3	4.0	5/8	7.75	1.25	2.78	35.9	1.34	0.48
20Ad10	54.680	87.203	16	256.2	−70.3	538.7	1.6	9/16	44.78	4.11	12.33	27.5	6.71	1.85
20Ad13	54.687	87.235	9	258.6	−60.7	63.6	6.5	5/10	26.13	8.57	19.16	73.3	4.43	3.25
20Ad14	54.688	87.239	10	251.1	−57.8	85.3	5.3	8/11	20.49	4.78	13.51	65.9	3.61	2.38
20Ad19	54.689	87.268	9	241.2	−57.9	193.8	3.7	7/11	10.08	1.02	2.70	26.8	1.77	0.47
20Ad22	54.392	87.532	13	223.7	−74.2	299.1	2.4	12/12	29.41	3.00	10.40	35.3	4.2	1.48
Покров III														
Ad06	54.428	86.834	14	216.4	−66.5	360.7	2.1	11/25	45.39	1.06	3.53	7.8	7.13	0.55
Ad07	54.428	86.834	10	227.7	−70.4	379.1	2.5	8/19	42.46	1.78	5.03	11.8	6.35	0.75
19Bk10	54.406	86.858	10	207.1	−65.6	111.7	4.6	12/14	54.32	2.89	10.01	18.4	8.64	1.59
20Ad02	54.682	87.111	10	195.6	−76.6	88.1	5.2	10/10	56.71	1.94	6.13	10.8	7.9	0.85
20Ad03	54.682	87.110	10	217.7	−77.1	412.1	2.4	8/10	44.51	0.61	1.74	3.9	6.17	0.24
Покров II														
ad01*	54.710	87.040	13	212.7	−67.0	354.5	2.2	10/14	13.5	0.73	2.3	17.0	2.19	0.37
ad02*	54.706	87.014	7	213.2	−68.4	620.9	2.4	8/8	11.3	0.36	1	8.8	1.83	0.16
ad05*	54.693	87.064	12	233.5	−65.3	163.0	3.4	16/19	12.4	0.8	3.1	25.0	2.01	0.51
19Bk09	54.406	86.858	8	218.5	−70.9	161.9	4.4	6/13	8.95	0.32	0.77	8.6	1.33	0.11
20Ad23	54.275	87.358	10	219.4	−71.3	202.2	3.4	10/10	13.81	1.15	3.63	26.3	2.04	0.54

Примечание. Lat и Lon — северная широта и восточная долгота точки отбора; Nd — количество использованных в статистике среднего палеонаправления независимо ориентированных образцов; Dec и Inc — палеомагнитные склонение и наклонение в стратиграфических координатах; k — кучность; α95 — радиус 95%-го круга доверия; N/n — количество использованных при определении палеонапряженности к общему количеству образцов, изученных методом Телье—Коз; St.err — стандартная ошибка; St.dev — стандартное отклонение. Сведения о средних палеонаправлениях согласно данным, опубликованным в [8–10]; \* — данные о палеонапряженности заимствованы из [9].



**Рис. 3.** Значения виртуального дипольного момента (данные Мировой базы о палеонапряжённости) для интервала формирования Сибирской крупной магматической провинции. Магнитохронологическая привязка согласно схемам корреляции, предложенным в [13, 8], с упрощением о равномерности формирования вулканического разреза. Линии трендов (сплошные черные линии) рассчитаны по средним значениям для интервалов 100 и 30 тыс. лет (черные точки), прерывистой линией показаны предполагаемые линии трендов на интервалах с отсутствующими фактическими данными. Буквами обозначены свиты Норильского ареала: Iv – ивакинская, Sv – сыверминская, Gd – гудчихинская, Kk – хакачанская, Tk – туклонская, Nd – надеждинская, Mr – моронговская, Mk – мокулаевская, Hr – хакачанская, Km – кумгинская, Kmx – самоедская; Маймеча-Котуйского ареала: On – онкучакская, Tv – тыванкитская, Dl – дельканская, Mm – маймечинская, Кузнецкого ареала: Ml – мальцевская, Ss – сосновская, Jam – яминская. Условные обозначения: Значения ВДМ опубликованные в: 1 – [1]; 2 – [2]; 3 – [3]; 4 – [4]; 5 – [7]; 6 – [9]; 7–10 – настоящая работа: 7 – покров II, 8 – покров III, 9 – покров IV, 10 – покров V; 11 – [14].

отвечает нижнему субхрону LT1n.1n, согласно корреляции, предложенной в [13, 8]. Фактические данные о палеонапряжённости для позднего этапа магматизма, соответствующего верхней части хрона LT1n, представлены преимущественно определениями по онкучакской

свите Маймеча-Котуйского ареала, верхние горизонты которой коррелируют с основанием субхрона LT1n.1r. Формирование покрова II в Кузнецком ареале, согласно принятым магнитостратиграфическим построениям, отвечает тому же времени [8].

Данные для верхней части разреза Маймеча-Котуйского ареала в составе тыванкитской и низов дельканской свит, соответствующих основной части субхрона LT1n.1r и времени главного мальцевского импульса вулканизма на территории Кузнецкого ареала, ограничены всего двумя определениями [4]. Таким образом, полученные нами данные по покровам III и IV дают качественно новое представление о вариациях абсолютной величины напряженности геомагнитного поля в узком интервале 251.1–251.2 млн лет (рис. 3).

Значения ВДМ для времени формирования покрова IV отличаются наиболее сильной изменчивостью. Тем не менее, полученные оценки указывают на преобладающий низкий ВДМ ( $1.05\text{--}4.43 \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$ ). В целом такие значения полностью соответствуют имеющимся ВДМ для Сибирских траппов и, если провести их осреднение (всего 95 определений, без учета высоких  $>6 \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$  значений), то ВДМ для времени всего хрона LT1n составит  $2.4 \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Это более чем в 3 раза ниже современного, как и предполагается в модели МНД. Тем не менее, одно определение по покрову IV никак нельзя назвать низким. Его значение  $6.88 \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$  приближается к абсолютной величине ВДМ современного геомагнитного поля (рис. 3). При этом оно соответствует минимальным ВДМ для покрова III, а средний ВДМ для времени формирования покрова III –  $7.24 \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$  вообще не отличается от современного в пределах погрешности (рис. 3).

Завершение вулканизма в Кузнецком ареале и формирование покрова V в яминской свите абинской серии, которое, согласно [8], может быть сопоставлено со временем образования маймечинской свиты Маймеча-Котуйского магматического ареала и приходится на начало хрона LT1r, до сих пор было охарактеризовано только одним определением ВДМ [14]. Мы добавили еще три достоверно обоснованных значения (рис. 3). Средний ВДМ для времени формирования покрова V близок полученному ранее и составляет  $6.99 \cdot 10^{22} \text{ А}\cdot\text{м}^2$ , что лишь немного ниже современного уровня и также не вписывается в характерные для МНД.

Таким образом, новые данные и анализ имеющихся для рубежа перми-триаса сведений о величине ВДМ позволяют утверждать, что режим

эволюции магнитного поля Земли в период траппового магматизма на рубеже перми-триаса нельзя описать моделью МНД. Представленное распределение ВДМ демонстрирует четкую тенденцию к росту от экстремально низких до сопоставимых современным (рис. 3). Подобрать единую функцию, хорошо описывающую характер этого роста, не представляется возможным из-за неоднородности выборки и больших вариаций анализируемых значений, особенно в правой части графика (рис. 3). Наилучшей аппроксимацией может быть полином 3-й степени, однако и в этом случае величина достоверности аппроксимации ( $R^2$ ) не удовлетворительна. Тем не менее представленная выборка может быть разделена на две составные части, очевидно, описывающие разный режим работы геодинамо.

Основной этап формирования Сибирской крупной магматической провинции (Норильский ареал), соответствующий субхрону LT1n.1n, действительно, можно сопоставить с эпизодом слабого магнитного поля. Тем не менее, в течение всего этого времени на протяжении более чем 800 тыс. лет намечается плавный рост ВДМ. Аппроксимировать рассчитанные средние значения можно простым линейным трендом, при этом  $R^2$  близко к 1, что указывает на высокую степень корреляции (рис. 3).

Смена геомагнитного режима, выход из состояния низкого диполя отмечается в мальцевское время на уровне субхрона LT1n.1r. Исключительно повышенные ВДМ зафиксированы нами на уровне средней части мальцевской и в яминской свитах. Для разрезов Маймеча-Котуйского ареала такие же относительно высокие значения можно ожидать преимущественно в тыванктинской свите, а также вышележащих дельканской и маймечинской свитах, которые изучены пока слабо. Из-за пробела в данных для времени субхрона LT1n.2n достоверный тренд вариации значений ВДМ построить нельзя, тем не менее характер распределения имеющихся значений предполагает возможность синусоидальной картины изменения абсолютной величины напряженности геомагнитного поля с минимумами во время инверсий. Так, для интервала LT1n.1r, характерны сильные вариации ВДМ. При этом относительное падение напряженности соответствует границам субхрона, что логично объяснить в рамках механизма инверсии [15]. Единичные низкие ВДМ внутри субхрона скорее всего связаны с неточностью обоснования возраста либо прочими формальными обстоятельствами, поскольку длительность всего эпизода LT1n.1r составляет не более 100 тыс. лет.

Таким образом, возвращаясь к проблеме МНД, приходится заключить, что рубеж перми-триаса вряд ли можно рассматривать в качестве отправной точки в эволюции магнитного поля Земли в состоянии низкого диполя. Снижение ВДМ в это время носило кратковременный характер и, вероятно, обусловлено резким отводом накопленного в ядре избыточного тепла плюмами, прежде всего Сибирским. Мощность только этого события, согласно имеющимся оценкам, составляла более  $2.5 \cdot 10^9$  кВт [16]. Нет сомнений в том, что Сибирский плюм стал важнейшим регулятором глубинного термодинамического режима и, соответственно, характера работы геодинамо в то время [17–20].

Полученные новые данные и сделанные выводы имеют также практическое применение. В частности, зафиксированный факт перехода режима магнитного поля из состояния низкого диполя на инициальной стадии формирования Сибирской крупной магматической провинции к полю нормальной напряженности на рубеже 251.1–251.2 млн лет может быть использован для уточнения корреляции вулканических разрезов и интрузивных комплексов известных ареалов. Так, повышенные значения ВДМ, определенные в интрузивных породах района трубок взрыва Юбилейная, Сытыканская и Айхал (см рис. 3) [7], позволяют утверждать, что возраст их внедрения не может быть древнее 251.2 млн лет.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда: проект № 23-77-01065 (результаты экспериментов по изучению палеонапряженности), проект № 24-17-00057 (результаты, связанные с анализом геологического строения и геодинамическими событиями), а также Минобрнауки России тема FSUS-2020-0039 (результаты, связанные с анализом зависимости напряженности геомагнитного поля и эволюцией мантийных плюмов). Тематика исследования скоординирована с программой фундаментальных научных исследований РАН: FWZZ-2022-0001 и FMWU-2022-0026.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 218. P. 197–213.
2. Щербакова В. В., Щербаков В. П., Водовозов В. Ю., Сычева Н. К. Палеонапряженность на границе пермь — триас и в поздней перми // *Физика Земли.* 2005. № 11. С. 79–94.
3. Щербакова В. В., Жидков Г. В., Латышев А. В., Щербаков В. П. Оценка вариаций палеонапряженности по сибирским траппам Маймеча-Котуйского и Норильского районов // *Физика Земли.* 2013. № 4. С. 43–60.  
<http://doi.org/10.7868/S0002333713030149>
4. Щербакова В. В., Жидков Г. В., Щербаков В. П., Латышев А. В., Фетисова А. М. О проверке гипотезы низкого мезозойского поля на трапповых породах Сибири // *Физика Земли.* 2015. № 3. С. 47–67.  
<http://doi.org/10.7868/S0002333715030151>
5. Prévot M., Derder M. E. M., McWilliams M., Thompson J. Intensity of the Earth's magnetic field: Evidence for a Mesozoic dipole low // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1990. V. 97 (1–2). P. 129–139.  
<https://doi.org/10.1016/0012-821X9090104-6>
6. Selkin P., Tauxe L. Long-term variations in paleointensity // *Philos. Trans. R. Soc. London.* 2000. V. 358. P. 1065–1088.  
<http://doi.org/10.1098/rsta.2000.0574>
7. Blanco D., Kravchinsky V. A., Valet J. P., Ali A., Potter D. K. Does the Permo-Triassic geomagnetic dipole low exist? // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2012. V. 204. P. 11–21.  
<http://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.06.005>
8. Елисеев А. А., Метелкин Д. В., Абашев В. В., Михальцов Н. Э., Виноградов Е. В., Брагин В. Ю. Палеомагнетизм абинской серии Кузнецкого прогиба (Южная Сибирь) в связи с проблемой формирования Сибирской крупной магматической провинции // *Геология и геофизика.* 2024. Т. 65 (4). С. 533–551.  
<http://doi.org/10.15372/GiG2023205>
9. Елисеев А. А., Щербакова В. В., Метелкин Д. В., Михальцов Н. Э., Жидков Г. В., Абашев В. В., Рогов А. М. Низкая напряженность геомагнитного поля на рубеже перми и триаса по результатам исследования траппов Кузнецкого прогиба (Южная Сибирь) // *Геология и геофизика.* 2022. Т. 63 (2). С. 230–246.  
<http://doi.org/10.15372/GiG2021133>
10. Казанский А. Ю., Метелкин Д. В., Брагин В. Ю., Кунгурцев Л. В. Палеомагнетизм пермотриасового траппового комплекса Кузнецкого прогиба (Южная Сибирь) // *Геология и геофизика.* 2005. Т. 46 (11). С. 1107–1120.
11. Nishitani T., Kono M. Curie temperature and lattice constant of oxidized titanomagnetite // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1983. V. 74. P. 585–600.
12. Shcherbakova V. V., Bakhmutov V. G., Thallner D. et al. Ultra-low palaeointensities from East European Cra-

- ton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 220. Iss. 3. P. 1928–1946. <http://doi.org/10.1093/gji/ggz566>
13. *Latyshev A. V., Fetisova A. M., Veselovskiy R. V.* Linking Siberian Traps LIP emplacement and endPermian mass extinction: evidence from magnetic stratigraphy of the Maymecha-Kotuy volcanic section // *Geosciences*. 2020. V. 10 (8). 295. <http://doi.org/10.3390/geosciences10080295>
  14. *Anwar T., Hawkins L., Kravchinsky V. A., Biggin A. J., Pavlov V. E.* Microwave paleointensities indicate a low paleomagnetic dipole moment at the Permo-Triassic boundary // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2016. V. 260. P. 62–73. <http://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.09.007>
  15. *Glatzmaier G. A., Roberts P. H.* A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal // *Nature*. 1995. V. 377. P. 203–209.
  16. *Добрецов Н. Л.* Геологические следствия термохимической модели плюмов // *Геология и геофизика*. 2008. Т. 49. № 7. С. 587–604
  17. *Courtillot V., Olson P.* Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. V. 260. P. 495–504. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.06.003>
  18. *Добрецов Н. Л.* Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51 (6). С. 761–784.
  19. *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.
  20. *Добрецов Н. Л., Метелкин Д. В., Василевский А. Н.* Характерные свойства магнитного и гравитационного полей Земли, взаимосвязанные с глобальной и региональной тектоникой // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62. № 1. С. 10–30. <http://doi.org/10.15372/GiG2020181>

## ABSOLUTE GEOMAGNETIC PALEOINTENSITY AT THE PERMIAN-TRIASSIC BOUNDARY: THE PROBLEM OF MESOZOIC DIPOLE LOW

Corresponding Member of the RAS **D. V. Metelkin<sup>a,b,#</sup>, A. A. Eliseev<sup>a,b</sup>,  
V. V. Scherbakova<sup>c</sup>, N. E. Mikhaltsov<sup>b,a</sup>, G. V. Zhidkov<sup>c</sup>, V. V. Abashev<sup>b,a</sup>**

<sup>a</sup> *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics Siberian Branch  
of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Borok Geophysical Observatory, department of Schmidt Institute of Physics of the Earth,  
Russian Academy of Sciences, Yaroslavl obl., pos. Borok, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: metelkindv@ipgg.sbras.ru*

We report new estimates of the intensity of the geomagnetic field strength for the Permian–Triassic boundary. Amid predominantly low virtual dipole moment values for that time in the Global Paleointensity Database, episodes of increased VDM up to  $8.9 \times 10^{22} \text{ Am}^2$  were recorded in the sections of the trap formation of the Kuznetsk depression, which do not conform to the Mesozoic Dipole Low concept. Analysis of data on changes in the value of the virtual dipole moment during the formation of the Siberian Large Igneous Province within the framework of modern magnetostratigraphic correlations indicates a persistently weak geomagnetic field only at the initial stage, when most of its Norilsk area was formed. A change in the geomagnetic mode is noted after ~800 thousand years at the level of subchron LT1n.1r (251.2–251.1 Ma) of the General Magnetostratigraphic Scale and was recorded in the basaltic andesite lava sheets of the Kuznetsk area. Low virtual dipole moment values from this time correspond to episodes of reversals, while the overall intensity was on average only slightly lower than today. Thus, the drop in paleointensity at the very beginning of the Triassic period was not caused by a major long-term change in the geodynamo, but was short-term and related to plume activity.

**Keywords:** paleointensity, Thellier–Coe method, Kuznetsk trough, Permian–Triassic boundary, Siberian large igneous province, Mesozoic Dipole Low