

УДК 550.384 + 551.21

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-3-12-22

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ И АНИЗОТРОПИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ЛАВОВЫХ ПОТОКАХ ТОЛМАЧЕВА ДОЛА (КАМЧАТКА)

Антон Валерьевич Латышев¹✉, Майя Борисовна Аносова², Елена Александровна Латанова³, Ольга Валерьевна Бергаль-Кувикас⁴, Алексей Владимирович Беляев⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; anton.latyshev@gmail.com

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия; mai.anosova@yandex.ru

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия; Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; lenaaa1212@gmail.com

⁴ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; Камчатский государственный университет им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия; kuvikas@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alexey-domrist@yandex.ru

Аннотация. Получены новые палеомагнитные определения по базальтовым лавовым потокам Толмачева Дола (центральная Камчатка), удовлетворяющие современным аппаратурно-методическим требованиям к качеству палеомагнитных исследований. Рассчитаны средние направления по 12 сайтам, представляющим 7 стратиграфических уровней в голоцене — позднем плейстоцене. Для 3 сайтов получены аномальные палеомагнитные направления, свидетельствующие о формировании данных лавовых потоков во время экскурса геомагнитного поля в раннем голоцене (10 000–7 600 лет назад). По результатам анализа анизотропии магнитной восприимчивости восстановлены преобладающие направления течения лавовых потоков и локализованы предполагаемые центры извержения для ряда сайтов. Распределение ориентировок максимальных осей эллипсоида анизотропии свидетельствует о формировании базальтов Толмачева Дола в пределах области ареального вулканизма в ходе многократных извержений из рассредоточенных в пространстве локальных моногенных конусов.

Ключевые слова: Камчатка, Толмачев дол, палеомагнетизм, вековые вариации геомагнитного поля, голоцен, анизотропия магнитной восприимчивости, палеовулканические реконструкции

Для цитирования: Латышев А.В., Аносова М.Б., Латанова Е.А., Бергаль-Кувикас О.В., Беляев А.В. Палеомагнетизм и анизотропия магнитной восприимчивости в четвертичных лавовых потоках Толмачева Дола (Камчатка) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 3. С. 12–22.

PALEOMAGNETISM AND ANISOTROPY OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY IN THE QUATERNARY LAVA FLOWS OF THE TOLMACHEV DOL AREA (KAMCHATKA)

Anton V. Latyshev¹✉, Maya B. Anosova², Elena A. Latanova³, Olga V. Bergal-Kuvikas⁴, Aleksey V. Belyaev⁵

¹ Lomonosov Moscow State University; Schmidt Institute of the Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia; Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; anton.latyshev@gmail.com

² Schmidt Institute of the Physics of the Earth, RAS; National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia; mai.anosova@yandex.ru

³ Schmidt Institute of the Physics of the Earth, RAS; National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia; Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; lenaaa1212@gmail.com

⁴ Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch RAS; Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; kuvikas@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alexey-domrist@yandex.ru

Abstract. New paleomagnetic data were obtained for basaltic lava flows in Tolmachev Dol (central Kamchatka), satisfying modern instrumental and methodological requirements for the quality of paleomagnetic research. Mean directions were calculated for 12 sites representing seven stratigraphic levels in the Holocene — Late Pleistocene. Anomalous paleomagnetic directions were obtained for three sites, indicating that these lava flows formed during a geomagnetic excursion in the Early Holocene (10,000–7,600 years ago). Based on anisotropy of magnetic susceptibility analysis, the predominant lava flow directions were reconstructed and supposed eruptive centers were located for a number of sites. The distribution of orientations of the maximum axes of the anisotropy ellipsoid indicates the formation of Tolmacheva Dol basalts within the zone of areal volcanism during multiple eruptions from local scattered monogenetic cones.

Keywords: Kamchatka, Tolmachev Dol, paleomagnetism, secular variations of geomagnetic field, Holocene, anisotropy of magnetic susceptibility, paleovolcanic reconstructions

For citation: Latyshev A.V., Anosova M.B., Latanova E.A., Bergal-Kuvikas O.V., Belyaev A.V. Paleomagnetism and anisotropy of magnetic susceptibility in the Quaternary lava flows of the Tolmachev Dol area (Kamchatka). *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 3: 12–22. (In Russ.).

Введение. Палео- и петромагнитные исследования четвертичных вулканических пород Камчатки актуальны по нескольким причинам. Прежде всего, определения палеомагнитных направлений позволят получить информацию о вековых вариациях геомагнитного поля в четвертичное время. Существующие глобальные модели геомагнитного поля [Korte et al., 2011; Licht et al., 2013; Nilsson et al., 2014; Constable et al., 2016] на сей момент остаются недостаточно надежными и точными из-за крайне неравномерного распределения данных по поверхности Земли. В частности, для Камчатки и северо-западной Пацифики в целом до сих пор имеются лишь единичные определения угловых элементов [Латышев и др., 2017; Максимочкин и др., 2024] и палеонапряженности [Жидков и др., 2017] геомагнитного поля, полученные на современном аппаратурно-методическом уровне. В связи с этим получение новых надежных палеомагнитных данных по четвертичным вулканическим породам Камчатки представляется крайне важным для мировых геомагнитных исследований.

Также результаты палеомагнитных исследований могут быть использованы для чисто геологических целей, например, для возрастной корреляции магматических событий или определения продолжительности эпизодов вулканизма [Quidelletur et al., 2005; Cox et al., 2015; Pavlov et al., 2019; Latyshev et al., 2021; Hodges et al., 2025]. Это приложение особенно актуально в контексте оценки динамики вулканизма и вулканической опасности в населенных районах Камчатки. Для этих же целей представляет интерес реконструкция локальных вулканических центров и возможных направлений распространения лавовых потоков, которую можно осуществить на основе анализа данных по анизотропии магнитной восприимчивости в базальтах [Ernst and Baragar, 1992; Tarling and Hrouda, 1993; Raposo and Ernesto, 1995].

Объекты исследования. В рамках данной работы были исследованы базальтовые лавовые потоки, расположенные в пределах Толмачева Дола (рис. 1). Толмачев Дол представляет собой лавовое плато, расположенное между вулканами Горелый и Опапа, с абсолютными отметками 620–900 м. Считается,

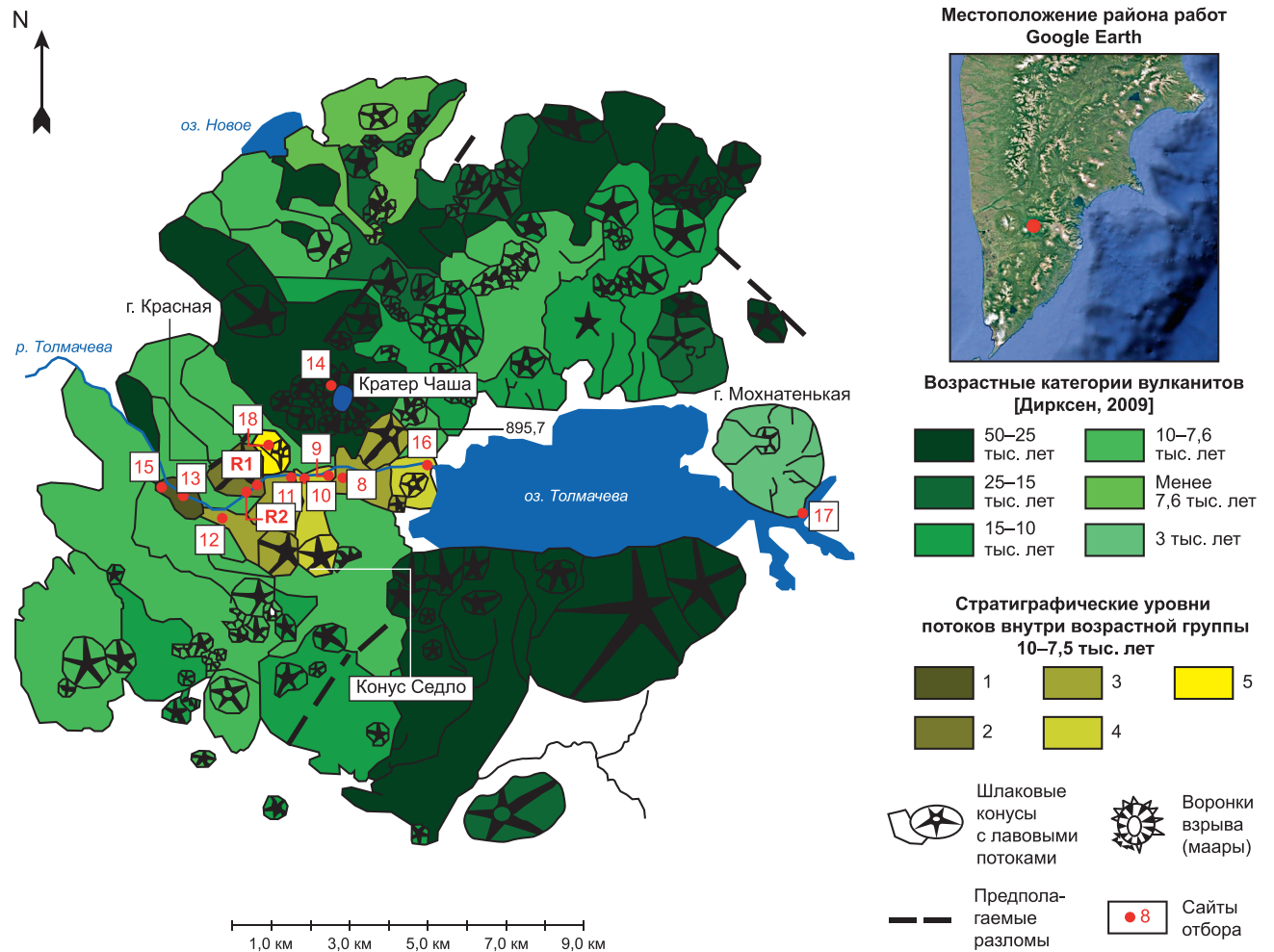


Рис. 1. Геологическая схема района исследования (по [Дирксен, 2009], с изменениями). Стратиграфические группы потоков внутри возрастной группы 10 000–7 600 лет приведены в соответствии с хроностратиграфической схемой (рис. 2). Цифрами показаны номера сайтов

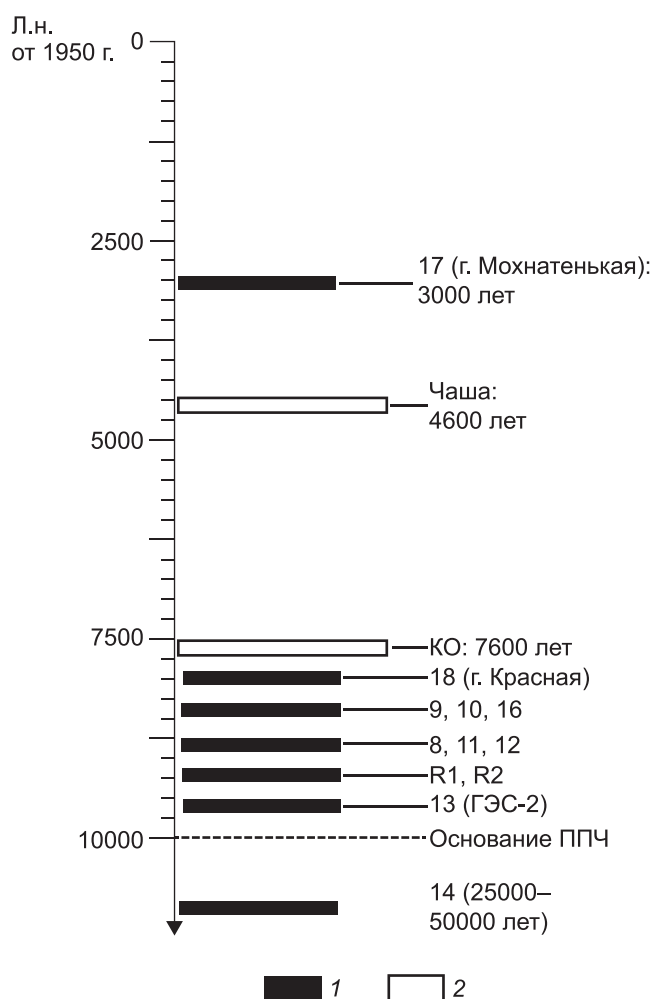


Рис. 2. Хроностратиграфическая схема опробованных лавовых потоков. Возраст потоков и тефры приведен по [Дирксен, 2009]. 1 — лавовые потоки; 2 — маркирующие горизонты тефры. КО — пепел извержения Курильского озера. ППЧ — почвенно-пирокластический чехол

что лавовые потоки Толмачева Дола сформировались в результате излияний из многочисленных моногенных конусов и слагают зону ареального вулканизма [Дирксен, 2009]. В результате детальных исследований этого района было выделено более 100 индивидуальных эруптивных центров [Дирксен и др., 2002; Дирксен, 2009].

Возраст лавовых потоков, опробованных в пределах Толмачева Дола, оценивался следующими методами:

1. Радиоуглеродное датирование почв, подстилающих тефру г. Мохнатенькая [Перепелов и др., 2006], позволило оценить возраст соответствующего лавового потока (сайт 17) как ~3000 лет назад [Дирксен, 2009];

2. Тефрохронологическое датирование — по положению тефры конкретных шлаковых конусов в разрезе почвенно-пирокластического чехла относительно опорных горизонтов пеплов с известными возрастными — кратера оз. Чаша (4600 лет [Braitseva et al., 1997; Дирксен и др., 2002; Zaretskaya et al., 2007]) и кальдеры оз. Курильского (7600 лет [Ponomareva et al., 2004]);

3. Геоморфологический метод — вулканические постройки, сформированные до максимума II фазы позднеплейстоценового оледенения (25 000 лет назад), подверглись разрушению и погребены под более молодыми образованиями (сайт 14) [Дирксен, 2009];

4. Возраст основания почвенно-пирокластического чехла в данной работе принят как 10 000 лет, что примерно соответствует началу формирования почвенно-пирокластических разрезов в большинстве изученных районов Камчатки [Певзнер и др., 2006; Дирксен, 2009];

5. Относительный возраст голоценовых потоков, находящихся в одном интервале возраста по тефрохронологическим данным, оценивался по их стратиграфическому положению (при возможности) и гипсометрическому уровню. Это позволило авторам выделить 5 групп в пределах возрастного интервала 7600–10 000 лет (рис. 2).

Всего в пределах Толмачева Дола было опробовано 13 сайтов, представляющих 7 индивидуальных стратиграфических уровней (рис. 2). При этом возраст большинства сайтов (11 из 13) относится к одному интервалу: ниже тефры Курильского озера, но выше основания почвенно-пирокластического чехла, что соответствует диапазону возрастов 7600–10 000 лет назад [Дирксен, 2009]. Это подчеркивает необходимость проведения дополнительных исследований для надежного возрастного расчленения лавовых потоков. В настоящий момент ряд проб из лавовых потоков Толмачева Дола находится в процессе датирования методом оптически стимулированной люминесценции (OSL), что, в случае успеха, позволит более точно определить их возраст.

Методика. Отбор ориентированных образцов производился вручную или с помощью механического пробоотборника, их ориентировка в пространстве — с помощью магнитного компаса, с постоянным контролем возможного влияния сильно магнитных пород на стрелку компаса. Из каждого сайта было отобрано от 10 до 20 ориентированных образцов. Величина местного магнитного склонения рассчитывалась по модели IGRF 14 генерации. Лабораторные палеомагнитные исследования и обработка результатов магнитных чисток выполнялись в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли РАН. Образцы были подвергнуты ступенчатой температурной чистке до полного размагничивания (10–15 шагов), которое достигалось в большинстве случаев при температурах 520–620 °С. Для терморазмагничивания образцов использовались немагнитные печи “ММТД-80” с величиной нескомпенсированного поля не более 5–10 нТл. Остаточная намагниченность образцов измерялась при помощи спин-магнитометра JR-6 (AGICO) и криогенного магнитометра 2G Enterprise. Для большей части образцов на дублях была проведена также чистка переменным магнитным полем с помощью размаг-

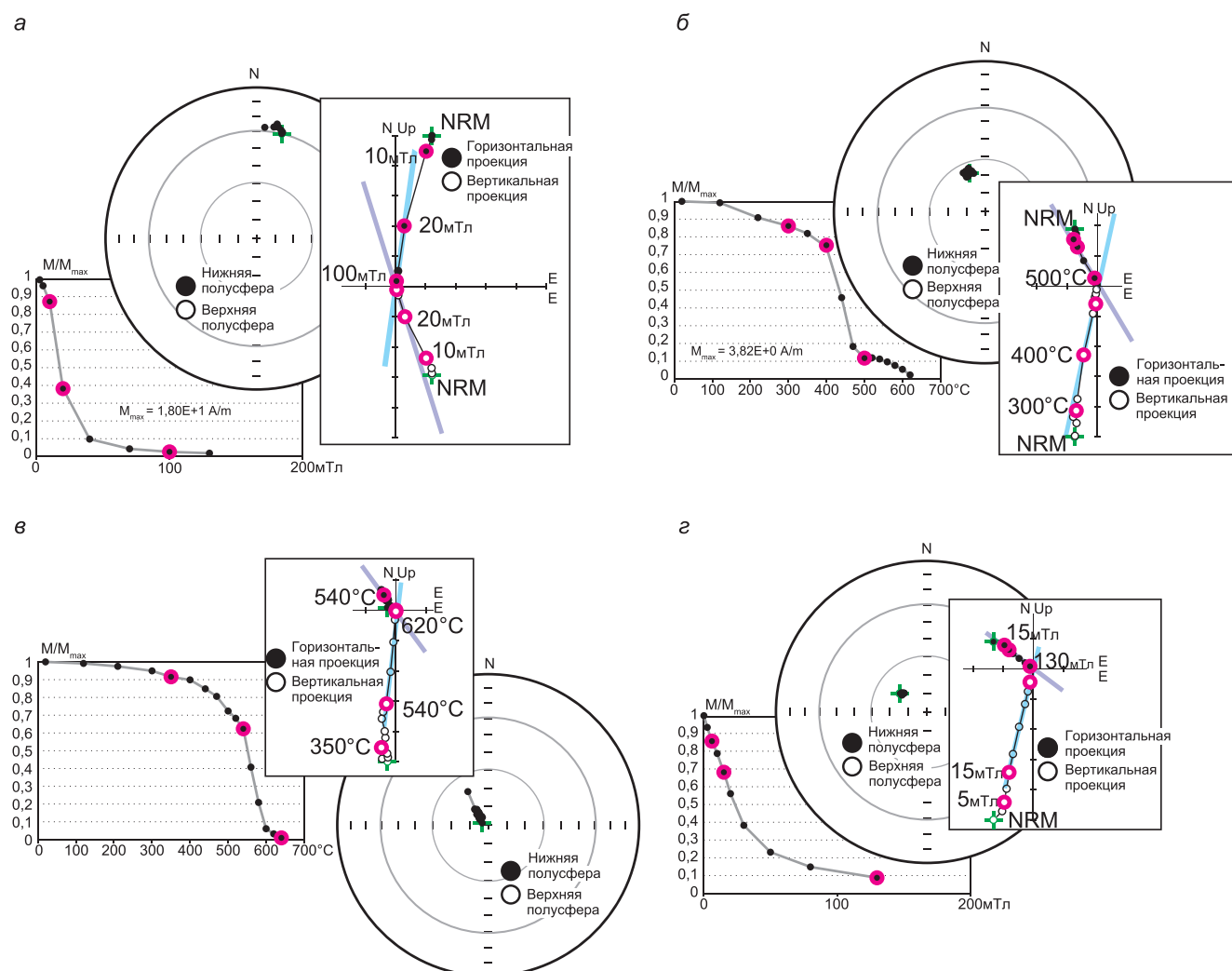


Рис. 3. Результаты магнитной чистки образцов: а — образец 132, сайт 11, АФ-чистка; б — образец 216, сайт 18, термочистка; в — образец 112, сайт 10, термочистка; г — образец 104, сайт 9, АФ-чистка. Система координат географическая. NRM — естественная остаточная намагниченность (natural remanent magnetization), $M/M_{\max}$ — отношение остаточной намагниченности к максимальной остаточной намагниченности

ничающей установки, встроенной в криогенный магнитометр. Чистка переменным полем проводилась до 130 мТл. Обработка измерений остаточной намагниченности выполнялась при помощи пакета программ Enkin [Enkin, 1994], с использованием при выделении компонент намагниченности метода главных компонент [Kirschvink, 1980]. Анализ полученных данных производился с использованием статистики Фишера [Fisher, 1953].

Измерения анизотропии магнитной восприимчивости проводились в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли РАН на капнометре MFK-1FA компании AGICO. Обработка измерений выполнялась в программе Anisoft 4.2 с использованием статистических методов, описанных в работе [Jelinek, 1978]. При анализе эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости использовались параметр P_j (корректированная степень анизотропии) и параметр формы эллипсоида T [Jelinek, 1981].

Зависимость магнитной восприимчивости от температуры измерялась на каппа-метре MFK-1FA

с приставкой для высокотемпературных измерений CS-3 при нагреве до 700 °С (в воздушной среде) и последующем охлаждении до комнатной температуры. Петли гистерезиса снимались по единичным образцам из каждого сайта на вибромагнитометре PMC MicroMag 3900 при комнатной температуре с величиной максимального поля 0,5 Тл. Доменная структура ферромагнитных зерен оценивалась по диаграмме Дэя-Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002].

Палеомагнетизм. Большая часть образцов при температурной чистке и размагничивании переменным полем демонстрирует ясный палеомагнитный сигнал. Как правило, выделяется единственная стабильная компонента намагниченности, которая размагничивается в температурном интервале 470–600 °С (редко до 640 °С) и при полях 10–130 мТл (рис. 3). Во многих образцах также присутствует низкотемпературная и низкокоэрцитивная компонента, которая изолируется в интервале до 210 °С и до 5 мТл и, вероятно, имеет вязкую или лабораторную природу.

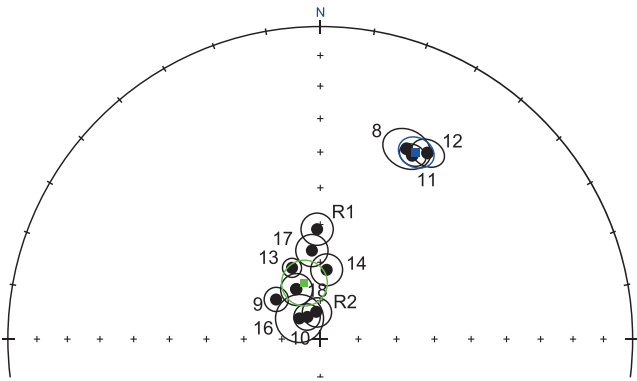


Рис. 4. Средние палеомагнитные направления по сайтам с доверительными интервалами. Среднее направление по трем сайтам, представляющим экскурс, показано синим; среднее направление по остальным 9 сайтам показано зеленым. Цифры — номера сайтов

Высокотемпературная и высококоэрцитивная компонента во всех сайтах имеет прямую полярность, в большинстве — склонения от северо-западных до северо-северо-восточных (312–5°) и умеренные — высокие наклонения (61–83°). Средние палеомагнитные направления были рассчитаны по

всем сайтам, кроме сайта 15, где направления единичных образцов характеризуются значительным разбросом (табл. 1). Сайты 8, 11, 12 образуют отдельную тесную группу (рис. 4) с аномально низкими наклонениями для голоцена Камчатки (31–34°). Поскольку образцы из этих сайтов не отличаются от других ни по магнитным свойствам (см. раздел «Магнитные свойства»), ни по характеру палеомагнитного сигнала, такие аномальные направления нельзя объяснить особенностями магнитной минералогии. Изменение палеомагнитных направлений вследствие постмагматических дислокаций также представляется маловероятным, поскольку близкие направления получены по трем пространственно удаленным сайтам, тогда как соседние сайты (например, 9, 10) не демонстрируют подобных аномальных направлений.

Близкие друг другу и нетипичные для голоцена Камчатки средние направления по сайтам 8, 11, 12 свидетельствуют, во-первых, об их принадлежности к одному и тому же лавовому потоку или, по крайней мере, к единому магматическому событию, и, во-вторых, об их формировании в период аномального геомагнитного поля, возможно, экскурса.

Таблица 1

Средние палеомагнитные направления по сайтам

Сайт	Возраст, лет	Координаты	N	D,°	I,°	K	α95,°	Plat,°	Plong,°	A95,°
17	3000	N 52,6042° E 157,7298°	12	354,8	66,8	109,3	4,2	85,4	25,4	6,3
14	25000–50000	N 52,6312° E 157,5511°	18	5,3	71,9	68,1	4,2	84,8	191,4	6,9
9	7600–10000	N 52,6114° E 157,5513°	10	312,1	74,6	240,5	3,1	63,2	105,1	5,4
10	7600–10000	N 52,6096° E 157,5414°	20	329,1	83,4	95,7	3,4	63,1	142,7	6,6
13	7600–10000	N 52,6054° E 157,4961°	21	338,3	70	157,6	2,5	77	82,1	4,0
16	7600–10000	N 52,6141° E 157,5887°	10	314,5	82,4	60,1	6,3	61,3	135,1	12,1
18	7600–10000	N 52,6174° E 157,5285°	13	334,7	75,7	105,6	4,1	73,2	115,4	7,2
R1	7600–10000	N 52,6076° E 157,5233°	17	358,5	61,2	68,5	4,3	79,6	343,7	5,8
R2	7600–10000	N 52,6068° E 157,5211°	13	347,1	83,2	141,3	3,5	65,5	150,3	6,8
8*	7600–10000	N 52,6108° E 157,5563°	17	24,5	33,4	40,8	5,7	50,7	299,2	4,9
11*	7600–10000	N 52,6104° E 157,5376°	7	26,8	34,4	388	3,1	50,4	295,5	2,7
12*	7600–10000	N 52,6005° E 157,5114°	13	30,1	31,7	113,1	3,9	47,4	292,4	3,3
Среднее для экскурса			3	27,2	33,2	880,6	4,2	49,5	295,5	3,6
Среднее для стабильного геомагнитного поля			9	344,1	75	78,3	5,9	77,5	121	10,3

Примечание. * — сайты, относящиеся к предполагаемому экскурсу геомагнитного поля; N — количество образцов; D — склонение; I — наклонение; K — кучность; α95 — радиус круга доверия. Plat, Plong — широта и долгота виртуального геомагнитного полюса.

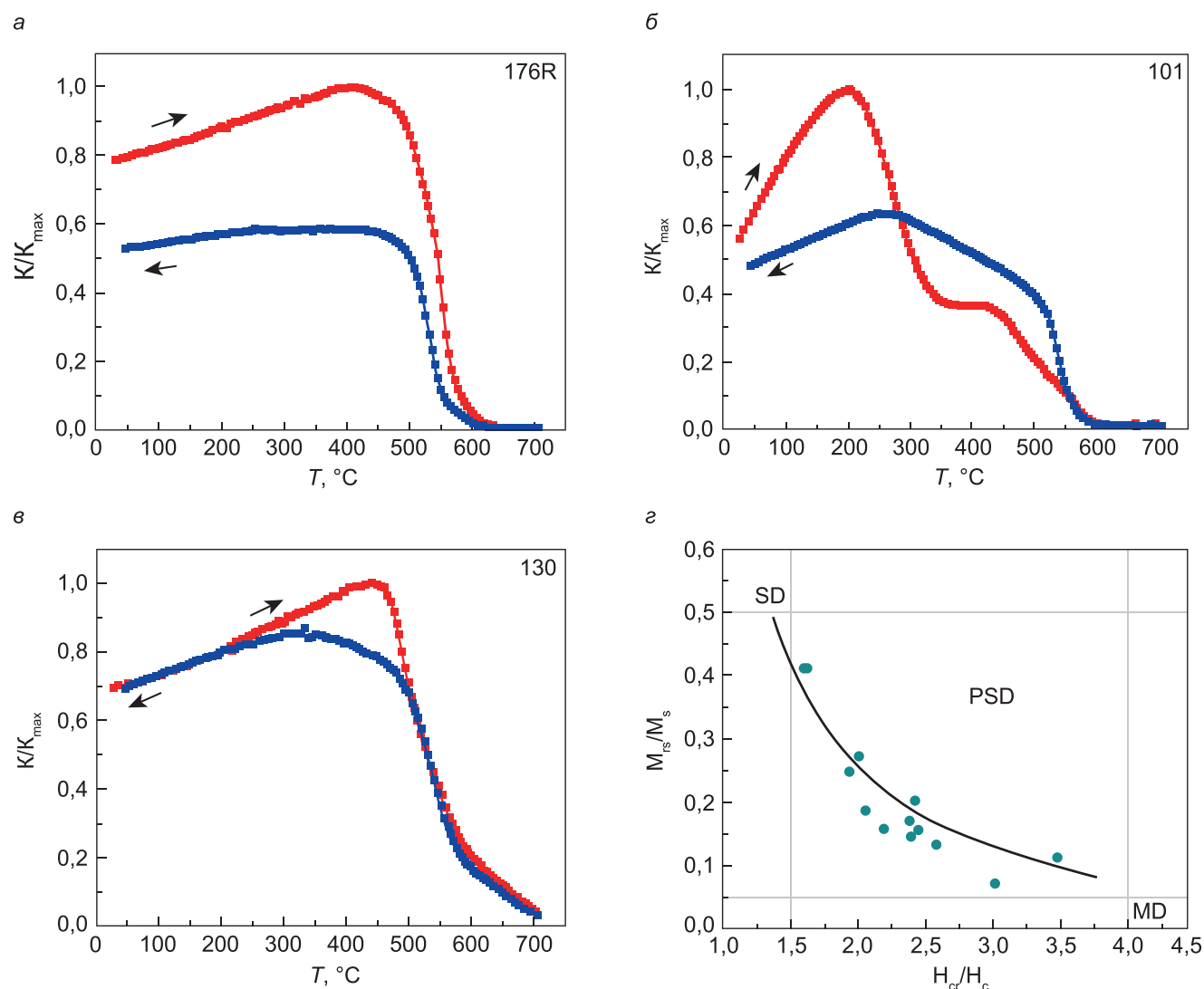


Рис. 5. Магнитные свойства исследованных образцов. Температурные кривые магнитной восприимчивости ($K/K_{\max}$): а — образец 176R, сайт R1; б — образец 101, сайт 9; в — образец 130, сайт 11; г — диаграмма Дэя-Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002]. Поля на диаграмме: SD — однодоменные частицы; PSD — псевдооднодоменные частицы; MD — многодоменные частицы. Линия смешения однодоменных и многодоменных частиц показана по [Dunlop, 2002]. M_{rs}/M_s — отношение остаточной намагниченности насыщения к намагниченности насыщения; H_{cr}/H_c — отношение остаточной коэрцитивной силы к коэрцитивной силе

Магнитные свойства. Температурные кривые магнитной восприимчивости для большинства образцов демонстрируют преобладание магнитной фазы с точками Кюри в интервале 570–595 °С, что соответствует магнетиту или низкотитанистому титаномagnetиту (рис. 5, а). Кроме того, при измерении некоторых образцов происходит в разной степени выраженное падение величины магнитной восприимчивости в температурном интервале 250–400 °С, что может свидетельствовать о присутствии более высокотитанистого титаномagnetита как самостоятельной фазы или о наличии маггемита, который при нагреве переходит в гематит [Dunlop and Ozdemir, 1997], что сопровождается падением магнитной восприимчивости после охлаждения (рис. 5, б). Наконец, в ряде образцов также фиксируется присутствие гематита с $T_c \sim 675$ °С или значительной парамагнитной компоненты (рис. 5, в).

Соотношения гистерезисных параметров H_{cr}/H_c и M_{rs}/M_s для исследованных образцов находят-

ся в диапазоне 1,6–3,5 и 0,07–0,42 соответственно (табл. 2). Большая часть образцов на диаграмме Дэя-Данлопа находится в поле псевдооднодоменных частиц (рис. 5, г) вблизи линии смешения однодоменных и многодоменных зерен [Dunlop, 2002]. Такие вариации гистерезисных параметров типичны для магнетита/титаномagnetита в базальтовых лавовых потоках Камчатки и других вулканических провинций [Жидков и др., 2017; Латышев и др., 2017; Latyshev et al., 2021; Максимочкин и др., 2024].

Таким образом, для всех исследованных лавовых потоков мы предполагаем преобладание псевдооднодоменных зерен магнетита или низкотитанистого титаномagnetита среди магнитной фракции. При этом следует отметить, что образцы, различающиеся по минералогическому и доменному составу магнитной фракции, не демонстрируют закономерных различий в характере палеомагнитного сигнала и распределении палеомагнитных направлений.

Таблица 2

Результаты измерения анизотропии магнитной восприимчивости и магнитных свойств

Сайт	N	K1		K2		K3		T	Pj	Тип АМВ	Hcr/Hc	Mrs/Ms
		D	I	D	I	D	I					
8	17	278,1	4,7	8,2	2,2	123,7	84,8	0,317	1,023	N	2,58	0,13
9	11	283	6,4	192,3	6,4	57,8	80,9	0,062	1,053	N	1,94	0,25
10	11	305,5	11,9	53,8	56,2	208,3	31,1	0,452	1,028	D	2,19	0,16
11	10	318	0,4	227,6	37,6	48,5	52,4	-0,163	1,022	D	2,06	0,19
12	12	309,3	3,8	217,8	22	48,6	67,6	0,558	1,06	N	3,02	0,07
13	13	261,6	6,9	353,1	12,5	143,4	75,7	0,659	1,047	N	2,38	0,17
14	9	125,3	30,3	220	7,9	323	58,5	0,365	1,027	D	1,60	0,41
15	10	240,4	12,5	331	2,7	73,1	77,2	0,337	1,022	N	2,40	0,15
16	10	341,9	3,3	72,7	14,2	239	75,4	-0,141	1,024	N	1,99	0,27
17	12	292,5	17	27,1	14,9	156,1	67,1	-0,17	1,118	N	3,47	0,11
18	10	180,8	84,6	7	5,4	276,9	0,6	0,073	1,02	N	1,63	0,41
R1	10	52,8	2,3	321,7	25,3	147,6	64,6	-0,106	1,043	N	2,45	0,16
R2	10	162,6	2	253,3	19,3	66,9	70,6	0,05	1,033	N	2,42	0,20

Примечание. N — количество образцов; K1, K2, K3 — максимальная, средняя, минимальная оси эллипсоида анизотропии соответственно; D — склонение, I — наклонение; T — параметр формы эллипсоида; Pj — скорректированная степень анизотропии; типы эллипсоида АМВ: N — нормальный, D — диагональный. Mrs/Ms — отношение остаточной намагниченности насыщения к намагниченности насыщения; Hcr/Hc — отношение остаточной коэрцитивной силы к коэрцитивной силе.

Анизотропия магнитной восприимчивости. Большинство исследованных лавовых потоков характеризуется низкой скорректированной степенью анизотропии $P_j < 1,06$ (для 8 сайтов из 13 — $P_j < 1,04$) (табл. 2), что характерно для базитов с первично магматической магнитной текстурой и преобладанием магнетита или титаномagnetита среди магнитных минералов [Tarling, Hroudа, 1993]. В 9 сайтах из 13 эллипсоид АМВ имеет уплощенную форму (параметр формы $T > 0$). На общем фоне выделяется сайт 17, образцы из которого демонстрируют наивысшую степень анизотропии ($P_j = 1,118$) и удлиненную форму эллипсоида. Видимой зависимости величины T от степени анизотропии Pj не обнаруживается (рис. 6, а). Низкие значения степени анизотропии и вариации формы эллипсоида указывают на магматическую природу магнитной текстуры и ее формирование под воздействием собственно течения лавы и, возможно, локальных напряжений, связанных с остыванием потока.

В 10 сайтах из 13 ориентировка осей эллипсоида отвечает нормальному типу магнитной текстуры, или N-типу [Rochette et al., 1991]. Такой тип эллипсоида для лавовых потоков характеризуется крутым залеганием минимальной оси K3 (угол наклона выше 60°) и пологой ориентировкой двух других осей, при этом отклонение максимальной оси K1 от горизонтали не превышает 15° (рис. 6, б). Для магматических тел, обладающих N-типом магнитной текстуры, направление течения расплава в большинстве случаев определяется по ориентировке оси K1 (например, [Ernst, Baragar, 1992]; [Raposo, Ernesto, 1995]). В сайте 18, который представляет центральную часть конуса на г. Красная, напротив, максимальная ось эллип-

соида залегает круто, а две другие оси — полого (рис. 6, в). В данном случае, по нашему мнению, ориентировка оси K1 также отвечает течению лавы и показывает положение подводющего канала, где течение лавы было субвертикальным.

В трех сайтах (10, 11, 14) положение минимальной оси K3 значительно отклоняется от вертикального — угол падения меньше 60° (рис. 6, г). Отметим, что несмотря на это, в двух случаях (сайты 10, 11) ось K1 по-прежнему характеризуется пологой ориентировкой (рис. 6, д). Такое распределение осей эллипсоида можно объяснить локальными турбулентными течениями лавы или наложением различных типов магнитной текстуры. Этот тип анизотропии в настоящей работе будет обозначаться как D-тип (диагональный). При этом лавовые потоки с разным типом магнитной текстуры не демонстрируют очевидных различий ни по параметрам анизотропии, ни по прочим магнитным свойствам, ни по характеру палеомагнитной записи.

Обсуждение результатов. Аномальные палеомагнитные направления, рассчитанные по сайтам 8, 11 и 12, могут соответствовать экскурсу геомагнитного поля. Угловая разница между средними палеомагнитными направлениями, рассчитанными для аномальных сайтов и сайтов с ожидаемыми направлениями (табл. 1), составляет $46,6^\circ$. Широта виртуального геомагнитного полюса, рассчитанного для среднего направления по экскурсу, составляет $49,5^\circ$. Согласно большинству критериев экскурса, отклонение виртуального геомагнитного полюса от географического должно быть не менее $40-45^\circ$ [Merril, McFadden, 1994; McElhinny, McFadden, 2000; Roberts, 2008]; таким образом, рассчитанные нами

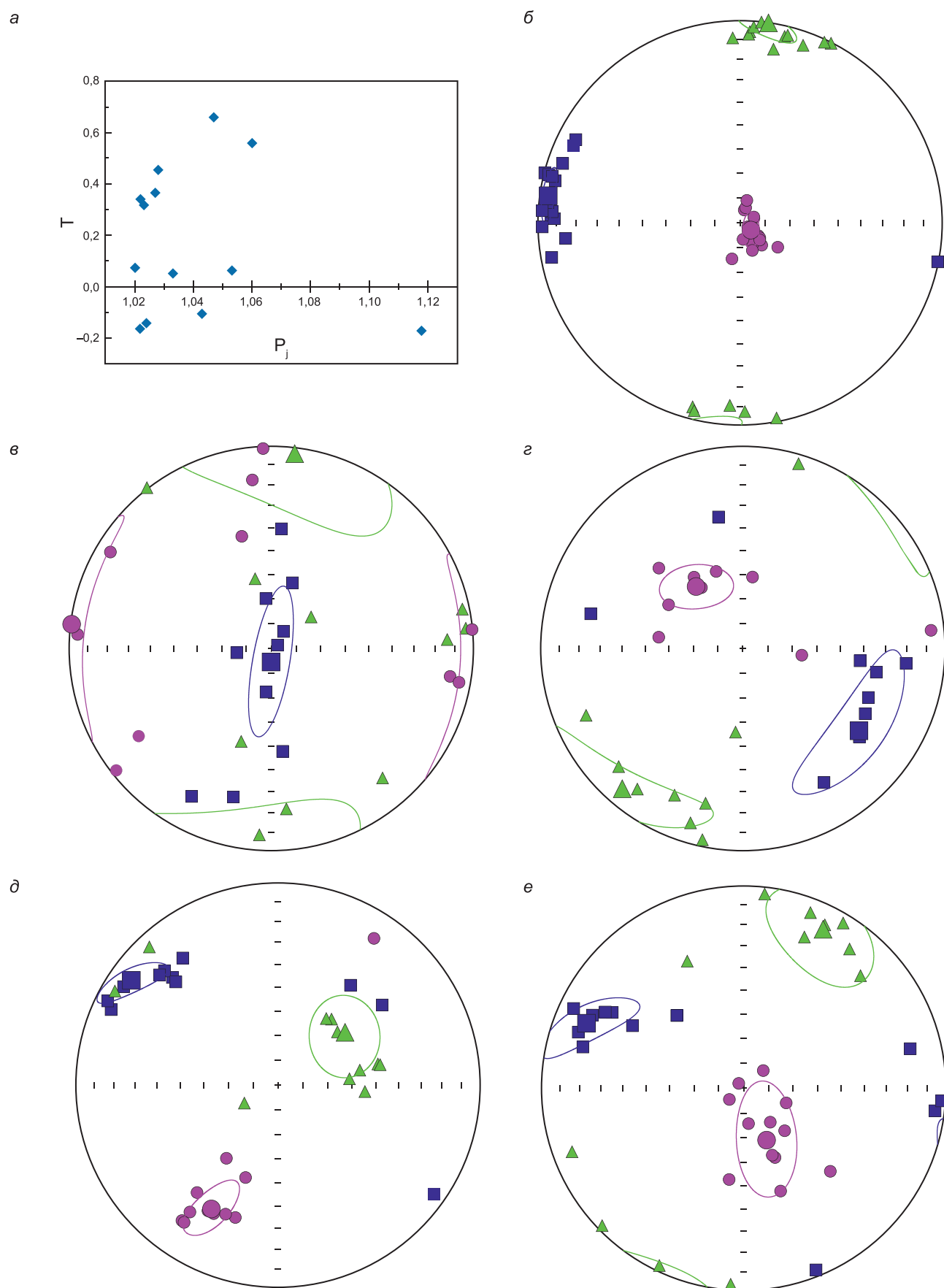


Рис. 6. Результаты измерений анизотропии магнитной восприимчивости. а — диаграмма Йелинека [Jelinek, 1981] (Т — параметр формы эллипсоида АМВ; P_j — скорректированная степень анизотропии); б–е: примеры эллипсоида АМВ, стереографическая проекция, нижняя полусфера. б — сайт 8, N-тип АМВ; в — сайт 18, N-тип АМВ; г — сайт 14, D-тип АМВ; д — сайт 10, D-тип АМВ; е — сайт 17, N-тип АМВ. Оси эллипсоида: K1 — синие квадраты, K2 — зеленые треугольники, K3 — розовые круги

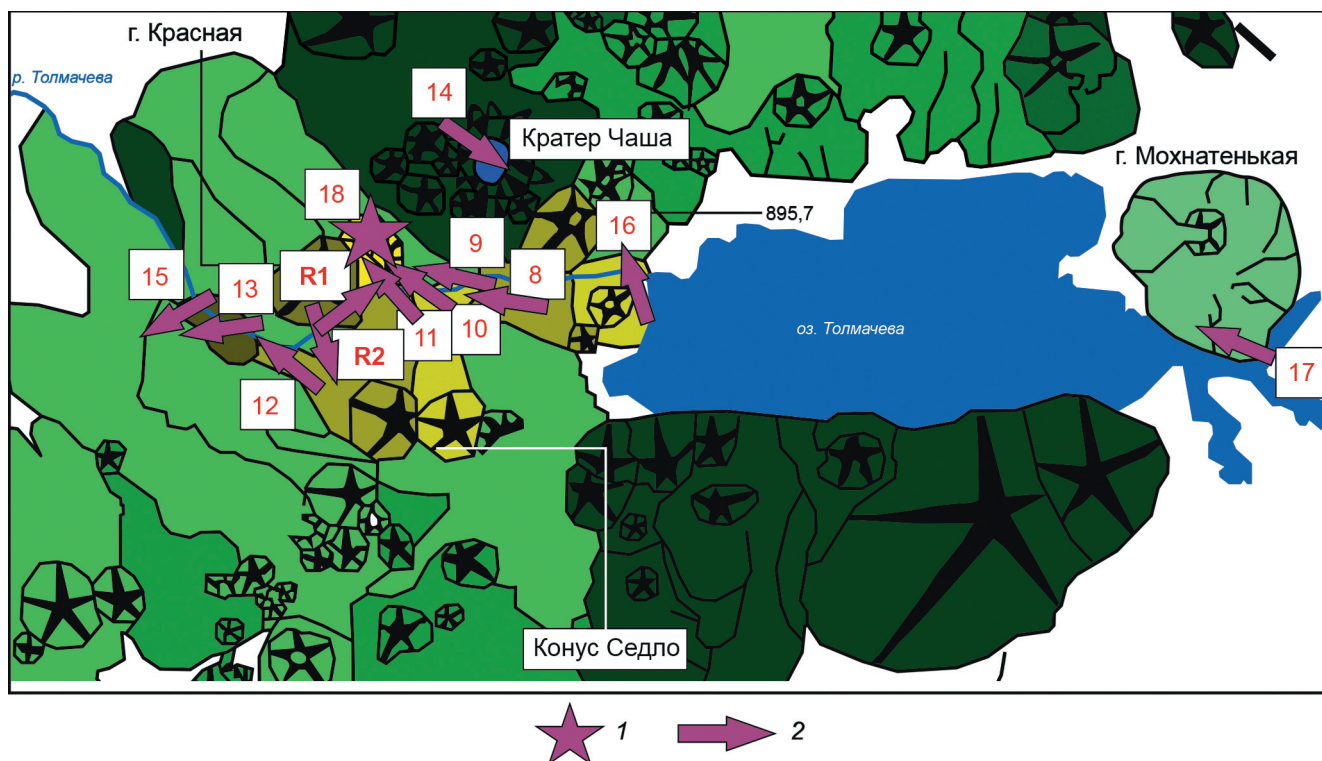


Рис. 7. Реконструкция направлений течения лавовых потоков по данным анизотропии магнитной восприимчивости: 1 — суб-вертикальное положение максимальной оси АМВ; 2 — направление падения максимальной оси АМВ при ее пологом залегании. Условные обозначения см. рис. 1, цифрами показаны номера сайтов

направления примерно соответствуют граничным значениям.

По возрасту опробованные лавовые потоки находятся между известными экскурсами Гетеборг с возрастом 13 000–12 000 лет [Morner, 1977], Тяньчи — 10 000–8 100 лет [Sun et al., 2018; Channell et al., 2020] и Соловки — 7 500–4 500 лет [Гуськова и др., 2004; Поспелова, 2004; Хоснуллина и др., 2024]. Виртуальные геомагнитные полюсы, рассчитанные для экскурса в данной работе (табл. 1) значительно отличаются от таковых, рассчитанных для ближайшего по возрасту экскурса Тяньчи [Zhu et al., 2000], что, впрочем, может быть связано с крайне быстрым изменением направлений геомагнитного поля при экскурсе (например, [Laj et al., 2006]) и возможным вкладом недипольных компонент. При этом следует отметить, что точная временная привязка и вообще правомерность выделения всех вышеупомянутых экскурсов как глобальных событий до сих пор ставится под сомнение [Snowball, 1997; Laj, Channell, 2007; Бахмутов, Главацкий, 2016; Channell et al., 2020]. Для надежного сопоставления выявленного нами события с этими предполагаемыми экскурсами требуется более точное определение возраста опробованных лавовых потоков.

Для значительной части исследованных нами лавовых потоков круги доверия α_{95} не перекрываются между собой (рис. 4), что указывает на достаточно контрастную запись вековых вариаций геомагнитного поля. Этот результат является благоприятным как для построения опорной кривой вариаций, так и для региональных геологических корреляций. Сайты 16

и 10, отнесенные нами к единой возрастной группе (рис. 2) демонстрируют статистически неразличимые палеомагнитные направления (угловая разница $\gamma = 2,1^\circ$, критический угол $\gamma_{cr} = 6,3^\circ$), в то время как сайт 9, относящийся к этой же группе, характеризуется близкими, хотя и значительно отличающимися направлениями. Это подтверждает возможность близкого возраста данных лавовых потоков. С другой стороны, средние палеомагнитные направления по сайтам R1 и R2, которые также объединены нами в одну возрастную группу, значительно различаются (рис. 4), что указывает на их принадлежность к разным лавовым потокам.

Анализ распределения ориентировок максимальных осей эллипсоида АМВ показывает отсутствие единого доминирующего направления течения лавовых потоков (см. рис. 1). Это совместимо с моделью ареального вулканизма и извержениями из многочисленных моногенных центров. Тем не менее, при детальном рассмотрении отдельных групп сайтов прослеживаются определенные закономерности. Так, по сайтам 11 и 12, демонстрирующим направления, соответствующие предполагаемому экскурсу, реконструируется направление течения лавы с юго-востока на северо-запад, что указывает на возможность формирования соответствующих потоков в процессе единого извержения с центром в западной вершине конуса Седло (см. рис. 1). Сайт 8, также отнесенный к экскурсу, демонстрирует направление течения с востока на запад и, вероятнее всего, источником данного лавового потока являлся конус с вершиной 895,7. Таким образом, палеомаг-

нитные и петромагнитные данные свидетельствуют о близкой по времени вулканической активности, приведшей к формированию конусов Седло и 895,7 и происходящих из них лавовых потоков.

Сайты 9 и 10, входящие в единую возрастную группу, показывают близкие направления течения лавы с юго-востока на северо-запад. Источником данного лавового потока может являться либо восточная вершина конуса Седло, либо конус близ истока р. Толмачева, рядом с которым находится сайт 16, относящийся к этой же возрастной группе. Сайты R1 и R2, расположенные близко друг к другу, демонстрируют различные направления течения, что, вкуче со статистически различающимися палеомагнитными направлениями, подтверждает соответствие этих сайтов разновозрастным лавовым потокам. В сайте 18 (близ вершины г. Красная) реконструированы субвертикальные направления течения лавы, что указывает на расположение точки отбора в прижерловой части.

Таким образом, для каждой из выделенных групп сайтов / лавовых потоков реконструированы направления течения лавы и индивидуальные вулканические центры. Формирование опробованных лавовых потоков происходило в процессе извержений из разных моногенных конусов, сконцентрированных в окрестностях долины р. Толмачева.

Выводы. По позднечетвертичным базальтовым потокам района Толмачева Дола рассчитаны

средние палеомагнитные направления по 12 сайтам, которые представляют не менее 7 возрастных и стратиграфических уровней в голоцене и позднем плейстоцене. Этот результат вносит вклад в построение опорной кривой вековых вариаций геомагнитного поля для голоцена Камчатки. Получены свидетельства формирования базальтов из сайтов 8, 11 и 12 в течение экскурса геомагнитного поля в раннем голоцене в диапазоне 10 000–7 600 лет назад.

По результатам измерения анизотропии магнитной восприимчивости реконструированы направления течения лавовых потоков и для ряда сайтов локализованы центры извержения. Распределение направлений течения лавы совместимо с моделью формирования базальтов Толмачева Дола как области ареального вулканизма с многократными извержениями из рассредоточенных в пространстве моногенных конусов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.А. Костерову и анонимному рецензенту за полезные замечания и комментарии к работе, которые позволили нам значительно улучшить статью. Также авторы признательны А.С. Голубову, А.П. Алексеевой и В.Н. Ильиной за участие в полевых работах.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-77-10019-П, <https://rscf.ru/project/22-77-10019-П/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бахмутов В.Г., Главацкий Д.В. Проблемы магнитостратиграфии плейстоценовых лессово-почвенных отложений юга Украины // Геофизический журнал. 2016. Т. 38, № 4. С. 59–75.

Гуськова Е.Г., Распопов О.М., Пискарев А.Л. и др. Тонкая структура геомагнитного поля за последние 30 000 лет по намагниченности осадков Баренцева моря // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 4. С. 554–560.

Дирксен О.В. Позднечетвертичный ареальный вулканизм Камчатки (структурная приуроченность, геолого-геоморфологический эффект, пространственно-временные закономерности проявления): Дисс. ... канд. геогр. наук. СПб., 2009. 172 с.

Дирксен О.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Крайтер Чаша (Южная Камчатка) — уникальный пример массового выброса кислой пирокластики в поле ареального базальтового вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 3–10.

Жидков Г.В., Щербаков В.П., Долотов А.В. и др. Тестовые определения палеонапряженности на исторических лавах Камчатки // Физика Земли. 2017. № 1. С. 171–182.

Латышев А.В., Кушлевич Д.О., Пономарева В.В. и др. Вековые вариации геомагнитного поля последних 4000 лет, записанные в лавах и пирокластике Северной группы вулканов Камчатки: новые данные // Физика Земли. 2017. № 5. С. 139–148.

Максимочкин В.И., Базанова Л.И., Слепцова Ю.В. Датирование лавовых потоков вулкана Авачинский (Камчатка) по палеомагнитным данным // Физика Земли. 2024. № 1. С. 37–56. Doi: 10.31857/S0002333724010032.

Певзнер М.М., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Голоценовые почвенно-пирокластические чехлы в Центральной Камчатской депрессии: возраст, строение, особенности осадконакопления // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 24–38.

Перепелов А.Б., Карманов Н.С., Дирксен О.В. и др. Происхождение андезитов в результате коровой контаминации базальтовых магм (голоценовый вулканический конус горы Мохнатенькая, Южная Камчатка) // Материалы II Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика». Улан-Удэ, 2006. С. 571–577.

Поспелова Г.А. Геомагнитные экскурсии // Краткая история и современное состояние геомагнитных исследований в Институте физики Земли РАН. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2004. С. 44–55.

Хоснуллина Т.И., Элькина Д.В., Пискарев А.Л., Гусев Е.А. Расчленение верхнечетвертичных осадков северной части Баренцева моря с использованием магнитных и палеомагнитных параметров // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 11. 2024. С. 400–407.

Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., et al. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. Vol. 4. P. 125–139.

Channell J.E.T., Singer B.S., Jicha B.R. Timing of Quaternary geomagnetic reversals and excursions in volcanic and sedimentary archives // Quaternary Science Reviews. 2020. 228, 106114.

- Constable C., Korte M., Panovska S. Persistent high paleosecular variation activity in southern hemisphere for at least 10 000 years // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016. Vol. 453. P. 78–86.
- Cox A., Doell R., Dalrymple B.G. Quaternary paleomagnetic stratigraphy / Eds. H.E. Wright and D.G. Frey. *The Quaternary of the U.S.* Princeton University Press, Princeton, USA. 2015. P. 817–830.
- Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain size and composition dependence // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1977. Vol. 13. P. 260–267.
- Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. № B3, 2056. P. 1–22.
- Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers.* Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 592 p.
- Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data // *Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada.* 1994. P. 16.
- Ernst R.E., Baragar W.R.A., Evidence from magnetic fabric for the flow pattern of magma in the Mackenzie Giant Radiating dyke swarm // *Nature.* 1992. 356. P. 511–513.
- Fisher R. Dispersion on a sphere // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences.* 1953. Vol. 217 (1130). P. 295–305.
- Hodges M.K.V., Trcka A.R., Champion D.E. Paleomagnetic correlation of surface and subsurface basalt flows in the Central and Southwestern part of the Idaho National Laboratory, Idaho: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2025–5020, 2025. 38 p., 1 pl.
- Jelinek V. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measures on groups of specimens // *Studia geophysica et geodaetica.* 1978. Vol. 22. P. 50–62.
- Jelinek V. Characterization of the magnetic fabrics of rocks // *Tectonophysics.* 1981. 79, T63–T67.
- Kirschvink J.L. The leastsquare line and plane and the analysis of paleomagnetic data // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1980. Vol. 62. P. 699–718.
- Korte M., Constable C., Donadini F., Holme R. Reconstructing the Holocene geomagnetic field // *Earth and Planetary Science Letters.* 2011. Vol. 312. P. 497–505.
- Laj C., Channell J.E.T. Geomagnetic excursions / Eds. G. Schubert, D. Bercovici, A. Dziewonski, et al. // *Treatise on Geophysics, Geomagnetism.* Vol. 5. Elsevier, B.V, Amsterdam, 2007. P. 373–416.
- Laj C., Kissel C., Roberts A.P. Geomagnetic field behavior during the Icelandic Basin and Laschamp geomagnetic excursions: a simple transitional field geometry? // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. Vol. 7, № 3. Q03004. <https://doi.org/10.1029/2005GC001122>.
- Latyshev A., Krivolutsкая N., Ulyakhina P., et al. Paleomagnetism of the Permian-Triassic intrusions of the Norilsk region (the Siberian platform, Russia): Implications for the timing and correlation of magmatic events, and magmatic evolution // *Journal of Asian Earth Sciences.* 2021. 217. 104858.
- Licht A., Hulot G., Gallet Y., Thebaud E. Ensembles of low degree archeomagnetic field models for the past three millennia // *Phys. Earth. Planet. Int.* 2013. Vol. 224. P. 38–67.
- McElhinny M.W., McFadden P.L. *Paleomagnetism. Continents and Oceans.* Academic Press, 2000. 407 p.
- Merrill R.T., McFadden P.L. Geomagnetic field stability: Reversal events and excursions // *Earth and Planetary Science Letters* 1994. Vol. 121. P. 57–69.
- Morner N.A. The Gothenburg magnetic excursion // *Quat. Res.* 1977. Vol. 7. 413–427.
- Nilsson A., Holme R., Korte M., et al. Reconstructing Holocene geomagnetic field variation: new methods, models and implications // *Geophysical Journal International* 2014. Vol. 198, № 1. P. 229–248.
- Pavlov V., Fluteau F., Latyshev A., et al. Geomagnetic Secular Variations at the Permian-Triassic Boundary and Pulsed Magmatism During Eruption of the Siberian Traps // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2019. Vol. 20. I. 2. P. 773–791.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V., et al. The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake caldera eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationship // *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2004. Vol. 136. P. 199–222.
- Quidelleur X., Gillot P.Y., Filoche G., Lefevre J.-C. Fast geochemical changes and rapid lava accumulation at Stromboli Island (Italy) inferred from K-Ar dating and paleomagnetic variations recorded at 60 and 40 ka // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2005. Vol. 141 (3–4). P. 177–193.
- Raposo M.I.B., Ernesto M., Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dike swarm (Brazil) and its relationship with magma flow directions // *Phys. Earth planet. Inter.* 1995. Vol. 102. P. 183–196.
- Rochette P., Jenatton L., Dupuy C., et al. Diabase dikes emplacement in the Oman ophiolite: a magnetic fabric study with reference to geochemistry / Eds. Peters et al. // *Ophiolite Genesis and Evolution of the oceanic lithosphere.* 1991. P. 55–82.
- Roberts A.P. Geomagnetic excursions: Knowns and unknowns // *Geophysical Research Letters* 2008. Vol. 35, L17307.
- Snowball J.F. Gyroremanent magnetization and the magnetic properties of greigite-bearing clays in southern Sweden // *Geophys. J. Int.* 1997. Vol. 129. P. 624–636.
- Sun C., Wang L., Plunkett G. et al. Ash from the Changbaishan Qixiangzhan eruption: a new early Holocene marker horizon across east Asia // *J. Geophys. Res.* 2018. Vol. 123. I. 8. P. 6442–6450.
- Tarling D.H., Hrouda F. *The Magnetic Anisotropy of Rocks* // Chapman, Hall, London 1993. 217 p.
- Zaretskaya N.E., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. Radiocarbon dating of large Holocene volcanic events within South Kamchatka // *Radiocarbon.* 2007. Vol. 49, Nr 2. P. 1065–1078.
- Zhu R., Pan Y., Coe R.S. Paleointensity studies of a lava succession from Jilin Province, northeastern China: evidence for the Blake event // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 8305–8317.

Статья поступила в редакцию 24.01.2026,
одобрена после рецензирования 18.03.2026,
принята к публикации 24.06.2026