

Возраст лавовых потоков Авачинского вулкана (Камчатка) по палеомагнитным данным

Ю. В. Слепцова*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики Земли
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Статья поступила 09.01.2020; Подписана в печать 04.02.2020)

Проведены палеомагнитные исследования изверженных пород Авачинского вулкана. Получены предварительные результаты определения угловых элементов геомагнитного палеополя. Направленность палеонапряженности геомагнитного поля определено по наиболее стабильной части природной остаточной намагниченности 53 образцов из 7 сайтов: 18 образцов из 3-х сайтов (место отбора N 53°12', E 158°48') с лавового потока исторического извержения 1827 г. и 35 образцов с 4 сайтов (место отбора N 53° 16', E 158° 49') с лавового потока, возраст которого превышает 3500 лет.

По первой группе образцов (N=3) получено положение виртуального геомагнитного полюса с координатами $Plat = 66^\circ \pm 4^\circ$, $Plong = 266^\circ \pm 5^\circ$, которое в пределах погрешности совпадает с положением северного магнитного полюса, измеренного в 1831 г. Для второй группы образцов (N=4) координаты виртуального геомагнитного полюса составляют $Plat = 83^\circ \pm 3^\circ$, $Plong = 254^\circ \pm 21^\circ$. На основе сравнения полученных координат виртуального геомагнитного полюса и палеонапряженности с палеогеомагнитными вариациями величин и направления дипольного магнитного момента Земли за последние 9000 лет сделан вывод, что второй исследованный поток относится к излиянию лавы, которое произошло около 5000–5500 лет назад.

PACS: 91.25.-г, 91.25.Le

УДК: 537.67, 550.384.5

Ключевые слова: геомагнитное поле, палеомагнетизм, палеомагнитный полюс, палеонапряженность, палеогеомагнитные вариации, лавовые потоки, Авачинский вулкан, Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Камчатка является зоной активного вулканизма на территории России и может быть подходящим полигоном для изучения вековых вариаций магнитного поля Земли. Вековые вариации геомагнитного поля происходят в течение сотен и тысяч лет и приводят к значительным изменениям среднегодовых значений элементов земного магнетизма. Изучение палеогеомагнитных вариаций, записанных в продуктах вулканической деятельности, позволяет понять особенности эволюции геомагнитного поля и дает возможность создания магнитохронологической шкалы для эпох одной полярности. Такую магнитохронологическую шкалу можно использовать для определения возраста геологических объектов, особенно когда разрешение изотопных методов датирования недостаточно, например, для относительно молодых вулканических пород.

К перспективным объектам изучения палеогеомагнитных вариаций относятся разрезы лавовых потоков, поскольку лавовые потоки считаются наиболее надёжными по сохранности палеомагнитной информации [1]. На Камчатке палеомагнитные работы активно ведутся с середины прошлого века [2–5], однако, для построения региональной магнитохронологической шкалы надёжных данных недостаточно.

Для пополнения данных, например, можно использовать результаты палеомагнитных исследований ла-

вовых потоков вулкана Авачинский. Авачинский вулкан — активный вулкан типа Сомма–Везувий, состоит из соммы позднеплейстоценового возраста, образованного около 30 тысяч лет назад [6], и активного Молодого конуса, начавшего формироваться около 3500 лет назад [7].

Начиная с 1737 г., было отмечено 16 извержений вулкана, последнее извержение было в 1991 г. Только во время извержения 1827 г. отмечалось формирование пирокластического потока протяженностью около 10 км по долине р. Сухая Халактырская. В результате извержения 1991 г. жерло вулкана оказалось закупоренным лавовой «пробкой» [8].

В работе [9] был проведен комплекс детальных геолого–геоморфологических и тефрохронологических исследований на вулкане с применением ^{14}C -датирования. В голоцене, в интервале 7250–3700 лет назад, на Авачинском вулкане было шесть крупных эксплозивных извержений. Самое мощное извержение, произошедшее 7150 лет назад, приурочено к началу активизации вулкана в голоцене после более чем 2000-летнего периода покоя. Следующий импульс вулканической активности представлен серией сближенных во времени (5700–5500 лет назад) извержений. Затем крупнейшие извержения распределяются во времени относительно равномерно через 550–650 лет. Из них самое сильное извержение произошло около 4500 лет назад, а извержения ~ 5000 лет назад и ~ 4000 лет назад были в 2 раза слабее. Все рассмотренные извержения в фазе кульминации были плинианскими. Только во время извержений ~ 5500 и ~ 5000 лет назад формировались пирокластические потоки, которые до-

*E-mail: sleptcova.iv14@physics.msu.ru

Таблица I: Координаты отбора и параметры залегания образцов

№ лавового потока	№ образца	Координаты отбора		Высота над уровнем моря, м	Параметры залегания	
		широта	долгота		Азимут падения	Угол падения
1	K17-3	N 53° 12' 53.3"	E 158° 48' 27.2"	1050	130	69
	K17-6	N 53° 12' 58.0"	E 158° 48' 50.5"	1065	195	65
	K17-7	N 53° 12' 53.7"	E 158° 48' 45.7"	1007	303	69
2	K17-8	N 53° 15' 58.7"	E 158° 49' 04.9"	2120	65	62
	K17-9	N 53° 15' 58.8"	E 158° 49' 04.10"	2120	144	74
	K19-11	N 53° 15' 58.8"	E 158° 49' 05.8"	2120	210	86
	K19-12	N 53° 15' 58.6"	E 158° 49' 05.1"	2120	320	90

стигали расстояния 15–17 км. Они распространялись главным образом по долинам сухих рек южного склона вулкана — Сухая Халактырская, Сухая Елязовская и Желтуха.

К наиболее примечательным палеомагнитным исследованиям на вулкане Авачинский относится работа [10], где объектом исследования является смещенный блок соммы вулкана, называемый в литературе Монастырь. В результате воздействия направленного взрыва, образовавшего вершинную кальдеру вулкана, этот блок откололся от тела вулкана и сполз по склону, обнажив средние и нижние части постройки вулкана. Палеомагнитным методом за счет корреляции с соседними ненарушенными блоками удалось определить, что поворот вокруг горизонтальной оси достиг 40°. В результате этих работ были получены четкие записи палеомагнитных вариаций с хорошо выраженными колебаниями большой амплитуды для средней и нижней частей соммы.

Основной целью данной работы является уточнение возраста некоторых лавовых потоков вулкана Авачинский по направлению и величине палеонапряженности геомагнитного поля и пополнение данных магнитохронологической шкалы Камчатки.

1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе исследованы ориентированные образцы с лавовых потоков из двух районов вулкана Авачинский: образцы K17-3, K17-6, K17-7 были отобраны в районе Сухой речки с лавового потока мощностью 10–20 м предположительно извержения 1827 г. [8], образцы K17-8, K17-9, K19-11 и K19-12 были отобраны с гребня соммы и принадлежат одному лавовому потоку, возраст которого согласно [7] превышает 3500 лет. Исследуемые лавовые потоки преимущественно сложены андезибазальтами [6–9]. Отбор ориентированных образцов осуществлялся вручную с ориентировкой маркируемых плоскостей при помощи геологического компаса. Параметры отбора образцов представлены в табл. 1.

На образцах-дублях объемом 8 см³ измерялись величина и направление естественной остаточной намагниченности (NRM) ротационным магнитометром JR-6 и магнитная восприимчивость (k) капаметром ИМВО-М. С целью определения компонентного состава NRM на ряде дублей было выполнено размагничивание переменным магнитным полем (h-чистка) и температурой (T-чистка).

Для определения состава и структуры носителей естественной остаточной намагниченности исследовались гистерезисные характеристики и термомагнитные свойства. Коэрцитивная (Hc) и остаточная коэрцитивная (Hcr) силы определялись по «спинке» петли гистерезиса на вибрационном магнитометре ВМА-1 [11] после предварительного намагничивания образца в поле индукцией 1 Тл. При определении намагниченности насыщения ферримагнетика (Isf) по кривой I(H) учитывался парамагнитный вклад. Для определения точек Кюри (Tc) и термостабильности магнитных свойств снимались зависимости намагниченности от температуры I(T) в поле индукцией 0.24 Тл на вибрационном магнитометре. При приближении к точке Кюри данные зависимости I² = f(T) аппроксимировались линейной функцией, по пересечению которой с осью температур определялась точка Кюри [12]. Термомагнитные исследования проводились на образцах объемом 1 см³ и менее.

Информация о минеральном составе, структуре и размерах ферримагнитных зерен — носителей остаточной намагниченности — была получена путем проведения электронно-зондовых исследований аншлифов на цифровом сканирующем микроскопе Tescan Vega II XMU (s.r.o. Tescan, г. Брно, Чешская Республика) сотрудником Института экспериментальной минералогии РАН А. Н. Некрасовым [13].

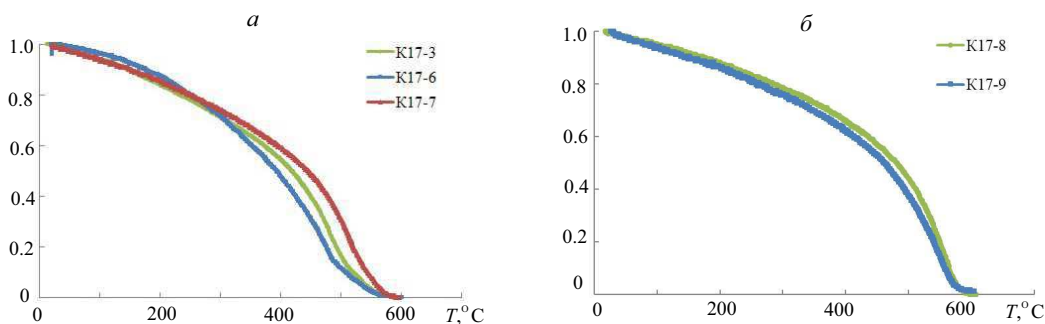
Расчёт координат палеомагнитных полюсов проводился по общепринятой методике [14]. Направление наиболее стабильной компоненты естественной остаточной намагниченности образцов определялось на кубических образцах объемом 8 см³ по результатам магнитной чистки в переменном поле и построения диаграмм Зийдверельда [15] при помощи пакета программ Remasoft [16].

Таблица II: Магнитные характеристики образцов

№	NRM, A/м	k_0 , ед Си 10^{-3}	$Q=NRM/(k_0 \cdot H)$	I_{rs}/I_{sf}	H_{cr}/H_c	T_c , °C по $I_s(T)$
K17-3	3.1-4.1	29-32	2.8-3.4	0.11	2.5	540
K17-6	3.2-4.2	24-33	2.5-3.6	0.09	3.3	560
K17-7	2.8-3.8	23-30	2.3-3.2	0.11	2.5	560
K17-8	10.6-16.0	6.0-10.1	36-49	0.26	2.0	580
K17-9	3.6-4.7	7.5 – 10.6	8.7-22.2	0.11	3.0	580
K19-11	2.6-3.5	4.5-6.5	12.4-15.3	-	-	-
K19-12	2.9-4.3	16-21	4.2-5.0	-	-	-

Таблица III: Результаты палеомагнитных исследований образцов лав Авачинского вулкана

№ лавового потока	№ образца	Число дублей	Япс, град	Дапс, град	Широта ВГП, град	Долгота ВГП, град	Напс, мкТл [14]	VDM, 10^{22} А·м ²
1	K17-3	4	57÷58	28÷30	65±2	275±3	56±6	8.6±0.9
	K17-6	5	55÷56	37÷39	59±2	267±2	52±2	8.1±0.3
	K17-7	9	63÷65	26÷29	71±2	261±2	47±4	6.9±0.6
2	K17-8	5	70÷72	17÷30	77±3	267±4	-	-
	K17-9	6	64÷67	-(3÷11)	84±2	217±28	55±3	8.0±0.5
	K19-11	16	68÷72	-2÷10	86±2	275±16	-	-
	K19-12	8	69÷72	-17÷5	82±2	230±8	-	-

Рис. 1: Зависимость намагниченности в поле 0.24 Тл от температуры $I_s(T)$: а — для образцов K17-3, K17-6, K17-7, б — для образцов K17-8, K17-9

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОМАГНИТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Магнитные характеристики изученных образцов представлены в табл. 2. По критерию Дзя [17] магнитная структура ферромагнитных зерен образцов соответствует псевдооднодоменному состоянию. Согласно термомагнитным данным (рис. 1 и табл. 2) магнитные свойства образцов с вулкана Авачинский в основном определяются титанистым магнетитом с температурой Кюри $T_c=540\div 580^\circ\text{C}$. Согласно результатам микрозондового анализа, содержание ульвошпинели (Fe_2TiO_4) в зернах титаномагнетита образца K17-9 в среднем близко к 0.14, содержание магнетита Fe_3O_4 около

0.76, в зернах образца K17-3 ульвошпинель — 0.28, магнетит — 0.6.

На рис. 2 приведены примеры размагничивания переменным магнитным полем. В процессе магнитной чистки было установлено, что NRM образцов в основном имеют однокомпонентный состав. В случае образцов, имеющих двухкомпонентный состав намагниченности, их неустойчивые компоненты разрушаются при величине переменного магнитного поля примерно в 10 мТл.

Значения наклона и склонения первичной остаточной намагниченности лавового потока относительно географической системы координат представлены на рис. 3. По модели IGRF-12 в точках отбора образцов наклонение современного магнитного поля равно

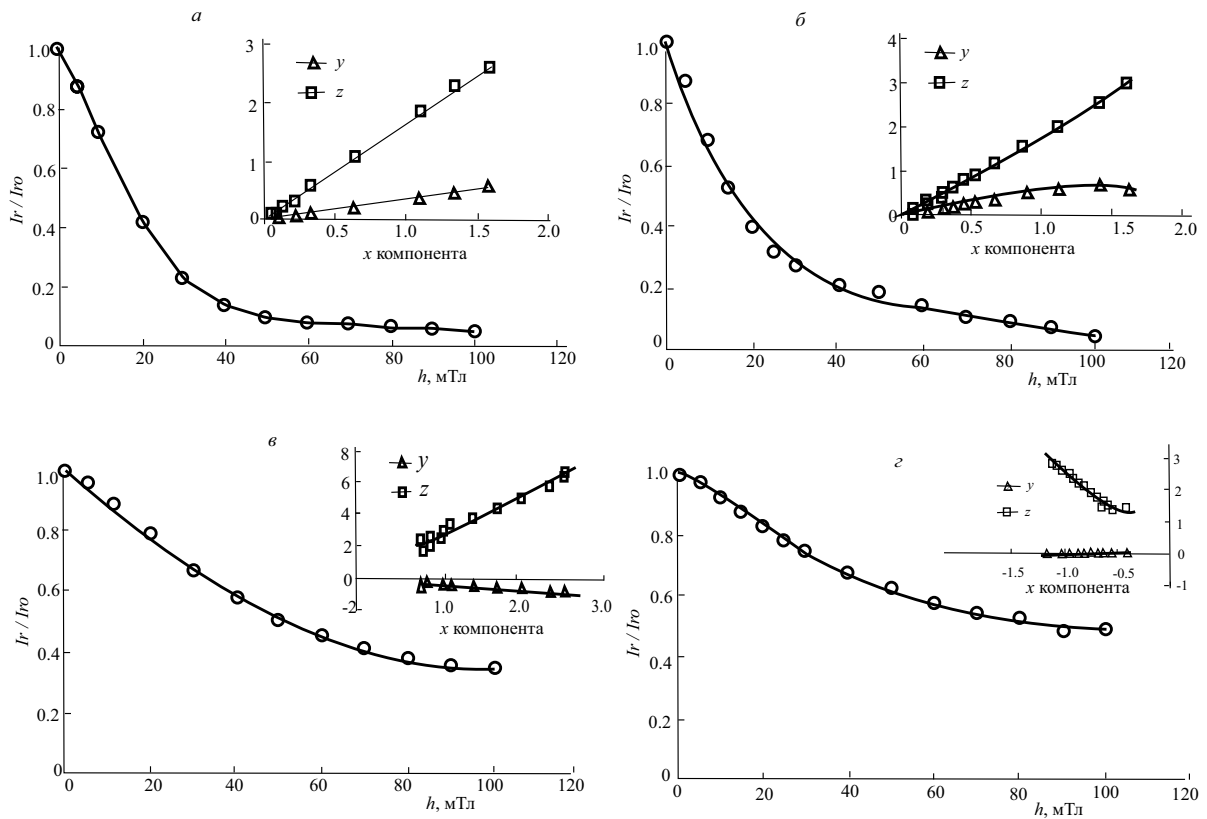


Рис. 2: Результаты h -чистки и диаграммы Зийдервельда (в правом верхнем углу) для образцов: a — K17-3, b — K17-6, v — K17-9, z — K19-11

$J_{IGRF} = 65^\circ$, а склонение $D_{IGRF} = -6.5^\circ$, измеренное значение наклонения в месте отбора образца K17-3 равно $J_{GMF} = 63.3^\circ$, что довольно близко к данным модели IGRF-12.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из результатов, представленных в табл. 3, видно, что образцы K17-3, K17-6 и K17-7 после магнитной чистки имеют довольно близкие направления NRM. Средние значения координат виртуального геомагнитного полюсам (ВГП) $Plat = 66^\circ \pm 4^\circ$, $Plong = 266^\circ \pm 5^\circ$ близки к зарегистрированному в 1831 г. положению северного магнитного полюса (рис. 4, a). Таким образом, данное определение положения виртуального геомагнитного полюса подтверждает то, что лавовый поток, с которого были отобраны образцы K17-3, K17-6 и K17-7, относится к извержению 1827 г. по историческим данным.

Как видно из рис. 3 и табл. 3, направления наиболее стабильной части естественной остаточной намагниченности образцов K17-8, K17-9, K19-11 и K19-12 близки по наклонению и более сильно разбросаны по склонению. Определенные по образцам K17-9 и K19-12 углы склонения и наклонения NRM близки к значениям этих параметров для современного магнитного поля ($J_{IGRF} = 65^\circ$, $D_{IGRF} = -6.5^\circ$). Известно, что лавовый поток, с которого были отобраны данные образцы, имеет возраст, превышающий 3500 лет [7]. Среднее по потоку значение координат ВГП, определенных по NRM этих образцов, составляет $Plat = 83^\circ \pm 3^\circ$, $Plong = 254^\circ \pm 21^\circ$. Из сравнения полученного поло-

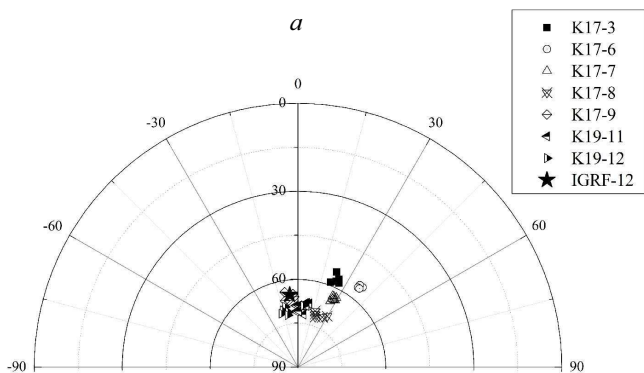


Рис. 3: Направления NRM образцов после магнитной чистки (10 мТл) в географической системе координат и направление современного геомагнитного поля в месте отбора образцов (черная звезда)

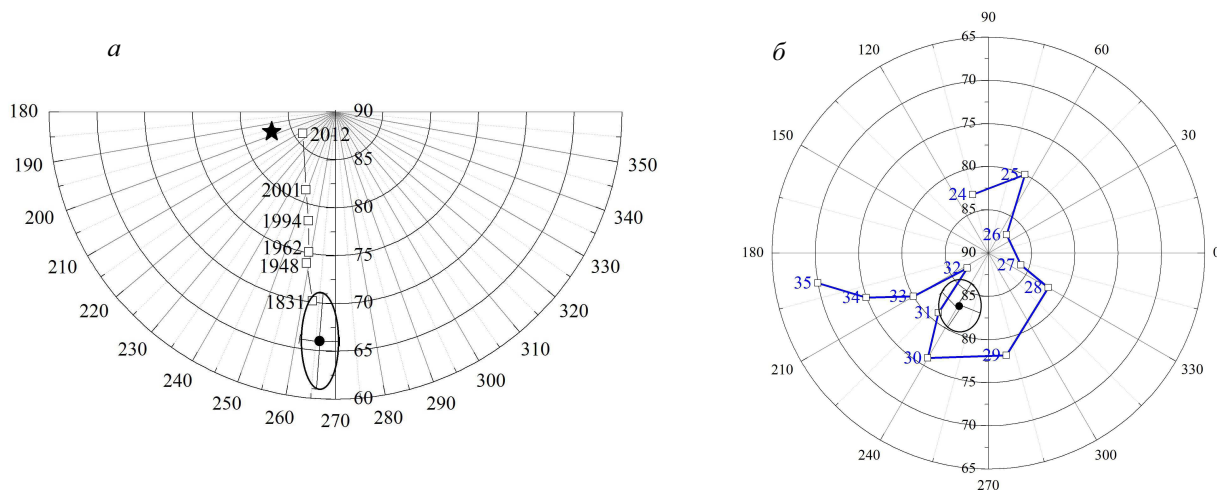


Рис. 4: *a* — Сравнение положения ВГП (черная точка), полученного по NRM образцов K17-3, K17-6 и K17-7 (1-ый лавовый поток), с зарегистрированными координатами северного магнитного полюса (полые квадраты) [18], цифрами указан год регистрации, для палеоплюса показан овал погрешности, черная звезда — положение рассчитанного по дипольному приближению [14] современного магнитного полюса; *б* — Сравнение положения ВГП (черная точка), полученного по NRM образцов K17-8, K17-9, K19-11 и K19-12, с определенными по археомагнитным измерениям положениями северного магнитного полюса (полые точки), цифрами указан век до н.э. [20], для ВГП показан овал погрешности

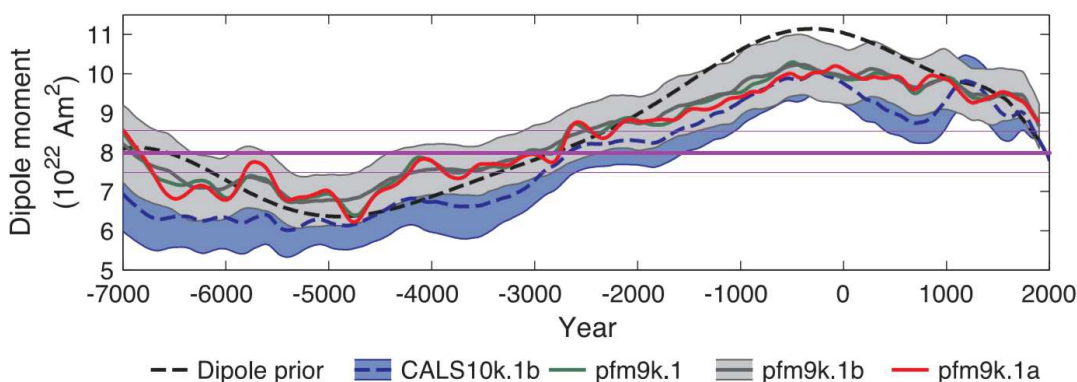


Рис. 5: Изменение дипольного момента Земли за 9000 лет по различным моделям геомагнитного поля [21], фиолетовые прямые – полученное значение VDM и диапазон погрешности по образцу K17-9

жения ВГП с литературными данными (рис. 4, б) можно сделать предположение, что лавовый поток, из которого были отобраны образцы K17-8, K17-9, K19-11 и K19-12, образовался примерно 5000 лет назад. Анализ значений палеонапряженности, определенных в [19] по образцам K17-9, K17-3, K17-6 и K17-7 методом Телье-Коэ, даёт такой же результат. В работах [13, 19] нами было показано, что наиболее надёжными определениями величины и направления палеонапряженности геомагнитного поля можно считать результаты, полученные на образцах K17-6 и K17-9.

Сравнение $VDM=8.0\pm 0.5$, рассчитанному по *Hanc* образца K17-9 (табл. 3), с данными изменения VDM за последние 9000 лет [21], возраст образца K17-9 может быть около 5000 лет или 9000 лет (рис. 5). Известно, что в конце позднего плейстоцена–начале голоце-

на в деятельности Авачинского вулкана был период относительного покоя длительностью более 2000 лет, а вулканическая активность возобновилась ~ 7250 лет назад [9]. Следовательно, исследуемый лавовый поток можно отнести к крупнейшим извержениям, которые произошли 5000–5500 лет назад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ предварительных результатов палеомагнитных исследований, выполненных на образцах вулкана Авачинский, позволяет сделать следующие выводы:

1. Определенное в работе положение виртуального геомагнитного полюса $Plat=66^\circ \pm 4^\circ$, $Plong=$

$266^\circ \pm 5^\circ$ подтверждает то, что лавовый поток, из которого были отобраны образцы K17-3, K17-6 и K17-7, относится к историческому извержению 1827 года.

2. Средние значения координат виртуального геомагнитного полюса, определенные по образцам K17-8, K17-9, K19-11 и K19-12, составляют $Plat = 83^\circ \pm 3^\circ$, $Plong = 254^\circ \pm 21^\circ$. Исследуемый лавовый поток можно отнести к одному из крупнейших

ших извержений Авачинского вулкана, которые произошли 5000–5500 лет назад.

Автор выражает большую признательность профессору В. И. Максимочкину за обсуждение работы и научное руководство.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-05-00144, 20-05-00573).

- [1] Павлов В. Э., Флуто Ф., Веселовский Р. В., Фетисова А. М., Латышев А. В. // Физика Земли. 2011. № 5. С. 35.
- [2] Алыпина О. М. // Бюлл. вулканологических станций. 1967. № 43. С. 27.
- [3] Кочегура В. В., Зубов А. Г., Брайцева О. А. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 3.
- [4] Латышев А. В., Кушлевич Д. О., Пономарева В. В., Певзнер М. М., Федюкин И. В. // Физика Земли. 2017. № 5. С. 139.
- [5] Аверьянов В. С., Мельников Б. Н. // Физика Земли. 1975. № 6. С. 86.
- [6] Мелекесцев И. В., Литасова С. Н., Сулержицкий Л. Д. // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 3.
- [7] Базанова Л. И., Брайцева О. А., Пузанков М. Ю., Сулержицкий Л. Д. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 20.
- [8] Мелекесцев И. В., Брайцева О. А., Двигалов В. Н., Базанова Л. И. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 13.
- [9] Брайцева О. А., Базанова Л. И., Мелекесцев И. В., Сулержицкий Л. Д. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3.
- [10] Аверьянов В. С., Штейнберг Г. С. // Проблемы изучения палеогеомагнитных вариаций магнитного поля Земли, ДВНЦ АН СССР. Владивосток. 1979. С. 61-67.
- [11] Максимочкин В. И., Трухин В. И., Гарифуллин Н. М., Хасанов, Н. А. // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 5, С. 1.
- [12] Moskowitz B. M. // Earth Planet. Sci. Lett. 1981. **53**, P. 84. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90028-5)
- [13] Максимочкин В. И., Слепцова Ю. В., Некрасов А. Н. // Проблемы геокосмоса. Материалы 12-й международной школы-конференции. Санкт-Петербург, Петергоф. 8–12 октября 2018 г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербург, 2018. С. 15–16.
- [14] Храмов А. Н. Палеомагнитология. Недра, Л., 1982.
- [15] Zijdeveld J. D. A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. Methods in paleomagnetism / Eds. Collinson D.W., Creer K.M. Amsterdam. Elsevier. 1967. P. 254–286.
- [16] Chadima M., Hroudka F. // Travaux G ophysiques. 2006. **27**. P. 20.
- [17] Day R., Fuller M., Schmidt V. A. H // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. **13**. P. 260.
- [18] Th ubault, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D. et al. // *Earth Planet Sp.* 2015. **67**, P. 79.
- [19] Максимочкин В. И., Слепцова Ю. В. // Процессы в гео-средах. 2019. № 3. С. 345.
- [20] Бурлацкая С. П. Археомagnetизм: Структура и эволюция магнитного поля Земли. М.: ГЕОС, 2007. ISBN 978-5-89118-417-5
- [21] Nilsson A., Holme R., Korte M., Suttie N., Hill M. // *Geophys. J. Int.* 2014. **198**. P. 229.

The age of lava flows of the Avachinsky volcano (Kamchatka) according to paleomagnetic data

Iu. V. Sleptsova

Department of Earth Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

E-mail: sleptcova.io14@physics.msu.ru

Paleomagnetic studies of igneous rocks of the Avachinsky volcano are carried out and preliminary results of determining the angular elements of the geomagnetic field are obtained. The direction of the geomagnetic field was determined for the most stable part of the natural remanent magnetization of 53 samples from 7 sites: 18 samples from 3 sites (sampling point N $53^\circ 12'$, E $158^\circ 48'$) from the lava flow of the historical eruption of 1827 and 35 samples from 4 sites (sampling point N $53^\circ 16'$, E $158^\circ 49'$) from the lava flow which age exceeds 3500 years.

Using the first group of samples ($N = 3$), the position of the virtual geomagnetic pole was obtained with the coordinates $Plat = 66^\circ \pm 4^\circ$, $Plong = 266^\circ \pm 5^\circ$, which, within the error, coincides with the position of the north magnetic pole, registered in 1831.

For the second group of samples ($N = 4$), the coordinates of the virtual geomagnetic pole are $Plat = 83^\circ \pm 3^\circ$, $Plong = 254^\circ \pm 21^\circ$. Based on a comparison of the obtained coordinates of the virtual geomagnetic pole and paleointensity with the paleosecular

variations of the magnitude and direction of the Earth's dipole magnetic moment over the past 9000 years, it is concluded that the second investigated flow refers to the lava eruption that occurred about 5000–5500 years ago.

PACS: 91.25.??, 91.25.Le

Keywords: geomagnetic field, paleomagnetism, paleomagnetic pole, paleointensity, paleosecular variations, lava flows, Avachinsky volcano, Kamchatka.

Received 09 January 2020.

Сведения об авторе

Слепцова Юлия Васильевна — магистр; e-mail: sleptcova.iv14.[@physics.msu.ru](mailto:sleptcova.iv14@physics.msu.ru).
