

УДК 550.384

## ВЕКОВЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОСЛЕДНИХ 4000 ЛЕТ, ЗАПИСАННЫЕ В ЛАВАХ И ПИРОКЛАСТИКЕ СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ: НОВЫЕ ДАННЫЕ

© 2017 г. А. В. Латышев<sup>1,2,\*</sup>, Д. О. Кушлевич<sup>2</sup>, В. В. Пономарева<sup>3</sup>,  
М. М. Певзнер<sup>4</sup>, И. В. Федюкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

<sup>4</sup>Геологический институт РАН, г. Москва

\*E-mail: anton.latyshev@gmail.com

Поступила в редакцию 10.03.2017 г.

Получены новые палеомагнитные определения по лавовым потокам и вулканическим пеплам Северной группы вулканов Камчатки, удовлетворяющие современным методическим и аппаратным требованиям к проведению палеомагнитных исследований. В интервале последних 4000 лет исследовано 12 стратиграфических уровней, датированных тефрохронологическим методом. Полученные направления геомагнитного поля восполняют недостаток данных по вековым вариациям для северо-востока Азии и могут быть использованы при разработке глобальных моделей геомагнитного поля. Кроме того, показана перспективность использования вариаций геомагнитного поля для региональной корреляции вулканических событий.

*Ключевые слова:* вековые вариации, Камчатка, голоцен, геомагнитное поле, лавовые потоки

**DOI:** 10.7868/S000233717050088

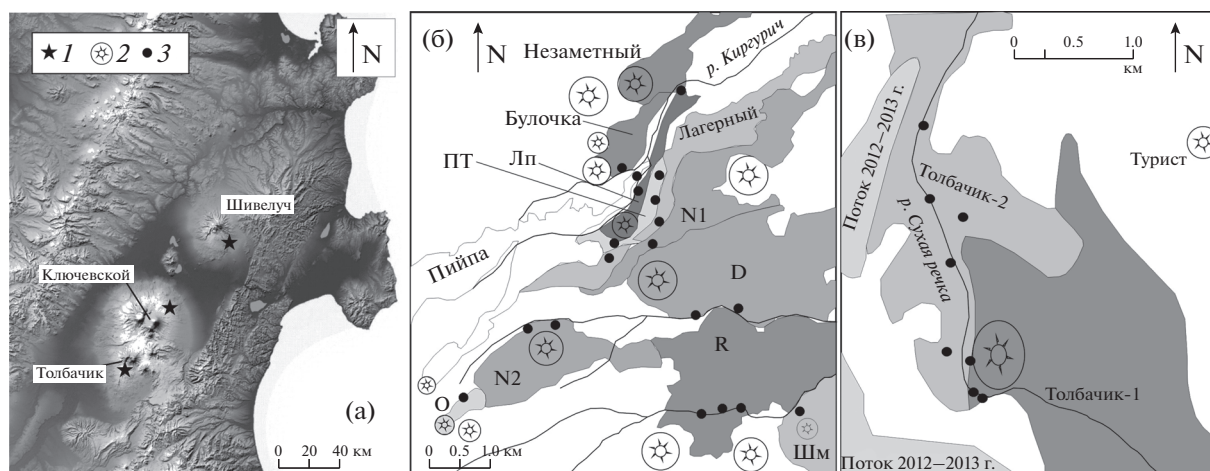
### ВВЕДЕНИЕ

Вековые вариации геомагнитного поля представляют собой перспективный инструмент для исследования магнитного поля Земли. Величина вариаций — один из основных параметров, характеризующих поведение геомагнитного поля. Исследования вековых вариаций важны для построения моделей магнитного геодинамо и понимания процессов, протекающих в жидком внешнем ядре Земли. Кроме того, эти данные могут быть использованы и для чисто геологических целей, например, для корреляции пространственно удаленных районов вулканических провинций или оценки длительности магматических событий (например, [Павлов и др., 2011]). Поведение геомагнитного поля на протяжении последних четырех столетий изучено относительно хорошо путем прямых наблюдений и описывается детально разработанными моделями (например, [Jackson et al., 2000]), в то время как для более древних эпох используются определения, получаемые косвенно на основании исследования геологических и археологических объектов.

На настоящий момент для геомагнитного поля позднего голоцена разработан ряд глобальных математических моделей, основанных на компи-

ляции данных по лавовым потокам, озерным осадкам и археологическим объектам [Korte et al., 2011; Donadini et al., 2009; Nilsson et al., 2014]. Тем не менее, надежность таких моделей остается недостаточной из-за неравномерного распределения результатов исследования вариаций по поверхности Земли. В частности, по северо-востоку Азии надежная информация о вековых вариациях остается скудной, а данные по некоторым регионам до сих пор отсутствуют. В связи с этим получение новых данных по угловым элементам геомагнитного поля позднего голоцена Камчатки представляет интерес не только для региональных сопоставлений, но и для глобальных моделей, в том числе для определения недипольных компонент геомагнитного поля.

Лавовые потоки представляют собой прекрасный объект для детального исследования структуры геомагнитного поля (см. например, [Valet et al., 2012]), поскольку при остывании потока магнитные минералы, содержащиеся в лаве, записывают мгновенную в геологическом смысле информацию о состоянии магнитного поля. Кроме того, перспективными объектами для изучения вековых вариаций являются ассоциирующие с лавами пирокластические отложе-



**Рис. 1.** Схема расположения объектов исследования: (а) – Цифровая модель рельефа SRTM (геологическая служба США) пространственного разрешения – 90 м. Северная группа вулканов Камчатки: 1 – расположение районов исследования; 2 – шлаковые конусы; 3 – палеомагнитные сайты; (б) – схема изученных лавовых потоков на северо-восточном склоне вулкана Ключевской по О.А. Брайцевой, И.В. Мелекесцеву, В.В. Пономаревой (неопубликованные данные). Сокращения: ПТ – Псевдотуйла; ШМ – Шмалева; Лп – Лепешка; (v) – схема изученных лавовых потоков на южном склоне вулкана Толбачик, по [Брайцева и др., 1984; Churikova et al., 2015].

ния (например, [Genevey et al., 2002; Roperch et al., 2014]), в том числе вулканические пеплы.

Работы по изучению вековых вариаций геомагнитного поля по почвенно-пирокластическим разрезам Камчатки уже проводились в прошлом веке [Добрецова и др., 1982; Кочегура и др., 1986]. На основании палеомагнитного изучения отложений почвенно-пирокластического чехла В.В. Кочегурой с соавторами [1986] была разработана кривая геомагнитных вариаций для последних 4000 лет, однако при определении направления геомагнитного поля использовалась лишь ограниченная магнитная чистка образцов. В последние десятилетия был достигнут качественно новый уровень в методике и аппаратной базе палеомагнитных исследований (обязательное проведение магнитной чистки и компонентного анализа, использование высокоточных криогенных магнитометров) и радиоуглеродного датирования; кроме того, существенно уточнились объемы радиоуглеродных дат, что позволило уточнить возраст извержений, с которыми связаны прослой маркирующих пеплов. В связи с этим, несмотря на безусловную методическую ценность, результаты, приведенные в работе [Кочегура и др., 1986], к сожалению, не могут быть напрямую использованы в глобальных моделях геомагнитного поля без дополнительных современных исследований.

Основной целью данной работы являлось получение новых надежных определений направления геомагнитного поля по голоценовым вулканическим породам Камчатки. В качестве объектов были выбраны лавовые потоки вулканов Ключевской и Толбачик, а также маркирующие

горизонты тефры вулкана Шивелуч в разрезах р. Кабеку (юго-восточное подножие вулкана Шивелуч). Выбор объектов был обусловлен наилучшей обнаженностью и наличием максимальной детальной тефрохронологической информации о возрасте потоков.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ГЕОЛОГИЯ

Камчатка представляет собой наиболее активную область современного вулканизма на территории России. Наиболее крупные и продуктивные вулканы полуострова (Ключевской, Толбачик, Шивелуч) объединяются в так называемую Северную группу, которая расположена в пределах Центрально-Камчатской депрессии (рис. 1а).

В рамках настоящей работы было проведено детальное палеомагнитное опробование лавовых потоков северо-восточного склона вулкана Ключевской (локация “Подкова”) и южного склона вулкана Толбачик. Также были опробованы маркирующие горизонты тефры вулкана Шивелуч в разрезах почвенно-пирокластического чехла на р. Кабеку (юго-восточное подножие вулкана Шивелуч). Исследованные лавовые потоки вулканов Ключевского и Толбачика обладают видимой мощностью от 5 до 20 м и сложены преимущественно базальтами и андезибазальтами [Ozerov, 2000; Auer et al., 2008; Churikova et al., 2015]. Большинство маркирующих пирокластических горизонтов в почвенно-пирокластических чехлах на склонах вулканов Северной группы представлены тефрой вулкана Шивелуч и имеют индекс SH; они выделяются в разрезах светлой до белого окраской, а по химическому составу отвечают ан-

**Таблица 1.** Местоположение и стратиграфическая позиция опробованных объектов. В графе “диапазон возраста” приведен календарный калиброванный возраст, а в графе “стратиграфическая привязка” индексы пеплов (л. н. от 1950 г.) по работе [Ronovareva et al., 2015]. Тейхронологическое датирование лавовых потоков подножия вулкана Ключевского по О.А. Брайцевой, И.В. Мелекесцеву, В.В. Пономаревой

Объект	Название	Местоположение, вулкан	Стратиграфическая привязка	Диапазон возраста
Лавовый поток	Пийпа	Ключевской		1966 г.
Лавовый поток	О	Ключевской	Непосредственно над SH <sub>1</sub>	~300
Лавовый поток	Псевдотуйла	Ключевской	Непосредственно над SH <sub>1</sub>	~300
Тефра	SH <sub>#5</sub>	Шивелуч, р. Кабеку		553
Лавовый поток	Толбачик-2	Толбачик	Между SH <sub>#5</sub> и SH <sub>2</sub>	553–764
Лавовый поток	Лагерный	Ключевской	Между SH <sub>3</sub> и SH <sub>#16</sub>	1363–1549
Лавовый поток	Шмалева	Ключевской	Между SH <sub>#16</sub> и KS <sub>1</sub>	1549–1686
Лавовый поток	D	Ключевской	Между KS <sub>1</sub> и SH <sub>5</sub>	1686–1852
Лавовый поток	N1	Ключевской	Между KS <sub>1</sub> и SH <sub>5</sub>	1686–1852
Лавовый поток	N2	Ключевской	Между KS <sub>1</sub> и SH <sub>5</sub>	1686–1852
Тефра	SH <sub>5</sub>	Шивелуч, р. Кабеку		1852
Лавовый поток	Незаметный	Ключевской	Непосредственно под SH <sub>5</sub>	1852–3038 (~1860)
Лавовый поток	R	Ключевской	Между SH <sub>5</sub> и SH <sub>b</sub>	1852–3038
Лавовый поток	Булочка	Ключевской	Между SH <sub>5</sub> и SH <sub>b</sub>	1852–3038
Лавовый поток	Толбачик-1	Толбачик	Под SH <sub>5</sub>	1852– ...
Лавовый поток	Лепешка	Ключевской	Между SH <sub>b</sub> и SH <sub>sp</sub>	3038–3959

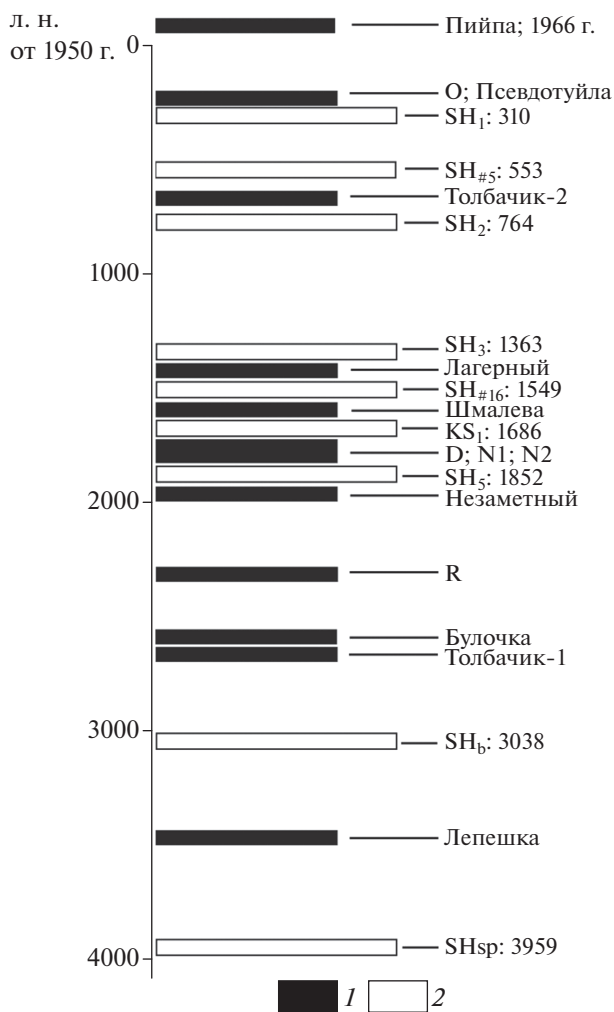
дезитам [Ronovareva et al., 2007]. Кроме того, для верхней части разрезов важное стратиграфическое значение имеет пепел KS<sub>1</sub>, связанный с последним кальдерообразующим извержением вулкана Ксудач на южной Камчатке; для этого горизонта характерны постоянная мощность и двухцветная окраска (палевый и серый), по составу тефра отвечает низкокалийевому андезидациту [Braitseva et al., 1997].

Нами было опробовано 12 лавовых потоков вулкана Ключевского (рис. 1б) и 2 потока вулкана Толбачик (рис. 1в). Возраст лав определялся по соотношению с маркирующими горизонтами тефры в подстилающих и перекрывающих почвенно-пирокластических чехлах согласно методике, разработанной О.А. Брайцевой с коллегами [Брайцева и др., 1978]. Возраст маркирующих горизонтов тефры, определенный с помощью радиоуглеродного метода, пересчитан в календарный калиброванный (далее календарный) и приводится в статье по [Ronovareva et al., 2015], как и индексы прослоев. Согласно тейхронологическим данным, опробованные потоки вулкана Ключевского отвечают 7 различным стратиграфическим уровням, образовавшимся в течение последних 4000 лет, при этом в ряде случаев два и более потока оказываются зажаты двумя маркирующими горизонтами в один интервал (см. табл. 1;

рис. 2). Для этих потоков на данном этапе мы не можем более точно установить возраст тейхронологическим методом, но иногда возможно восстановить их относительное время излияния. Например, лавовые потоки R, Булочка и Незаметный залегают между маркирующими прослоями SH<sub>5</sub> и SH<sub>b</sub>. При этом лавы потока Незаметный залегают непосредственно под горизонтом SH<sub>5</sub>, в то время как R и Булочка отделены от SH<sub>5</sub> несколькими прослоями шлаков, причем поток R стратиграфически несколько выше. На основании этого можно предполагать, что внутри рассматриваемого диапазона поток Булочка является самым древним, а поток Незаметный – самым молодым.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор палеомагнитных образцов производился из центральной части лавовых потоков портативной буровой установкой или (в отдельных случаях) вручную, их ориентировка в пространстве – с помощью магнитного компаса, с постоянным контролем возможного воздействия на стрелку компаса сильномагнитных пород. Каждый поток опробовался в нескольких сайтах (точках отбора), при наличии подходящих обнажений. Из каждого сайта было отобрано от 7 до 20 образцов (в среднем 10–12). Отбор горизонтов тефр из поч-



**Рис. 2.** Сводная хроностратиграфическая схема изученных лавовых потоков и маркирующих горизонтов тефры: 1 – лавовые потоки; 2 – прослои тефры. Индексы и календарный возраст пеплов (л. н. от 1950) приведены по работе [Ponomareva et al., 2015].

венно-пирокластического чехла проводился вручную по методике “plaster cap”, описанной в работе [Thellier, 1981; Gallet et al., 2002]. Величина местного магнитного склонения рассчитывалась по модели IGRF. Лабораторные палеомагнитные исследования и обработка результатов магнитных чисток выполнялись в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН. Образцы были подвергнуты ступенчатой температурной чистке (около 40% всех образцов) и чистке переменным магнитным полем (около 60%). Продолжительность чистки в большинстве случаев составляла 7–15 шагов. Для терморазмагничивания образцов использовали немагнитные печи “ММТД–80” с величиной некомпенсированного поля не более 5–10 нТл. Ступенчатая чистка переменным магнитным полем осуществлялась до 130 мТл с помощью при-

ставки к криогенному магнитометру 2G Enterprises. Остаточная намагниченность образцов измерялась при помощи спин-магнитометров “JR-6” AGICO и криогенного магнитометра “Khranov” 2G Enterprises. Обработку измерений остаточной намагниченности выполняли при помощи пакета программ Enkin [Enkin, 1994] и Remasoft [Chadima, Hroudka, 2006], использующих при выделении компонент намагниченности метод PCA [Kirschvink, 1980]. Анализ полученных данных производился с использованием статистики Фишера [Fisher, 1953].

Петромагнитные исследования проведены в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН. Температурные кривые намагниченности насыщения снимались на вибромагнитометре конструкции Ю.К. Виноградова в поле 0.35 Тл. Изучение параметров магнитного гистерезиса проводилось с помощью вибромагнитометра РМС MicroMag 3900 в ИФЗ РАН и коэрцитивного спектрометра J-meter в ИНГГ РАН (г. Новосибирск). Доменная структура ферромагнитных зерен оценивалась по диаграмме Дэй [Day et al., 1977].

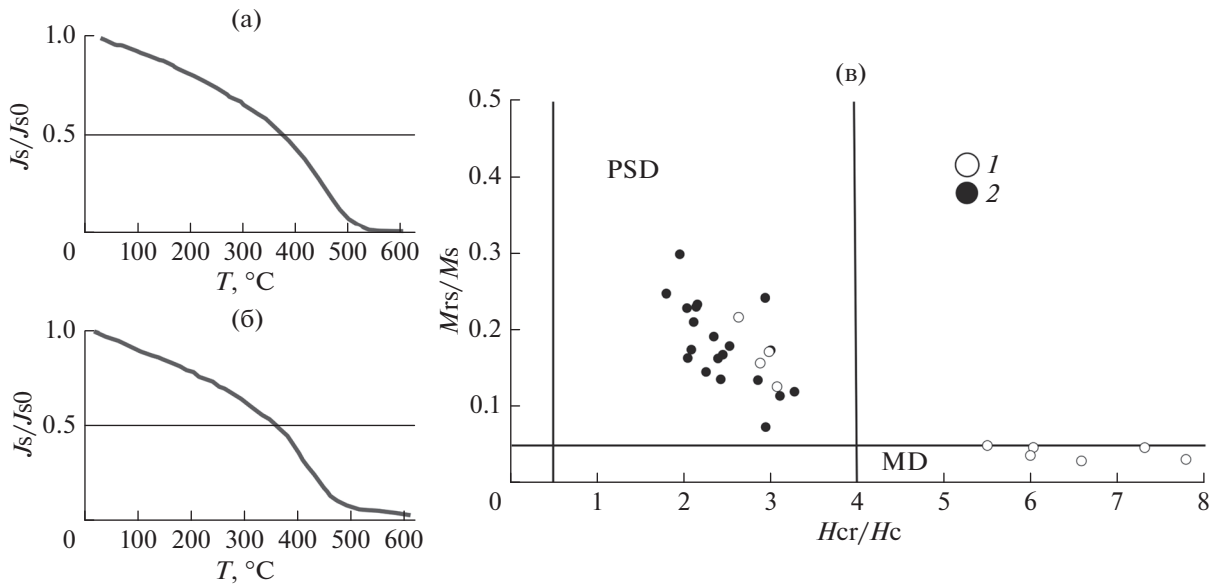
## ПЕТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

Температурные кривые намагниченности насыщения, снятые до температур 600–650°C по образцам лав и пеплов, демонстрируют, что наиболее распространенными минералами – носителями намагниченности в изучаемых образцах являются низкотитанистый титаномагнетит и магнетит. Измеренные температуры Кюри варьируют в пределах 400–570°C (рис. 3а, 3б), в отдельных образцах – до 600°C.

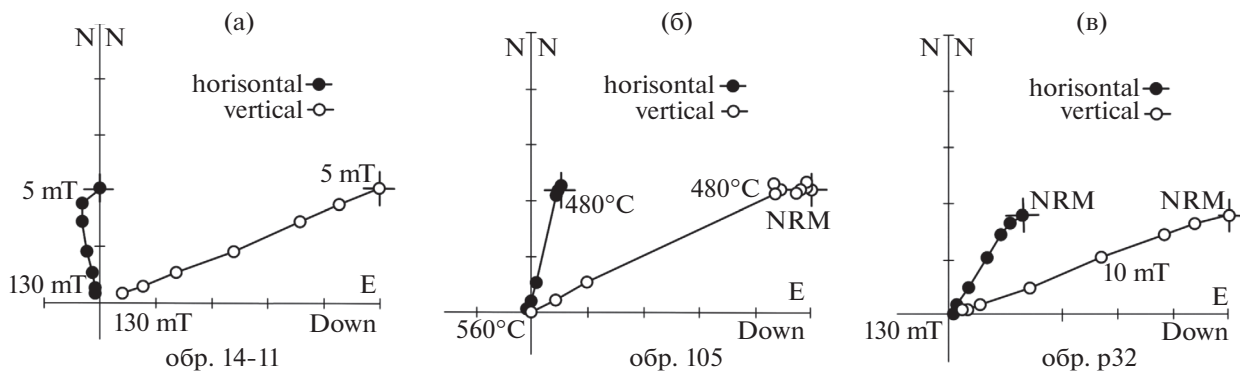
Значения гистерезисных параметров  $Mrs/Ms$  и  $Hcr/Hc$  для базальтов варьируют в пределах 0.12–0.3 и 1.96–3.28 соответственно, что на диаграмме Дэй [Day et al., 1977] отвечает области псевдооднородных частиц (рис. 3в). Образцы тефры в 30% случаев обладают сходными с лавами гистерезисными характеристиками, остальные образцы попадают в область многодоменных зерен.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе температурной чистки большая часть исследованных образцов была размагничена к температурам 450–600°C, в отдельных сайтах – до 630°C. Качество палеомагнитного сигнала в разных сайтах варьирует от отличного до трудноинтерпретируемого и в среднем для современных вулканитов является относительно низким. Тем не менее для каждого сайта удалось набрать достаточное количество образцов с ясной палеомагнитной записью для расчета направлений геомагнитного поля. Большинство образцов характеризуется одно- или двухкомпонентным составом



**Рис. 3.** Результаты петромагнитных исследований: (а) – термомагнитная кривая намагниченности насыщения, образец 2-18, лавовый поток Лепешка  $J_s$  – намагниченность насыщения,  $J_{s0}$  – намагниченность насыщения при комнатной температуре; (б) – термомагнитная кривая намагниченности насыщения, образец p30, пепел SH<sub>#5</sub>; (в) – гистерезисные параметры исследованных образцов.  $M_s$  – намагниченность насыщения;  $M_{ts}$  – остаточная намагниченность насыщения;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $H_{cr}$  – остаточная коэрцитивная сила. PSD – область псевдооднородных частиц; MD – область многодоменных частиц; 1 – пеплы; 2 – лавы.



**Рис. 4.** Результаты магнитной чистки образцов: типичные диаграммы Зейдверelda [Zijderveld, 1967]: (а) – образец 14-11, лавовый поток Толбачик-2, чистка переменным полем; (б) – образец 105, лавовый поток Псевдотуйла, термочистка; (в) – образец p32, пепел горизонт SH<sub>#5</sub>, чистка переменным полем.

естественной остаточной намагниченности. Низкотемпературная компонента, если ее удастся выделить, размагничивается к температурам 250–300°C и, вероятно, имеет вязкую природу. Высокотемпературная компонента в большинстве случаев разрушается в интервале 450–580°C (рис. 4б).

Образцы, подвергнутые чистке переменным магнитным полем, в большинстве случаев демонстрируют отличную палеомагнитную запись. Низкокоэрцитивная компонента естественной остаточной намагниченности, при ее наличии, полностью разрушается к 5–10 мТл и предположительно имеет вязкую природу, аналогично

низкотемпературной. Наиболее стабильная компонента размагничивается в интервале 5–80 мТл, иногда до 130 мТл (рис. 4а, 4в).

Сравнение высокотемпературной и высококоэрцитивной компонент естественной остаточной намагниченности, рассчитанных в одних и тех же сайтах, не выявило значимых различий в направлении векторов. Учитывая, что при чистке переменным магнитным полем качество палеомагнитного сигнала в образцах оказалось более высоким, большая часть образцов лав и все образцы тефры были подвергнуты такому способу размагничивания.

**Таблица 2.** Палеомагнитные направления, рассчитанные по лавовым потокам и пеплам Северной группы вулканов Камчатки. N – количество образцов; D – склонение; I – наклонение; K,  $\alpha 95$  – параметры статистики Фишера [Fisher, 1953]. Жирным шрифтом выделены направления, используемые в дальнейших расчетах. \* – при расчете для потоков D, N1, N2; а также O и Псевдотуйла взято среднее направление

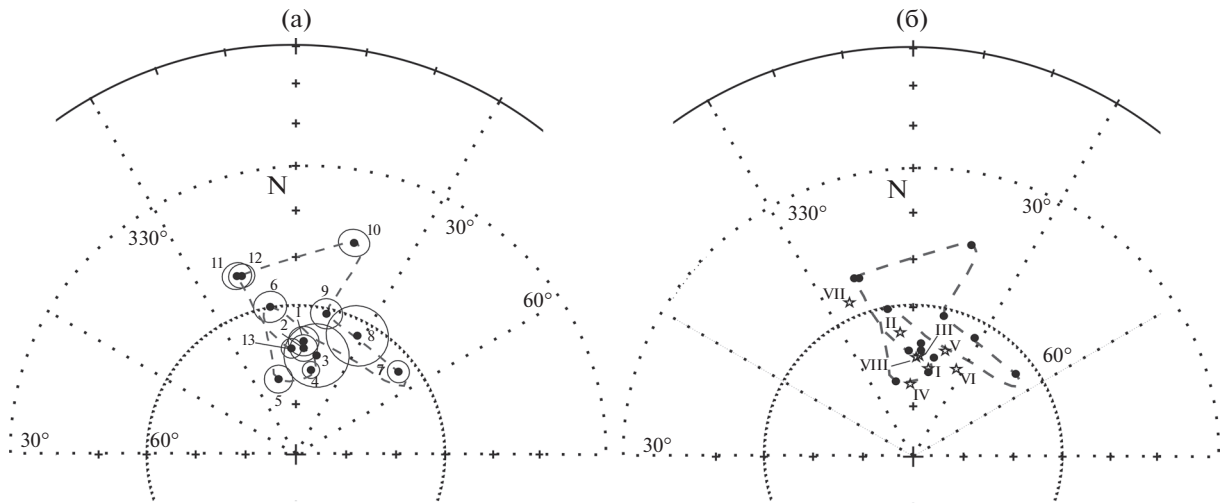
Объект (лавовый поток или горизонт тефры)	N	D,°	I,°	K	$\alpha 95$
<b>Пийпа</b>	<b>18</b>	<b>3.9</b>	<b>67.3</b>	<b>133.1</b>	<b>3.0</b>
O	16	6.6	70.5	68.4	4.5
Псевдотуйла	22	2.7	67.3	85.5	3.4
<b>Среднее для группы “O + Псевдотуйла”</b>	<b>38</b>	<b>4.2</b>	<b>68.7</b>	<b>76.7</b>	<b>2.7</b>
<b>SH<sub>#5</sub></b>	<b>11</b>	<b>11.8</b>	<b>69.8</b>	<b>52.0</b>	<b>6.4</b>
<b>Толбачик-2</b>	<b>67</b>	<b>10.1</b>	<b>72.9</b>	<b>110.1</b>	<b>1.7</b>
<b>Лагерный</b>	<b>28</b>	<b>347</b>	<b>74.6</b>	<b>95.4</b>	<b>2.8</b>
<b>Шмалева</b>	<b>14</b>	<b>350.1</b>	<b>59.9</b>	<b>158.5</b>	<b>3.2</b>
D	9	44.5	63.7	325.1	2.9
N1	9	57.2	60.9	216.9	3.5
N2	12	50.9	65.4	117.3	4.0
<b>Среднее для группы D</b>	<b>30</b>	<b>51.1</b>	<b>63.6</b>	<b>150.2</b>	<b>2.2</b>
<b>SH<sub>5</sub></b>	<b>9</b>	<b>27.4</b>	<b>63.2</b>	<b>71.9</b>	<b>6.1</b>
<b>Незаметный</b>	<b>32</b>	<b>12.3</b>	<b>61.1</b>	<b>67.5</b>	<b>3.1</b>
<b>R</b>	<b>24</b>	<b>15.4</b>	<b>45.3</b>	<b>106.6</b>	<b>2.9</b>
<b>Булочка</b>	<b>12</b>	<b>341.7</b>	<b>52.0</b>	<b>234.0</b>	<b>2.8</b>
<b>Толбачик-1</b>	<b>31</b>	<b>343.1</b>	<b>52.3</b>	<b>108.3</b>	<b>2.5</b>
Среднее для группы Булочка + Толбачик-1	43	342.7	52.2	129.2	1.9
<b>Лепешка</b>	<b>23</b>	<b>357.6</b>	<b>68.8</b>	<b>241.8</b>	<b>2.0</b>
Среднее значение по потокам и маркирующим горизонтам*	13	5.1	64.3	42.7	6.4
Направления из [Кочегура и др., 1986], использованные в данной работе					
SH <sub>2</sub>	68	9.9	72.3	116.0	1.6
SH <sub>3</sub>	80	354.0	65.0	111.0	1.5
Шмалева (шлак конуса)	75	3.1	70.0	82.0	1.8
KS <sub>1</sub>	38	357.6	75.5	147.0	1.9
D (шлак конуса)	10	16.8	67.9	503.0	2.2
SH <sub>5</sub>	31	26.3	70.7	177.0	2.0
Булочка (шлак конуса)	26	337.5	56.4	75.0	3.3
Лепешка (шлак конуса)	105	1.8	70.2	243.0	0.9

Для каждого из опробованных лавовых потоков удалось рассчитать среднее направление геомагнитного поля. При расчете среднего значения использовались только направления, полученные по образцам с хорошей палеомагнитной записью. Для лавовых потоков, опробованных в нескольких сайтах, расчет среднего осуществлялся на уровне образцов. В некоторых случаях для потоков, отнесенных на основании тефрохронологических данных к единым стратиграфическим уровням, были получены средние направления, статистически неразличимые методом теста обращения [McFadden, McElhinny, 1990]: потоки O и Псевдотуйла; D, N2, N1. Поскольку эти факты указывают на синхронность (в геологическом

смысле) излияния потоков, в таких случаях рассчитывалось среднее направление по всем потокам на уровне образцов. В итоге были рассчитаны направления для 12 лавовых потоков или групп потоков вулканов Ключевской и Толбачик, при этом величина доверительного интервала  $\alpha 95$  для всех определений не превышает  $3.5^\circ$ . Средние палеомагнитные направления по всем объектам приведены в табл. 2.

Также были рассчитаны средние направления геомагнитного поля по маркирующим горизонтам SH<sub>#5</sub> и SH<sub>5</sub>. Поскольку возраст этих прослоев известен [Ponomareva et al., 2015], точное определение палеонаправлений по ним чрезвычайно





**Рис. 5.** (а) – распределение средних направлений по лавовым потокам и пеплам: 1 – поток Пийпа; 2 – группа Псевдотуйла + О; 3 – пепел SH<sub>#5</sub>; 4 – Толбачик-2; 5 – Лагерный; 6 – поток Шмалева; 7 – группа D; 8 – пепел SH<sub>5</sub>; 9 – Незаметный; 10 – R; 11 – Булочка; 12 – Толбачик-2; 13 – Лепешка. Пунктирная линия – опорная кривая вековых вариаций; (б) – сопоставление авторских данных с результатами из работы [Кочегура и др., 1986]. Шлаки конусов и маркирующие пеплы: I – SH<sub>2</sub>; II – SH<sub>3</sub>; III – Шмалева; IV – KS<sub>1</sub>; V – D; VI – SH<sub>5</sub>; VII – Булочка; VIII – Лепешка. Пунктирная линия – опорная кривая вековых вариаций.

важно для построения опорной кривой вековых вариаций. К сожалению, точность определения средних направлений для пепловых прослоев оказалась существенно ниже, чем для лавовых потоков ( $\alpha_{95} = 6.1^\circ$  для SH<sub>5</sub> и  $6.4^\circ$  для SH<sub>#5</sub>). Такой значительный разброс направлений вектора остаточной намагниченности внутри одного слоя, скорее всего, объясняется смещением и разворотом магнитных частиц в рыхлой массе пирокластического материала при отборе или транспортировке образцов, а также недостаточным количеством образцов из каждого слоя.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Анализ распределения палеомагнитных направлений

В результате проведенных исследований нами были получены 13 независимых направлений геомагнитного поля для голоценовых вулканитов Камчатки. Распределение средних направлений с доверительными интервалами показано на рис. 5а. Для большей части лавовых потоков круги доверия не перекрываются между собой, то есть запись вековых вариаций в этих объектах достаточно контрастна. Этот результат является благоприятным как для построения опорной кривой, так и для региональных геологических корреляций. Исключение составляют потоки Пийпа, Лепешка и группа “Псевдотуйла + О” (см. табл. 2), направления между которыми статистически неразличимы.

Для потоков Булочка, R, Незаметный, которые по тейфрохронологическим данным попадают в единый стратиграфический диапазон, мы получили значимо различающиеся палеомагнитные направления (рис. 5а). Это указывает на значительный временной промежуток, разделяющий излияния этих потоков. Следовательно, вековые вариации в данном случае можно использовать как дополнительный инструмент идентификации разновременных вулканических событий. На основании положения этих потоков в разрезах почвенно-пирокластического чехла можно восстановить последовательность их излияния (см. Введение), однако имеющихся на данный момент палеомагнитных и тейфрохронологических данных недостаточно для того, чтобы более точно определить возраст потоков.

Рассчитанные палеомагнитные направления для потоков Булочка (вулкан Ключевской) и Толбачик-1 (вулкан Толбачик) практически идентичны друг другу (угловая разница  $\gamma = 0.9^\circ$ ) и значимо отличаются от всех остальных полученных направлений. Этот факт свидетельствует в пользу близкого по времени излияния этих потоков. Тейфрохронологические данные не противоречат этой информации (оба лавовых потока перекрываются горизонтом SH<sub>3</sub> и подстилаются существенно более древними маркирующими прослоями), хотя и не предоставляют более точной возрастной привязки.

Относительно невысокая точность определения палеомагнитных направлений по пепловым горизонтам SH<sub>#5</sub> и SH<sub>5</sub> приводит к тому, что их круги доверия перекрываются с соседними на-

**Таблица 3.** Сравнение палеомагнитных направлений, полученных по лавовым потокам и пеплу SH<sub>5</sub> в настоящей работе, с данными [Кочегура и др., 1986] по ассоциированным шлакам и пеплам (см. табл. 2): результаты теста обращения.  $\gamma$  – угловое расстояние между палеонаправлениями;  $\gamma_{кр}$  – критический угол по [McFadden, McElhinny, 1990]

Объекты	$\gamma/\gamma_{кр}, ^\circ$
Шмалева	11.4/4.4
D	14.5/3.9
Булочка	5.0/5.2
Лепешка	2.0/2.1
SH <sub>5</sub>	7.5/4.7

правлениями (рис. 5а). Тем не менее, в целом эти определения соответствуют общему тренду изменения палеонаправлений, полученному по лавовым потокам. Так, среднее направление по горизонту SH<sub>5</sub> находится между направлениями подстилающего его потока Незаметный и перекрывающей группы потоков D, N1, N2 (далее – группа D); среднее направление по прослою SH<sub>#5</sub> с учетом доверительного интервала находится в области между направлениями потоков Толбачик-2 и Псевдотуйла + О.

#### Сравнение с результатами предшественников

Напрямую сопоставить полученные нами данные с магнитостратиграфической шкалой, составленной авторами работы [Кочегура и др., 1986], проблематично. Для сопоставления были выбраны фрагменты разреза (“палеомагнитные группы” по работе [Кочегура и др., 1986]), содержащие известные маркирующие горизонты SH<sub>2</sub>, SH<sub>3</sub>, KS<sub>1</sub>, SH<sub>5</sub>, при этом возраст этих прослоев был принят по работе [Ponomareva et al., 2015], а также прослой шлаков, ассоциированные с опробованными нами лавовыми потоками D, Шмалева, Булочка и Лепешка. На рис. 5б вынесены направления геомагнитного поля по этим слоям, опубликованные в работе [Кочегура и др., 1986] и наши данные.

В целом палеомагнитные направления пирокластических прослоев из работы [Кочегура и др., 1986] близки к основной массе направлений, полученных нами. Можно отметить идентичность направлений для прослоя SH<sub>2</sub> и перекрывающего его потока Толбачик-2, что может быть интерпретировано как признак близости по времени формирования этих объектов. Для сравнения направлений, полученных по лавовым потокам и ассоциированными с ними шлаками, а также направлений по прослою SH<sub>5</sub>, был проведен тест обращения [McFadden, McElhinny, 1990]. Результаты теста обращения показаны в табл. 3.

Для лавовых потоков Булочка и Лепешка и соответствующих им шлаковых горизонтов угловая разница  $\gamma$  не превышает критического угла  $\gamma_{кр}$ , то есть направления статистически неразличимы. Для остальных объектов: потоков D и Шмалева и прослоя тефры SH<sub>5</sub> – направления значительно отличаются от приведенных в работе [Кочегура и др., 1986]. Сравнивая результаты по лавам и шлакам, в данном случае мы считаем более предпочтительным использовать для характеристики геомагнитного поля в момент извержения палеомагнитные направления, полученные по лавам, поскольку: 1) для них полностью проведена процедура магнитной чистки и компонентного анализа; 2) они рассчитаны по нескольким сайтам, что снижает влияние возможных деформаций и локальных вариаций магнитного склонения; 3) для палеонаправлений по прослоям шлаков в большинстве случаев (кроме шлаков конуса D) в работе [Кочегура и др., 1986] приведено среднее направление вместе с близкими по направлениям горизонтам почвенно-пирокластического чехла и, следовательно, они представляют результат осреднения геомагнитного поля за некоторый промежуток времени. Что касается различия направлений по прослою SH<sub>5</sub>, то В.В. Кочегура с соавторами [1986] объясняют наблюдаемое в ряде случаев расхождение направлений одних и тех же горизонтов разной скоростью приобретения остаточной намагниченности и, следовательно, разной степенью метакронности.

#### Характерные черты кривой вековых вариаций

Полученные направления геомагнитного поля могут быть использованы как основа для опорной кривой вековых вариаций для позднего голоцена Камчатки (рис. 5). Траекторию изменения угловых элементов геомагнитного поля можно в известной степени условно, учитывая ограниченный набор данных, разделить на 3 участка:

1. Возрастной диапазон 0–764 л.н., соответствующий стратиграфическому интервалу выше маркирующего горизонта SH<sub>2</sub> (здесь и далее приведены календарные калиброванные возрасты от 1950 г. н. э. согласно [Ponomareva et al., 2015]). В этом диапазоне находятся 4 палеомагнитных направления, характеризующиеся постепенным изменением склонения от 10° до 0° и уменьшением наклонения от 72° до 67° с течением времени без резких отскоков. Направление, полученное по маркирующему горизонту SH<sub>2</sub> в работе [Кочегура и др., 1986], также соответствует этому тренду. При этом угловое расстояние  $\gamma$  между крайними направлениями потоков Пийпа и Толбачик-2 составляет 6.0°. Тем не менее на настоящий момент мы не имеем достаточно данных, чтобы сделать вывод о низкой амплитуде ве-



ковых вариаций в этом временном промежутке, поскольку нельзя исключить возможность значительных изменений угловых элементов геомагнитного поля, не записанных в наших ограниченных данных.

2. Диапазон 1363–1852 л. н., ограниченный маркирующими горизонтами SH<sub>3</sub> и SH<sub>5</sub>. В этот интервал попадают потоки Лагерный, Шмалева и группы D. Данный участок кривой характеризуется значительными изменениями склонения от 51.1° до 347°, при этом угловая разница между крайними направлениями потоков D и Лагерный составляет 23.8°. Нужно отметить, что в стратиграфическом интервале между горизонтами SH<sub>2</sub> и SH<sub>3</sub>, который охватывает около 600 лет (764–1363 л. н.), новые палеомагнитные определения отсутствуют.

3. Диапазон 1686–3959 л. н., соответствующий стратиграфическому интервалу между пеплами KS<sub>1</sub> и SHsp. Этот участок кривой включает все палеомагнитные направления, полученные по объектам древнее потоков группы D. Направления данного интервала характеризуются самым значительным разбросом по склонению (от 341.7° (Булочка) до 51.1° (группа D)) и наиболее низкими наклонениями (45.3° для потока R). В целом имеющиеся данные указывают на то, что основным трендом изменения направления геомагнитного поля в этот период было вращение по часовой стрелке.

Поскольку отдельные направления последнего интервала наиболее сильно отличаются от среднего значения (см. табл. 2), необходимы подтверждения того, что эти отклонения действительно отражают вариации геомагнитного поля, а не являются следствием дислокаций лавовых потоков после излияния. Свидетельства подобных дислокаций ранее были обнаружены для плейстоценовых мегаплагиофировых базальтов в районе пос. Ключи и Козыревск [Зубов, 2008]. Палеонаправления, наиболее отличающиеся от основной массы (потоки Булочка, R, группа D), получены в результате усреднения данных по нескольким пространственно удаленным обнажениям, а в случае группы D – по нескольким потокам и характеризуются высокой кучностью, что повышает достоверность определения. Это подтверждается и близостью палеомагнитных направлений потока Булочка и ассоциированных с ним шлаков одноименного конуса (см. выше). Несмотря на отличие направлений потоков группы D и шлаков конуса D, они достаточно близки и обладают северо-восточными склонениями (табл. 2, табл. 3). Все эти факты свидетельствуют в пользу возможности применения наших данных по вышеперечисленным потокам для анализа вековых вариаций.

## ВЫВОДЫ

На современном аппаратно-методическом уровне получены новые палеомагнитные определения по лавовым потокам и пирокластике Северной группы вулканов Камчатки, отвечающие 12 стратиграфическим уровням в течение последних 4000 лет. При этом величина доверительного интервала  $\alpha 95$  для направлений по лавовым потокам не превышает 3.5°. Данные результаты представляют основу опорной кривой вековых вариаций для позднего голоцена Камчатки.

Показана перспективность исследований вековых вариаций для региональной корреляции вулканических событий. На основании различия палеомагнитных направлений удалось установить, что потоки Булочка, R, Незаметный (вулкан Ключевской), соответствующие единому стратиграфическому диапазону по тефрохронологическим данным, были сформированы в разное время. Напротив, статистически незначимые различия палеомагнитных направлений указывают на синхронность формирования лавовых потоков O и Псевдотуйла; D, N1 и N2; Булочка и Толбачик-1 (последний – вулкан Толбачик, остальные – вулкан Ключевской).

Учитывая недостаток данных по вариациям геомагнитного поля в голоцене по северо-востоку Азии, полученные результаты крайне ценны для построения глобальных моделей геомагнитного поля. Тем не менее, сохраняется необходимость получения значительного объема надежных палеомагнитных данных для позднего голоцена как по Камчатке, так и по северо-восточной Азии в целом.

Работа выполнена при поддержке проекта 14.Z50.31.0017 Министерства образования и науки РФ, гранта РФФИ № 15-05-05505-А. Авторы благодарят В.Э. Павлова и И. Галле за плодотворные обсуждения в ходе исследований, И.Ю. Калашникова за участие в полевых работах, А.Ю. Казанского и Д.А. Козыреву за помощь в проведении петромагнитных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брайцева О.А., Егорова И.А., Несмачный И.А., Селягин О.Б., Сулержицкий Л.Д. Тефрохронологическое датирование лавовых комплексов и реконструкция истории формирования современного вулкана. Бюллетень вулканологических станций. 1978. № 55. С. 41–54.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н. Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов. Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. / Ред. Федотов С.А. М.: Наука. 1984. С. 177–209.
- Добрецова Ю.Г., Зубов А.Г., Кочегура В.В. Стратиграфическая корреляция голоценовых отложений Камчатки по палеомагнитным вариациям. Методы палеомагнетиз-

ма в решении геологических задач (на примере Дальнего Востока): материалы 1 Дальневосточного семинара по палеомагнетизму и магнетизму горных пород. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1982. С. 189–193.

Зубов А.Г. Предварительные результаты палеомагнитного изучения мегаплагифоровых лав щитового вулкана Плоских сопков (Ключевская группа вулканов, Камчатка). Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2008. С. 90–99.

Кочегура В.В., Зубов А.Г., Брайцева О.А. Магнитостратиграфия голоценовых почвенно-пирокластических образований Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 3–17.

Павлов В.Э., Флут Ф., Веселовский Р.В., Фетисова А.М., Латышев А.В. Вековые вариации геомагнитного поля и вулканические пульсы в пермо-триасовых траппах Норильского и Маймеча-Котуйского районов // Физика Земли. 2011. № 5. С. 35–50.

Пономарева В.В., Чурикова Т.Г., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Певзнер М.М., Сулержицкий Л.Д. Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Том II. Новейший вулканизм северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М.: изд-во ИГЕМ. 2008. С. 19–40.

Auer S., Bindeman I., Wallace P., Ponomareva V., Portnyagin M. The origin of hydrous, high- $\delta^{18}\text{O}$  voluminous volcanism: diverse oxygen isotope values and high magmatic water contents within the volcanic record of Kluchevskoy volcano, Kamchatka, Russia. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2008. doi 10.1007/s00410-008-0330-0

Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melek-estsev I.V., Bailey J. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Research*. 1997. V. 47. № 2. P. 125–139.

Chadima M., Hrouda F. Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer // *Travaux Géophysiques*. 2006. V. 27. P. 20–21.

Churikova T.G., Gordeychik B.N., Edwards B.R., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012–2013 eruption // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2015. doi 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.016

Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1977. V. 13. P. 260–267.

Donadini F., Korte M., Constable C.G. Geomagnetic field for 0–3 ka: 1. New data sets for global modeling // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009. 10 (6), Q06007.

Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre, Geol. Surv. Can., 1994. P. 16.

Fisher R. Dispersion on a Sphere. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A // Mathematical and Physical Sciences*. 1953. V. 217(1130). P. 295–305.

Gallet Y., Genevey A., Le Goff M. Three millennia of directional variation of the Earth's magnetic field in western Europe as revealed by archeological artefacts // *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 2002. V. 131. P. 81–89.

Genevey A., Gallet Y., Boudon G. Secular variation study from non-welded pyroclastic deposits from Montagne Pelee volcano, Martinique (West Indies) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 201. P. 369–382.

Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 2000. A. V. 358. P. 957–990.

Kirschvink J.L. The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1980. V. 62. P. 699–718.

Korte M., Constable C., Donadini F., Holme R. Reconstructing the Holocene geomagnetic field // *Earth and Planetary Science Letters*. 2011. V. 312. P. 497–505.

McFadden P.L., McElhinny M.W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism // *Geophys. J. Int.* 1990. V. 103. P. 725–729.

Nilsson A., Holme R., Korte M., Suttie N., Hill M. Reconstructing Holocene geomagnetic field variation: new methods, models and implications // *Geophysical J. International*. 2014. V. 198. № 1. P. 229–248.

Ozerov A.Y. The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions // *J. Volcanology and Geothermal Research*. 2000. V. 95. P. 65–79.

Ponomareva V.V., Kyle P.R., Pevzner M.M., Sulerzhitsky L.D., Hartman M. Holocene eruptive history of Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula / Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M., Izbekov P., Lees J. (eds) *Volcanism and subduction: the Kamchatka region*. American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union, Washington. 2007. V. 172. P. 263–282.

Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle P., Derkachev A. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: Chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // *International J. Earth Science*. 2015. 1046 1459–1482. doi 10.1007/s00531-015-1156-4

Roperch P., Chauvin A., Le Pennec J.-L., Lara L.E. Paleomagnetic study of juvenile basaltic-andesite clasts from Andean pyroclastic density current deposits // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2014. V. 227. P. 20–29.

Thellier E. Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1981. V. 24. P. 89–132.

Valet J.-P., Fournier A., Courtillot V., Herrero-Bervera E. Dynamical similarity of geomagnetic field reversals. *Nature*. 2012. doi 10.1038/nature11491

Zijderveld 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.