

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.633-645

ОШИБКИ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАГНИТНОГО КОМПАСА И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

И.Е. Лебедев, В.Э. Павлов, П.А. Минаев

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,
г. Москва, 119234, Российская Федерация*

Аннотация

На примере палеомагнитного исследования вулканических пород Охотско-Чукотского вулканического пояса определены масштаб и характер распределения ошибок ориентации образцов, связанных с использованием магнитного компаса, а также влияние этих ошибок на точность определения средних направлений по сайтам и по региону в целом. Выполнена оценка влияния этих ошибок на положение итогового палеомагнитного полюса и на дисперсию виртуальных геомагнитных полюсов, используемую обычно как меру амплитуды палеогеомагнитных вариаций. Рассмотрены существующие альтернативные (т. е. не использующие магнитный компас) методы ориентировки палеомагнитных образцов, их преимущества и недостатки. Предложена новая методика ориентации палеомагнитных образцов, предполагающая использование теодолита, снабженного лазерным указателем. Эта методика свободна от некоторых критических недостатков ранее использовавшихся альтернативных методов.

Ключевые слова: солнечный компас, магнитный компас, ошибки ориентировки палеомагнитных образцов, альтернативные методы ориентировки.

1. Введение

В геологии и геофизике много областей, в которых необходимо определять ориентацию различных геологических объектов, образцов, текстур, трещин и др. Особое значение этот вопрос имеет для палеомагнитных исследований, где от точности ориентации палеомагнитных образцов непосредственно зависят безошибочность и надежность конечного результата.

В большинстве случаев для ориентации палеомагнитных образцов используют магнитный (горно-геологический) компас, однако при отборе сильномагнитных пород, образующих зачастую сильные локальные магнитные аномалии, замеры, выполненные магнитным компасом, могут давать искаженные результаты.

Масштабы этих искажений оцениваются различными исследователями от незначительных до совершенно неприемлемых (например, [1]). При этом в мировой литературе приводятся только единичные оценки, основанные на реальных экспериментальных результатах [1, 2]. Соответствующие публикации в отечественной литературе нам не известны.

В настоящей работе на примере исследования преимущественно базальтовых вулканических потоков Охотско-Чукотского вулканического пояса представлены данные, которые позволяют оценить величину ошибок ориентации палеомагнитных образцов, связанных с использованием магнитного компаса, показан характер их распределения, а также рассмотрен вопрос о влиянии этих ошибок на средние палеомагнитные направления, определенные в масштабах потоков (сайтов) и региона. Полученные результаты подчеркивают важность использования альтернативных методов ориентации палеомагнитных проб, отбираемых из сильномагнитных горных пород. В статье рассматриваются существующие альтернативные методы, их достоинства и недостатки и предлагается новый метод, лишенный, в какой-то степени, этих недостатков.

2. Объект исследований, отбор и ориентация образцов

Объект исследований расположен на территории Западной Чукотки в непосредственной близости от месторождения Купол. Опробованные породы участвуют в строении Охотско-Чукотского вулканического пояса – одной из крупнейших на планете окраинно-континентальных вулканогенных провинций. Для палеомагнитных исследований отбирали полого лежащие вулканические породы преимущественно среднего-основного состава: лавы базальтов, андезибазальтов и андезитов возрастом 88–84 млн лет [3]. Такие породы, как правило, сильномагнитны, поэтому при отборе применяли обычную процедуру контроля их влияния на стрелку магнитного компаса, состоявшую в визуальном контроле положения стрелки компаса при приближении последнего к месту отбора и при удалении от него. Геологическая позиция изученных разрезов, объединенных в обсуждаемый в данной работе объект «Купол», детально описана в наших предыдущих работах [3, 4].

Для проверки надежности ориентировок, измеренных магнитным компасом, в ходе полевых работ 2021 г. замеры ориентировок для всех образцов производили также альтернативными методами (по солнцу и при помощи теодолита (подробнее – в разделе 4.2)). Отбор производили по сайтовой методике, описанной в многочисленных классических работах, например, [5]. Всего из 79 сайтов были отобраны 1 024 индивидуальных образца (по 10–15 образцов из каждого сайта).

В замеры, выполненные магнитным компасом, вносили поправки за склонение (-4.2°), которые определяли по 13-й модели IGRF [6].

Лабораторные палеомагнитные исследования проводили в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН на оборудовании ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» [7] по классической методике [5]. При расчете разброса виртуальных геомагнитных полюсов Sb учитывали группирование вулканических потоков по вулканическим пульсам [8]. Вслед за [9] расчеты Sb приводили с разными критериями отбраковки данных: угол среза (cutoff) определяли либо по итеративной процедуре Вандамма [10], либо принимали равным 45° ; данные по сайтам отбрасывали, если их кучность (K) составляла менее 50 или 100.

3. Величина и характер распределения ошибок ориентации, связанных с использованием магнитного компаса

3.1. Ошибка по склонению. При прямом сравнении азимутов падения площадок, используемых для ориентации образцов, измеренных магнитным компасом и альтернативными методами, только для половины образцов отклонение составляет менее 6° (59% образцов), причем в интервал $\pm 2^\circ$ попадает всего 23% образцов (рис. 1). 24% образцов отклоняется от истинного в пределах от 6° до 10° и еще 7% – в пределах от 10° до 18° . Для оставшихся 10% образцов ошибка определения азимута составляет более чем 18° .

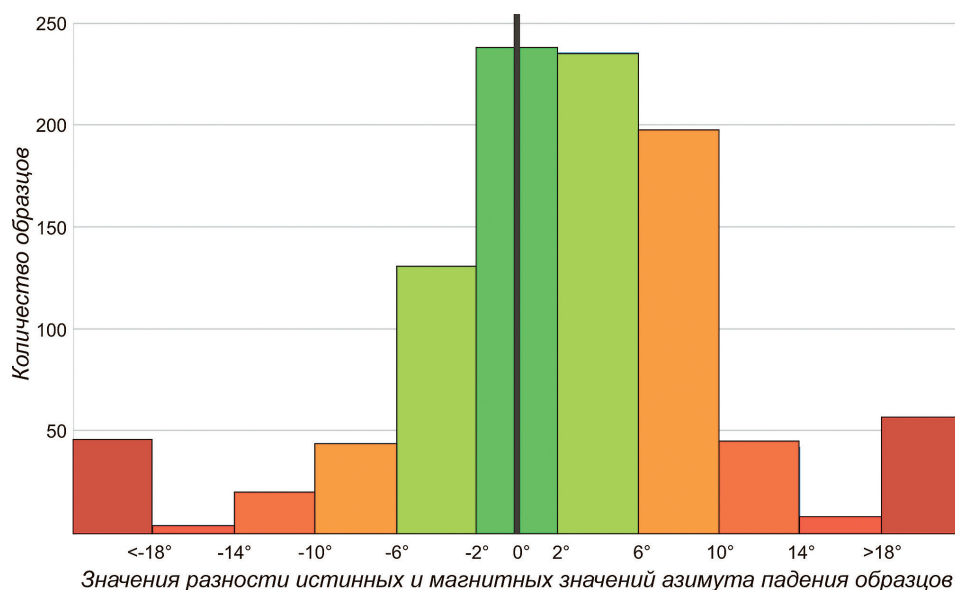


Рис. 1. Гистограмма разности истинных значений азимута, полученных магнитным компасом и альтернативными методами. Цвет на гистограмме отображает величину отклонения данных (зеленый – минимальное, оранжевый – среднее, красный – максимальное)

Полученное распределение отклонений магнитных значений азимута от альтернативных методов имеет среднее значение равное -1.1° и стандартное отклонение $\sigma = 17.2^\circ$. Довольно большое значение стандартного отклонения обусловлено наличием некоторого числа образцов (5–6% от всей коллекции), ориентировки которых определены с очень большой (несколько десятков градусов) ошибкой. Если отбросить такие образцы, стандартное отклонение существенно уменьшается до величин $6-8^\circ$ и меньше.

Можно предположить, что ошибка определения азимута магнитным компасом внутри сайта носит случайный характер. Если это так, то ошибки внутри сайта должны усредняться и средние по сайтам значения азимута не должны сильно отличаться от истинных (т. е. определенных альтернативными методами). Однако, это не так. Полученные данные показывают, что средние склонения по сайтам, определенные магнитным компасом, заметно отличаются от истинных. Для 67% сайтов эта ошибка лежит внутри интервала $\pm 6^\circ$, при этом в интервал $\pm 2^\circ$ попадает только 22% образцов. Для 24% образцов отклонения составляют $6-10^\circ$, азимуты оставшихся 9% образцов отклоняются бо-

лее чем на 10° . Среднее арифметическое теперь составляет 0.3° , а стандартное отклонение $\sigma = 13.8^\circ$.

3.2. Ошибка по направлениям и ошибка определения палеомагнитного полюса. Ошибка в определении азимута падения при ориентировке образца отражается только на его палеомагнитном склонении. В случае высоких наклонений ошибка определения склонения с увеличением наклонения все меньше влияет на точность определения палеомагнитного направления. Благодаря работам [4, 11] известно, что рассматриваемые породы формировались на очень высоких широтах, следовательно, можно ожидать, что ошибки определения азимута не будут существенно сказываться на средних направлениях как на уровне сайтов, так и на уровне региона.

На рис. 2 показано распределение угловых расстояний между средними по сайтам, определенными с использованием магнитного компаса и с помощью альтернативных методов. Как мы и предполагали, ошибки определения палеомагнитных направлений на уровне средних направлений по сайтам не так драматичны, как в случае палеомагнитных склонений.

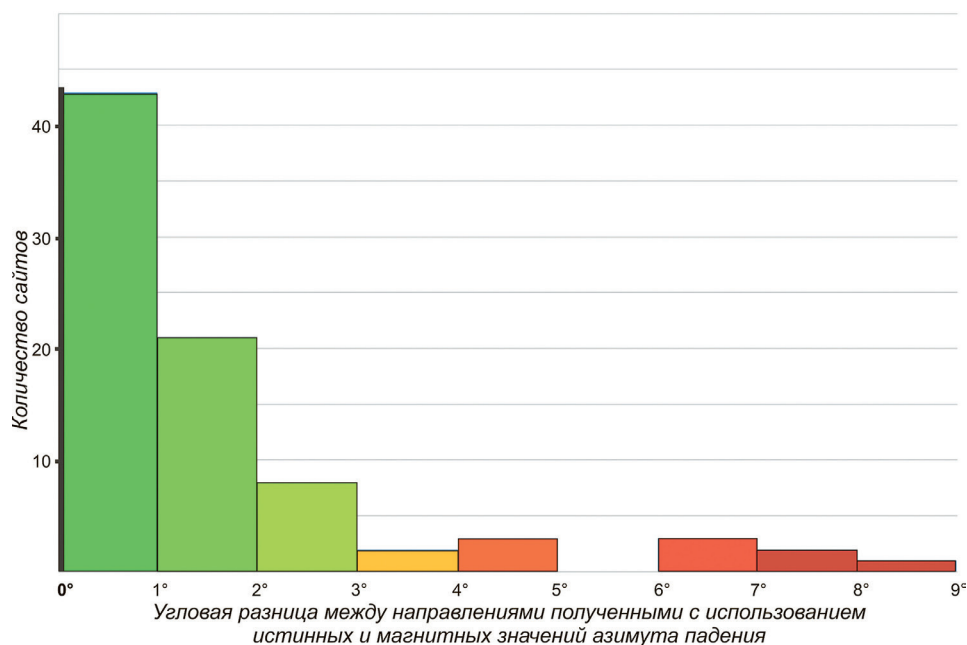


Рис. 2. Гистограмма угловых расстояний между средними направлениями по сайтам, рассчитанными с использованием склонений по магнитному компасу (с поправкой IGRF) и альтернативными методами. Цвет на гистограмме отображает величину угловой разницы (зеленый – минимальная, оранжевый – средняя, красный – максимальная)

Для 87% сайтов эти ошибки не превышают 3° , причем для половины всех сайтов они меньше 1° . Кучности средних направлений по сайтам и радиусы соответствующих кругов доверия (α_{95}), определенные по данным измерений магнитным компасом и альтернативными методами, оказались практически идентичными: $K = 160$, $K = 162$ и $\alpha_{95} = 4.6^\circ$, 4.7° . Получив подобные результаты, мы, практически, не ожидали сильного отклонения в среднем направлении по всему объекту, которое в итоге составило менее половины градуса. Эта разница, после

пересчета в палеомагнитный полюс, на фоне ошибки его определения около 5° , естественно, является ничтожно малой и не влияет на конечный результат.

3.3. Ошибка дисперсии амплитуды вековых вариаций. Различия значений параметра Sb (амплитуды палеовековых вариаций геомагнитного поля), рассчитанных по данным, полученным с помощью магнитного компаса и по результатам альтернативных методов ориентировки образцов, оказались в пределах ошибки определения (табл. 1). Максимальная разница в значениях наблюдается при наиболее строгих параметрах сортировки данных – при использовании только сайтов с кучностью более 100 и с учетом группирования потоков по вулканическим пульсам.

Табл. 1.

Сравнение величины амплитуды вековых вариаций (Sb)

Угол среза, по Вандамму [10]						
	N альт./маг.	n альт./маг.	Sb альт. – Sb маг.	$Sb-$ альт./маг.	$Sb+$ альт./маг.	Угол среза
<i>с группированием вулканических пульсов</i>						
все	62/60	61/59	–0.2	–2.1/–2.3	2.3/2.1	42.3
$K > 50$	59/57	58/57	–0.5	–2/–2.8	2/2	41.9
$K > 100$	43/42	43/42	–1.7	–2.3/–2.8	2.4/2.8	43
<i>без группирования вулканических пульсов</i>						
все	79/79	78/78	0.1	–2/–2	1.8/2	40.2
$K > 50$	74/73	73/72	0	–1.9/–1.9	2/2.1	39.8
$K > 100$	57/57	57/56	–0.5	–2.3/–2.3	2.1/2.2	40.7
Фиксированный угол среза 45°						
<i>с группированием вулканических пульсов</i>						
все	62/60	62/60	–0.2	–2.3/–2.6	2.1/2.4	45
$K > 50$	59/57	59/57	–0.5	–2.3/–2.4	2.2/2.4	45
$K > 100$	43/42	43/42	–1.7	–2.5/–3	2.5/2.7	45
<i>без группирования вулканических пульсов</i>						
все	79/79	79/79	0.1	–2/–2.1	2.3/2.2	45
$K > 50$	74/73	74/73	0	–2.2/–2.4	2/2.1	45
$K > 100$	57/57	57/57	–1.2	–2.3/–2.6	2.1/2.4	45

Примечание: N альт./маг. – всего сайтов использованных для расчета после применения фильтров по величине кучности с использованием ориентировки альтернативными методами/магнитным компасом; n альт./маг. – количество сайтов после применения угла отсечения (cutoff) по альтернативным/магнитным данным; Sb альт. – Sb маг. – разность между значениями величины амплитуды вековых вариаций (Sb) рассчитанных по альтернативным/магнитным данным; $Sb-$ альт./маг. и $Sb+$ альт./маг. – нижняя и верхняя границы доверительных интервалов полученных по альтернативным/магнитным данным

Таким образом, представленные данные по Чукотке показывают, что даже значительная ошибка в определении азимутов падения образцов не приводит к значимому отклонению итогового результата, т. е. практически не искажает ни координаты среднего палеомагнитного полюса, ни значения амплитуды палеове-

ковых вариаций. Мы полагаем, что этот результат может быть объяснен высокими палеонаклонениями (около 80°), свойственными данному конкретному объекту, а также весьма значительной статистикой (относительно большим числом изученных сайтов), позволившей существенно усреднить ошибки определения средних палеомагнитных направлений по сайтам.

Поскольку подобные основные породы могут формироваться и на более низких широтах, влияние ошибки определения склонения на конечное направление может быть значительно более сильным, чем в рассмотренном нами примере. Поэтому в общем случае при отборе сильномагнитных пород желательно использование альтернативных методов ориентировки образцов. Существующим вариантам методик альтернативного ориентирования образцов посвящен следующий раздел.

4. Обзор альтернативных методов ориентировки образцов

4.1. Существующие методы. Во избежание проблем, связанных с использованием магнитного компаса, широко используется методика ориентировки палеомагнитных образцов по солнцу [5]. Она позволяет рассчитать истинный азимут падения по углу тени от солнца, траектория движения которого известна в любой момент времени для любой точки земного шара. Методика предполагает измерение солнечной тени от гномона (вертикального тонкого стержня, установленного по центру лимба) на лимбе компаса. Полученный замер, наряду с известными координатами и временем отбора, позволяет с высокой точностью ориентировать палеомагнитные образцы.

Относительная простота, достаточность наличия из дополнительного оборудования только гномона и высокая точность делают этот метод наиболее популярным. Однако методика, очевидно, требует наличия ясной погоды во время измерения ориентировки образца, что накладывает заметные ограничения на возможности ее применения.

Для преодоления этих проблем были разработаны другие методики, в частности техника обратного визирования (back-sighting), визирование образца на отдаленный объект и техника с использованием высокоточного GPS позиционирования [2, 5, 12]. Рассмотрим кратко каждую из этих методик.

Техника обратного визирования основана на проверке измерений компаса на ориенторе вторым компасом, расположенным на удалении от отбираемого обнажения. Она подразумевает выставление параллельно обоих компасов по визирам и сравнение полученных результатов измерений. При очевидной простоте недостатками метода являются невысокая точность ($\sim 5^\circ$ по [5]) и учет влияния только локальных аномалий, связанных исключительно с конкретным обнажением. Визирование на отдаленную точку подразумевает отсчет угла между направлением на образец и направлением на хорошо обозримую точку с известными координатами. Как и в случае обратного визирования, метод прост, но у него есть некоторые недостатки. Первый – это частое отсутствие хорошо видимой, отдаленной и однозначно определяемой опорной точки. И второй, наиболее важный, – это неудобство визирования на объект в случае отбора из субвертикального обнажения.

Наиболее современные методики ориентирования палеомагнитных образцов подразумевают использование GPS позиционирования. Одна из таких ме-

тодик требует наличия весьма сложного специального устройства [1, 12]. Оно представляет собой прямолинейную штангу длиной 1 м (базовая линия), на концах которой установлены высокоточные приемники GPS, которые по разнице координат позволяют определить ориентировку этой линии. На базовом основании (штанге) установлен лазер, который направляется на отражающую призму, установленную на ориентирующем устройстве. По отражению от этой призмы отсчитывается угол между известной базовой линией и азимутом падения образца. Имея эти данные, можно рассчитать истинный азимут с достаточно высокой точностью. Однако у этой методики имеются также некоторые недостатки: помимо весьма высокой цены высокоточных GPS приемников и хрупкости такого ориентирующего устройства (особенно в полевых условиях), она требует заметного времени на стабилизацию ориентировки базовой линии (до получаса) и, соответственно, на измерение ориентировки самих образцов.

Другой вариант подобной методики представлен в работе [2]. В этом случае используется стандартный корабельный GPS компас, смонтированный на устройство, ориентирующее образцы. GPS компас включает в себя пару высокоточных спутниковых приемников в компактном корпусе. Ориентировка устройства происходит по разности полученных координат. Главное преимущество данной модификации в относительной легкости GPS компаса, который весит около килограмма. Однако, как отмечают сами авторы [2], устройство имеет не всегда приемлемую точность. Так, если на открытой местности полученные значения оказались неотличимы от солнечных измерений, то в лесу или в условиях городской местности точность оказалась неудовлетворительной. Еще одним недостатком, на наш взгляд, представляется длительность каждого измерения – около 5 мин [2] на каждый образец, что существенно замедляет работу в полевых условиях.

Отметим, что высокоточные GPS приемники, необходимые для реализации вышеописанных методик, весьма энергозависимы и требуют наличия источника электричества, что не всегда легко обеспечить в отдаленных уголках нашей страны.

Большие проблемы возникают при отборе ориентированных образцов при работе в подземных горных выработках, где использование магнитного компаса затруднено наличием большого количества магнитного оборудования (крепи, механизмы, электрические коммуникации и др.), а применение солнечного компаса невозможно. Для этого случая сотрудниками Палеомагнитной лаборатории ИФЗ РАН был разработан метод, в котором ориентировку образца определяли с опорой на известные маркшейдерские метки [13].

4.2. Ориентировка палеомагнитных образцов с помощью теодолита с лазером. Чтобы не зависеть от погодных условий (наличия солнца) или весьма сложных, хрупких и дорогостоящих устройств (высокоточный GPS), нами была разработана новая методика ориентации палеомагнитных образцов при помощи теодолита с вмонтированным в него лазером. Базовые принципы данной методики схожи с техникой с использованием GPS [2, 12] или маркшейдерских меток [13]. Для ее использования необходим обыкновенный теодолит, который позволяет отсчитывать углы в горизонтальной плоскости, и лазер, направление луча которого совпадает с направлением оси окуляра теодолита (рис. 3). Простота и дешевизна подобной конструкции является ее определенным преимуществом.

Также нельзя не отметить относительную экспрессность метода: необходимо потратить лишь 5–10 мин на установку самого теодолита, после чего замеры производятся с той же производительностью, что при использовании солнечного компаса. Основными недостатками методики являются тяжеловесность конструкции (стандартная тренога с теодолитом весят около 12 кг) и необходимость наличия прямой видимости в любом направлении хотя бы на 500 м (подробнее – в следующем абзаце).

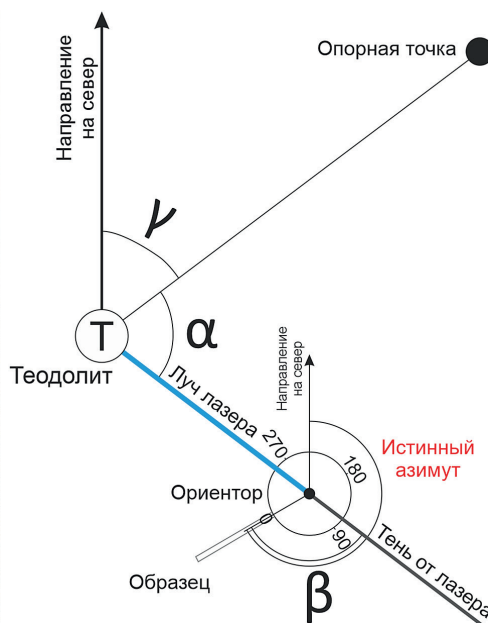


Рис. 3. Слева – фотография теодолита с лазером и стандартного ориентора. Справа – схема отбора керна (образца) при помощи теодолита с лазером и специального ориентирующего устройства (ориентора)

Согласно предлагаемой методике для расчета истинного азимута (ИА) падения площадки, по которой ориентируется образец (или падения керна), необходимо определить три угла (рис. 3). Первый угол – гамма (γ) – является азимутом от теодолита на какую-либо опорную точку. Данный угол определяется по разности координат между известными координатами теодолита и опорной точки. Эти координаты могут определяться в поле стандартным GPS приемником. Точность определения угла гамма (γ) непосредственно зависит от точности определения координат теодолита и опорной точки, а также от удаленности опорной точки от теодолита. Наиболее подходящие опорные точки – это триангуляционные пункты, базовый лагерь и т. п. Однако в случае отсутствия таковых, для достижения точности порядка 1° достаточно установить вешку, на которую будет производиться визирование, в опорной точке, расположенной на расстоянии около 500 м от теодолита. Второй угол, необходимый для расчета истинного азимута падения керна, – альфа (α) – измеряется теодолитом между направлением на опорную точку и центром стандартного ориентирующего устройства (направлением на гномон). Третий угол – бета (β) – это угол тени, создаваемой лазером на лимбе ориентирующего устройства от гномона.

При наличии всех выше указанных углов расчет ИА для каждого образца сводится к достаточно простой геометрической задаче, решение которой описывается формулами 1–3:

$$\text{Если, то } \alpha + \gamma + \beta < 360, \text{ то ИА} = \alpha + \gamma + \beta; \quad (1)$$

$$\text{Если, то } 360 < \alpha + \gamma + \beta < 720, \text{ то ИА} = \alpha + \gamma + \beta - 360; \quad (2)$$

$$\text{Если, то } \alpha + \gamma + \beta > 720, \text{ то ИА} = \alpha + \gamma + \beta - 720; \quad (3)$$

Для проверки новой методики 107 образцов было ориентировано одновременно по вышеописанной методике и при помощи солнечного компаса. Разность измерений по солнцу и при помощи теодолита в пределах $\pm 3^\circ$ оказалась у 85% измерений, а в пределах $\pm 5^\circ$ еще у 11%. На большую разность приходится всего 4% измерений, которые скорее всего связаны со всевозможными ошибками первичных данных, полученных в полевых условиях. Среднее значение отклонения замеров, сделанных солнечным компасом и теодолитом, составляет при этом 0.3° , при стандартной ошибке 2.3° . Это сравнение указывает на высокую сходимость результатов измерений двумя методами, что позволяет использовать в дальнейшем ориентировку с помощью теодолита с лазером как альтернативу солнечному компасу.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают существующее мнение и отдельные имеющиеся данные о том, что использование магнитного компаса при палеомагнитном опробовании сильномагнитных пород может привести к существенным ошибкам ориентировки образцов. На примере исследования вулканических пород Охотско-Чукотского вулканического пояса определен масштаб этих ошибок, характер их распределения, а также влияние на средние палеомагнитные направления, осредненные по сайтам и по региону. Рассмотрены альтернативные методы ориентировки палеомагнитных образцов, предложен новый метод, частично лишенный недостатков ранее использовавшихся альтернативных методов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-17-000112, <https://rscf.ru/project/23-17-00112/>.

Литература

1. Cromwell G., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A.A.P., Pedersen R.-B. In search of long-term hemispheric asymmetry in the geomagnetic field: Results from high northern latitudes // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2013. V. 14, No 8. P. 3234–3249. <https://doi.org/10.1002/ggge.20174>.
2. Fukuma K., Muramatsu T. Orienting paleomagnetic drill cores using a portable GPS compass // *Earth, Planets Space.* 2022. V. 74, No 1. Art. 136. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01699-y>.
3. Тихомиров П.Л., Лебедев И.Е., Люилье Ф., Павлов В.Э. Стратиграфия комплексов Охотско-Чукотского пояса в верховьях р. Малый Анюй (район месторождения Купол): данные U–Pb- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* 2021. Т. 501, № 2. С. 192–198. <https://doi.org/10.31857/S2686739721120148>.
4. Лебедев И.Е., Бобровникова Е.М., Тихомиров П.Л., Эйд Б., Люилье Ф., Павлов В.Э. Амплитуда вековых геомагнитных вариаций в позднем мелу по результатам пале-

- омагнитных исследований вулканитов Охотско-Чукотского пояса верхнего течения реки малый Анюй (западная Чукотка) // *Физика Земли*. 2022. № 2. С. 41–59. <https://doi.org/10.31857/S0002333722020041>.
5. *Tauxe L.* Essentials of Paleomagnetism. Berkeley: Univ. of Calif. Press, 2010. xvi, 489 p. <https://doi.org/10.1525/9780520946378>.
 6. *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., L  ger J.-M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Mande   M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., T  ffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T.* International Geomagnetic Reference Field: The 12th generation // *Earth, Planets Space*. 2015. V. 67, No 1. Art. 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.
 7. *Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В.* Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13, № 2. Ст. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.
 8. *Chenet A.-L., Fluteau F., Courtillot V., G  rard M., Subbarao K.V.* Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2008. V. 113, No B4. Art. B04101. <https://doi.org/10.1029/2006JB004635>.
 9. *Dobrovine P.V., Veikkolainen T., Pesonen L.J., Piispa E., Ots S., Smirnov A.V., Kulakov E.V., Biggin A.J.* Latitude dependence of geomagnetic paleosecular variation and its relation to the frequency of magnetic reversals: Observations from the Cretaceous and Jurassic // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2019. V. 20, No 3. P. 1240–1279. <https://doi.org/10.1029/2018GC007863>.
 10. *Vandamme D.* A new method to determine paleosecular variation // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1994. V. 85, No 1–2. P. 131–142. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90012-4).
 11. *Stone D.B., Layer P.W., Raikevich M.I.* Age and paleomagnetism of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt (OCVB) near Lake El'gygytyn, Chukotka, Russia // *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.* 2009. V. 4. P. 243–260. <https://doi.org/10.5194/smssp-4-243-2009>.
 12. *Lawrence K.P., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A., McIntosh W., Johnson C.L.* Paleomagnetic field properties at high southern latitude // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2009. V. 10, No 1. Art. Q01005. <https://doi.org/10.1029/2008GC002072>.
 13. *Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E.* Correlation of the Permian-Triassic ore-bearing intrusions of the Norilsk Region with the volcanic sequence of the Siberian Traps based on the paleomagnetic data // *Econ. Geol.* 2020. V. 115, No 6. P. 1173–1193. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4746>.

Поступила в редакцию 10.10.2023

Принята к публикации 15.11.2023

Лебедев Иван Евгеньевич, научный сотрудник лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: lebedev232@ya.ru

Павлов Владимир Эммануилович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: pavlov.ifz@gmail.com

Минаев Павел Александрович, главный инженер лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: ps1100@yandex.ru

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 633–645

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.633-645

**Orientation Errors of Paleomagnetic Samples When Using a Magnetic Compass
and Possible Ways to Overcome Them**

I.E. Lebedev, V.E. Pavlov**, P.A. Minaev****

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 123242 Russia*

E-mail: *lebedev232@ya.ru, **pavlov.ifz@gmail.com, ***ps1100@yandex.ru

Received October 10, 2023; Accepted November 15, 2023

Abstract

A paleomagnetic study of volcanic rocks of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt was performed to identify the scale and distribution pattern of orientation errors associated with the use of a magnetic compass, as well as to find how they influence the accuracy of calculated mean directions at both site and regional levels. The impact of these errors on the position of the final paleomagnetic pole and the dispersion of virtual geomagnetic poles, which is a common measure of the amplitude of paleosecular geomagnetic variations, was assessed. The alternative (non-magnetic compass) methods for orienting paleomagnetic samples were analyzed. Their advantages and disadvantages were outlined. A new method for orienting paleomagnetic samples using a theodolite equipped with a laser pointer was proposed. This method has a distinct advantage over previous alternatives as it is not limited by certain critical factors.

Keywords: solar compass, magnetic compass, orientation errors of paleomagnetic samples, alternative orientation methods

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-17-000112, <https://rscf.ru/project/23-17-00112/>).

Figure Captions

Fig. 1. Histogram of the difference between the true azimuth values obtained with the use of a magnetic compass and by alternative methods. Deviation of the data is shown in color (green – minimum, orange – mean, red – maximum).

Fig. 2. Histogram of the angular distances between the mean directions of the studied sites calculated using magnetic declinations (with IGRF correction) and alternative methods. The degree of the angular difference is shown in color (green – minimum, orange – average, red – maximum).

Fig. 3. Theodolite with a laser pointer and a standard orienting fixture (on the left). Core (sample) collection using a theodolite equipped with laser and an orienter (on the right).

References

1. Cromwell G., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A.A.P., Pedersen R.-B. In search of long-term hemispheric asymmetry in the geomagnetic field: Results from high northern latitudes. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2013, vol. 14, no. 8, pp. 3234–3249. <https://doi.org/10.1002/ggge.20174>.
2. Fukuma K., Muramatsu T. Orienting paleomagnetic drill cores using a portable GPS compass. *Earth, Planets Space*, 2022, vol. 74, no. 1, art. 136. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01699-y>.
3. Tikhomirov P.L., Lebedev I.E., Lhuillier, F.J.L., Pavlov V.E. Stratigraphy of the Okhotsk–Chukotka belt in the headwaters of the Malyy Anyui River (the vicinity of Kupol deposit): U–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age data. *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 501, pt. 2, pp. 1059–1064. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2112014X>.
4. Lebedev I.E., Bobrovnikova E.M., Tikhomirov P.L., Eid B., Lhuillier F., Pavlov V.E. Amplitude of secular geomagnetic variation in Late Cretaceous based on paleomagnetic studies of the Okhotsk–Chukotka volcanic belt from upper reaches of Malyy Anyui River, West Chukotka. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 185–202. <https://doi.org/10.1134/S1069351322020045>.
5. Tauxe L. *Essentials of Paleomagnetism*. Berkeley, Univ. of Calif. Press, 2010. xvi, 489 p. <https://doi.org/10.1525/9780520946378>.
6. Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., L  ger J.-M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Mande  a M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., T  ffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T. International Geomagnetic Reference Field: The 12th generation. *Earth, Planets Space*, 2015, vol. 67, no. 1, art. 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.
7. Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud’ko D.V., Chistyakova A.V. Shared Research Facilities “Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. *Geodin. Tektonofiz.*, 2022, vol. 13, no. 2, art. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>. (In Russian)
8. Chenet A.-L., Fluteau F., Courtillot V., G  rard M., Subbarao K.V. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2008, vol. 113, no. B4, art. B04101. <https://doi.org/10.1029/2006JB004635>.
9. Doubrovine P.V., Veikkolainen T., Pesonen L.J., Piispa E., Ots S., Smirnov A.V., Kulakov E.V., Biggin A.J. Latitude dependence of geomagnetic paleosecular variation and its relation to the frequency of magnetic reversals: Observations from the Cretaceous and Jurassic. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 1240–1279. <https://doi.org/10.1029/2018GC007863>.
10. Vandamme D. A new method to determine paleosecular variation. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1994, vol. 85, nos. 1–2, pp. 131–142. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90012-4).
11. Stone D.B., Layer P.W., Raikevich M.I. Age and paleomagnetism of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt (OCVB) near Lake El’gygytyn, Chukotka, Russia. *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.*, 2009, vol. 4, pp. 243–260. <https://doi.org/10.5194/smssps-4-243-2009>.

12. Lawrence K.P., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A., McIntosh W., Johnson C.L. Paleomagnetic field properties at high southern latitude. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2009, vol. 10, no. 1, art. Q01005. <https://doi.org/10.1029/2008GC002072>.
13. Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E. Correlation of the Permian-Triassic ore-bearing intrusions of the Norilsk Region with the volcanic sequence of the Siberian Traps based on the paleomagnetic data. *Econ. Geol.*, 2020, vol. 115, no. 6, pp. 1173–1193. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4746>.

Для цитирования: Лебедев И.Е., Павлов В.Э., Минаев П.А. Ошибки ориентирования палеомагнитных образцов при использовании магнитного компаса и возможные пути их преодоления // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 633–645. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.633-645>.

For citation: Lebedev I.E., Pavlov V.E., Minaev P.A. Orientation errors of paleomagnetic samples when using a magnetic compass and possible ways to overcome them. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 633–645. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.633-645>. (In Russian)