

PMTOOLS: НОВОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

© 2023 г. И. В. Ефремов^{1, 2}, Р. В. Веселовский^{1, 2}, *

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: roman.veselovskiy@ya.ru

Поступила в редакцию 11.09.2022 г.

После доработки 21.12.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

В этой работе мы представляем PMTools (<https://pmtools.ru>) – новое кросс-платформенное web-приложение для статистической обработки и визуализации данных при проведении палеомагнитных исследований, имеющее открытый исходный код. PMTools позволяет импортировать результаты магнитных чисток из наиболее распространенных форматов хранения палеомагнитных данных, выполнять компонентный анализ, вычислять средние палеомагнитные направления и виртуальные геомагнитные (палеомагнитные) полюсы. В PMTools также имеется возможность проведения палеомагнитных тестов: складки, конгломератов и обращения. Важной особенностью PMTools является экспорт полученных результатов в наиболее распространенные форматы хранения палеомагнитных данных, а также в виде векторной графики, максимально адаптированной под прямое использование в публикациях и презентациях. Наборы вычисленных палеомагнитных полюсов могут быть экспортированы в форматах программ GMap и GPlates, что позволяет исследователю без посредления приступить к палеотектонической интерпретации полученных им палеомагнитных данных. Интуитивно понятный русско- и англоязычный интерфейс, использование настраиваемых пользователем “горячих клавиш”, широкий спектр выбора отображаемых на графиках элементов – все это делает PMTools привлекательным современным инструментом обработки и анализа результатов палеомагнитных исследований.

Ключевые слова: программа, приложение, палеомагнитология, палеомагнетизм, статистика палеомагнитных данных, визуализация палеомагнитных данных, компонентный анализ, виртуальные геомагнитные полюсы, палеомагнитные полюсы.

DOI: 10.31857/S0002333723050022, **EDN:** VZFWUP

ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных исследований в области палеомагнетизма, особенно имеющих палеотектоническое приращение, проводится по алгоритму, ключевыми этапами которого являются: (1) отбор палеомагнитных коллекций, (2) лабораторные магнитные чистки, (3) компонентный анализ результатов магнитных чисток, (4) оценка возраста компонент естественной остаточной намагниченности с использованием полевых тестов, (5) вычисление палеомагнитных полюсов. В связи с широким распространением персональных компьютеров в 1990-х годах, этапы (3)–(5) выполняются с использованием специализированных программ, призванных проводить анализ и интерпретацию магнитных чисток максимально быстро, удобно и эффективно.

Однако в отечественном палеомагнитном сообществе нет современной программы или при-

ложения для выполнения полного цикла статистической обработки результатов лабораторных магнитных чисток – рутинной и, одновременно, ключевой задачи любого палеомагнитного исследования. Например, палеомагнитологи лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН используют для обработки палеомагнитных данных несколько программ, такие как PMGSC [Enkin, 2004] или предшествующий ей пакет программ для операционной системы MS DOS [Enkin, 1994], а также Remasoft [Chadima, Hroudá, 2006]. Перечисленные программы были написаны 15–30 лет назад, и их использование сложно назвать комфортным для современного исследователя. Это связано, в том числе, с тем, что каждая программа использует свой несовместимый с другими формат хранения данных, а переход между форматами в большинстве случаев не предусмотрен. Это не только создает очевидные сложности при использовании

разных программ для анализа одного набора данных, но также усложняет процесс представления результатов палеомагнитного анализа при оформлении статей и презентаций в виде таблиц.

Также отметим, что на данный момент все программные продукты, используемые отечественными исследователями для анализа результатов магнитных чисток, позволяют экспортировать графический материал в растровом или векторном форматах. Однако получившийся результат нередко требует длительной доработки в стороннем графическом редакторе до конечного вида, пригодного для использования в научных публикациях и докладах. Существенной проблемой также являются технические требования используемых в настоящее время в области палеомагнетизма программных продуктов: практически все из них привязаны к той или иной операционной системе, а порой и к определенной версии конкретной операционной системы. Например, идеальная во всех отношениях программа PaleoMac [Cogne, 2003] для своего запуска требует установки эмулятора определенной и крайне устаревшей версии операционной системы Mac OS, что, к сожалению, практически сводит на нет возможность использования этой программы. Запуск программ, написанных под MS DOS [Enkin, 1994], также связан с техническими трудностями и сложно реализуем для рядового пользователя ПК.

В связи с этим, целью нашей работы являлось создание такого программного продукта для анализа палеомагнитных данных, который удовлетворял бы следующим основным требованиям:

- доступность с любого устройства под управлением любой операционной системы;
- интуитивно понятный интерфейс;
- широкий функционал, не уступающий существующим программам, а дополняющий их;
- поддержка наиболее распространенных базовых форматов хранения палеомагнитных данных как в плане импорта, так и в плане экспорта;
- соответствие экспортируемых графических данных общепринятым стандартам для использования в публикациях и презентациях;
- расширенные возможности по управлению данными, включающие в себя широкое взаимодействие с табличными данными и их графическим представлением, а также возможность управлять программой посредством “горячих клавиш”.

В этой статье мы приводим краткое описание приложения PMTools и его ключевых возможностей. Более подробная документация доступна на сайте <https://pmtools.ru> в разделе “Описание”. Необходимо отметить, что дополнительный стимул для создания PMTools нам дал портал Paleo-

magnetism.org [Koymans et al., 2016]. Этот современный интернет-ресурс представляет собой очень интересный и мощный инструмент работы с палеомагнитными данными, однако все наши попытки наладить комфортное обращение с ним при выполнении компонентного анализа результатов магнитных чисток и последующей работе с палеомагнитными направлениями не увенчались успехом.

PMTOOLS: ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Программный продукт (далее — приложение) PMTools написан на языке TypeScript с использованием библиотеки React. Библиотека Redux используется для хранения данных в рамках сессии, а библиотека MaterialUI — в качестве источника шаблонов элементов интерфейса. Важно отметить, что все графики в PMTools написаны И.В. Ефремовым без использования каких-либо библиотек и внешних модулей. Для построения графиков используется SVG-код, динамически генерируемый в ходе работы программы. Это, в частности, позволило настраивать отображение графиков, взаимодействие с ними и их экспорт в исключительно удобном для исследователей в области палеомагнетизма формате.

Архитектура PMTools модульная, код PMTools — открытый, распространяется под лицензией MIT и находится в репозитории на сервисе GitHub по следующему адресу: https://github.com/I194/PMTools_2.0. Код имеет детальную внутреннюю документацию и полностью типизирован. Все эти шаги и усилия были проделаны в первую очередь для того, чтобы PMTools и возможные на ее основе программные решения могли развиваться в будущем самостоятельно силами заинтересованного в этом общества. Актуальная версия PMTools находится по ссылке <https://pmtools.ru/>.

Исключительно важной особенностью PMTools является практически полное отсутствие каких-либо технических или аппаратных требований к ее работе. На сегодняшний день программа реализована как *web*-приложение и для работы с ней необходим лишь современный браузер. При использовании браузера Google Chrome возможна установка локальной версии приложения, с которым можно работать на устройствах без доступа к сети Интернет. Обновление локально установленного приложения будет производиться автоматически при первом подключении устройства к сети Интернет. Наиболее комфортным будет использование программы на персональных компьютерах с разрешением экрана не ниже 1920 × 1080. Авторы также тестировали приложение с использованием планшетов под управлением различных опера-

ционных систем (Android, iOS и др.), на которых приложение PMTools было полностью работоспособно.

Ниже нами будут использоваться сокращенные наименования следующих форматов хранения данных:

- `pmd` — текстовые файлы с расширением `.pmd`, которые используются для хранения результатов магнитных чисток программами, написанными Рэндольфом Энкиным [Enkin, 1994; 2004]: `kirsch.exe` для MS DOS и `PMGSC` для MS Windows;

- `squid` — текстовые файлы, используемые для хранения результатов магнитных чисток программой `Paleomag2020` [Kirschvink et al., 2008], используемой в качестве интерфейса для управления криогенным магнитометром SRM 755 (2G Enterprises, США) в ЦКП ИФЗ РАН [Veselovskiy et al., 2022]. Эти файлы изначально не имеют расширения, но для корректной работы с PMTools им надо присвоить расширение `.squid`;

- `dir` и `pmm` — текстовые файлы с расширением `.dir` и `.pmm`, соответственно, которые используются для хранения результатов компонентного анализа программами, написанными Р. Энкиным; `pmstat.exe` для MS DOS и `PMGSC` для MS Windows;

- `rs3` — текстовые файлы с расширением `.rs3`, которые используются для хранения результатов магнитных чисток и компонентного анализа в программе `Remasoft` [Chadima, Hroudá, 2006];

- `csv` и `xlsx` — стандартные форматы хранения табличных данных, просмотр и редактирование которых возможно, например, в программе MS Excel;

- `svg` — язык разметки масштабируемой векторной графики, предназначен для описания двумерной векторной и смешанной векторно-растровой графики в формате XML. Может быть импортирован в такие векторные редакторы, как CorelDRAW, Inkscape.

В PMTools использован стандартный математический аппарат для работы с векторами на сфере и их проекциями, описанный в классических публикациях по палеомагнитологии [Храмов и др., 1982; Collinson, 2013; Tauxe, 2010]. Интерфейс PMTools доступен как на русском, так и на английском языках, переключение между которыми выполняется непосредственно в окне программы.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАГНИТНЫХ ЧИСТОК

PMTools предлагает пользователю два модуля работы с исходными данными, принципиальная

блок-схема которых представлена на рис. 1. Первый модуль называется “РСА Магнитные чистки” и предназначен для работы с результатами магнитных чисток — их визуализации и проведения компонентного анализа (*principal component analysis*, PCA [Kirschvink, 1980]) остаточной намагниченности образцов. Взаимодействие пользователя с модулем начинается с импорта результатов лабораторных магнитных чисток из файлов нескольких форматов (`.pmd`, `.squid`, `.rs3`, а также их структурных аналогов в форматах `.csv` и `.xlsx`), для визуализации которых используются диаграмма Зийдерверльда, стереограмма и график размагничивания.

Импорт данных в PMTools осуществляется либо выбором нужных файлов через диалоговое окно “Загрузить файл”, либо перетаскиванием файлов поверх страницы приложения. Список загруженных файлов отображается на панели инструментов в раскрывающемся списке “Текущий файл”, где возможно выборочное удаление файлов из памяти программы. Быстрое переключение между загруженными в программу файлами может осуществляться нажатием клавиш `Shift + [→]` или `Shift + [←]`.

Общий вид модуля “РСА Магнитные чистки” показан на рис. 2. Страница поделена на две части. В верхней левой части находится таблица с данными о текущем образце (рис. 2а), в которой содержатся номер образца, элементы залегания, объем. Эти данные редактируемые и изменения в них влияют на отображаемую графику и табличные данные, но не затрагивают исходный файл; чтобы сохранить внесенные изменения, надо выполнить экспорт обновленных данных из таблицы (см. ниже). Результаты магнитной чистки текущего открытого файла приведены в таблице в левой нижней половине интерфейса страницы (рис. 2в). Эта таблица не подлежит редактированию, однако данные в ней могут быть отфильтрованы (*Filters*), столбцы ее могут быть скрыты (*Columns*), а вертикальный размер строк может быть изменен (*Density*). В одном ряду с элементами управления этими параметрами располагается кнопка экспорта (`Export`) всех данных текущего открытого файла. Данная модель взаимодействия с таблицей в PMTools будет встречаться и далее в других окнах и модулях, а различия будут состоять исключительно в структуре экспортируемых данных — для каждого вида данных она своя. В частности, данные текущего файла на странице “Магнитные чистки” могут быть экспортированы в форматах `pmd`, `csv` и `xlsx`.

Результаты магнитных чисток визуализированы на правой половине страницы блока “РСА Магнитные чистки” (рис. 2д). Здесь они пред-

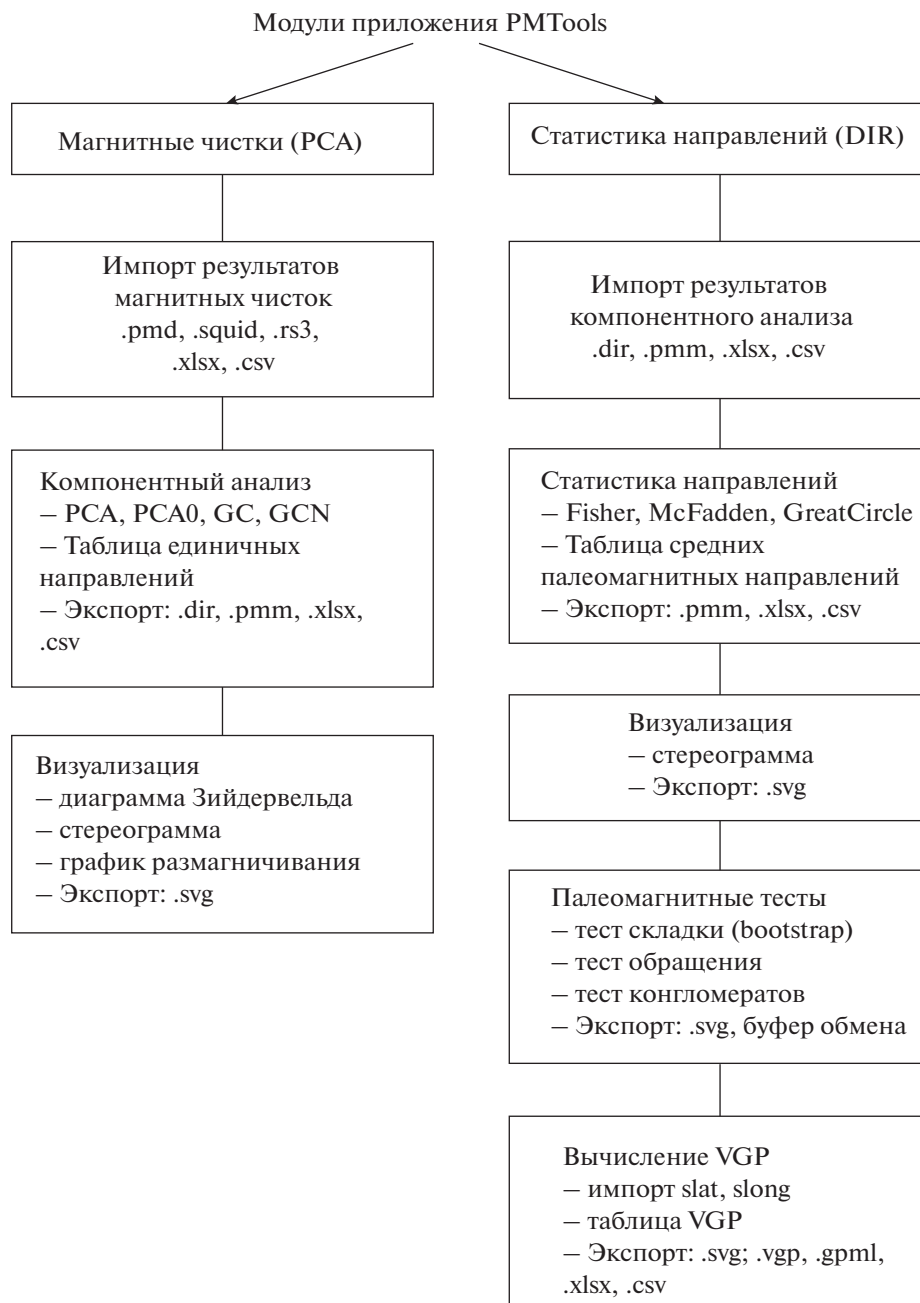


Рис. 1. Принципиальная блок-схема функционала приложения PMTools.

ставлены на диаграмме Зийдервельда, стереограмме и графике размагничивания. Внешний вид каждого графика может быть настроен в соответствии с требованиями пользователя нажатием правой клавиши мыши на поле графика и выбором необходимых опций. Например, пользователь имеет возможность выбора отображения подписей точек – будут это их порядковые номера и/или названия шагов магнитной чистки. На диаграмме Зийдервельда имеются элементы

управления, с помощью которых пользователь может изменять проекцию (W-Up, N-Up, N-N) и сбрасывать примененное масштабирование (*Reset zoom&pan*).

Графическое отображение данных необходимо для проведения компонентного анализа. Все статистические операции над результатами магнитных чисток, позволяющие вычислить направление выделенной компоненты остаточной на-

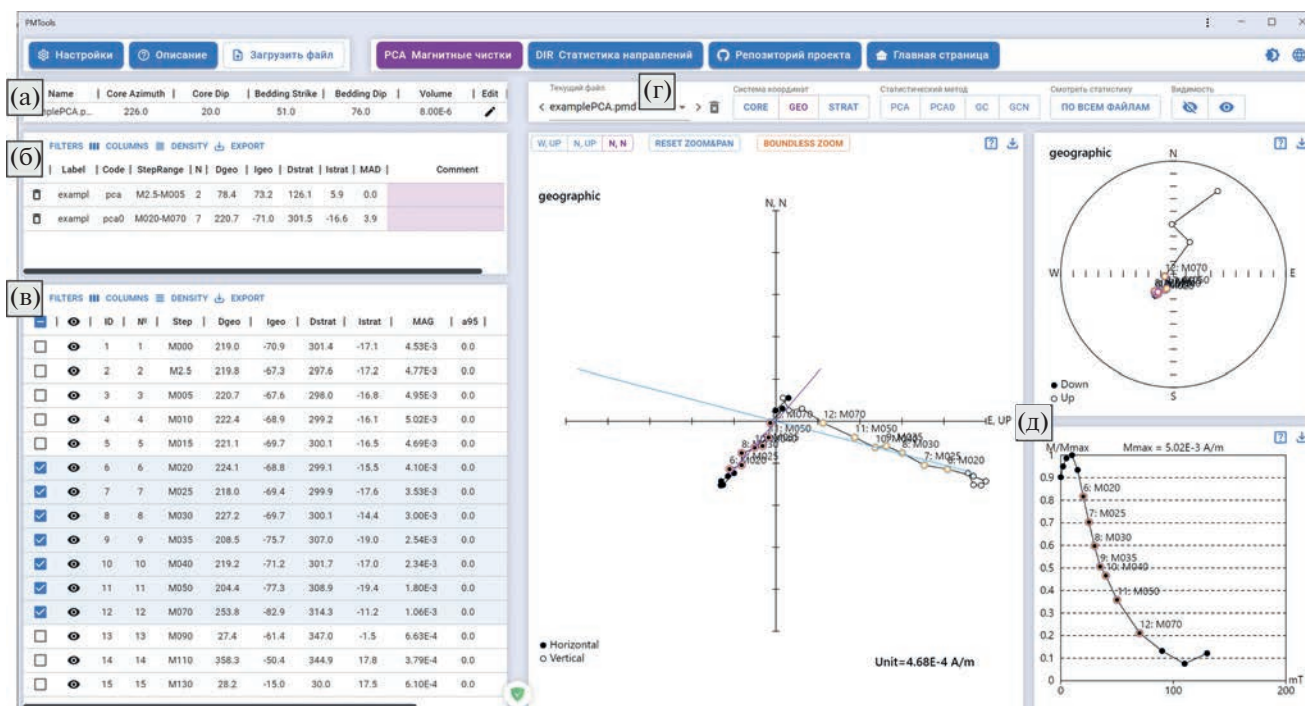


Рис. 2. Общий вид блока “Магнитные чистки” программы PMTools: (а) — таблица с исходными параметрами образца — имя, элементы залегания, объем; (б) — таблица с результатами компонентного анализа для данного файла/образца; (в) — таблица с результатами магнитной чистки образца; (г) — меню выбора системы координат и метода вычисления направления компоненты намагниченности; (д) — графическое отображение результатов магнитной чистки: диаграмм Зийдерверльда, стереограмма и график размагничивания.

магнитности и соответствующие статистические параметры, на странице “PCA Магнитные чистки” представлены в панели инструментов, находящейся над вышеописанными графиками (рис. 2г). Здесь слева направо располагаются следующие элементы:

(i) меню выбора системы координат: образца (CORE), географическая (GEO) и стратиграфическая (STRAT);

(ii) меню выбора применяемого к текущим данным алгоритма вычисления направления компоненты намагниченности: классический метод главных компонент (PCA, горячая клавиша D), метод главных компонент с привязкой к началу координат (PCA0, горячая клавиша O), метод пересечения кругов перемангничивания (GC, горячая клавиша G) и метод пересечения кругов перемангничивания с нормированием длин исходных векторов (GCN, горячая клавиша L);

(iii) кнопка отображения таблицы с результатами компонентного анализа всех открытых файлов “ПО ВСЕМ ФАЙЛАМ”;

(iv) кнопки скрытия и отображения шагов магнитной чистки для текущего файла.

Для выполнения компонентного анализа необходимо выбрать точки, отвечающие положению конца вектора остаточной намагниченности на конкретном шаге магнитной чистки. Выбор точек (шагов) магнитной чистки может быть осуществлен тремя способами: (1) выбор через окно ввода номеров точек, (2) через таблицу с исходными данными либо (3) интерактивно, путем захвата требуемых шагов в область, вызываемую зажатием левой клавиши мыши на области построения графика. Результаты применения любой из функций статистической обработки результатов магнитной чистки для открытого в данный момент файла отображаются в таблице, расположенной в середине левой половины страницы (рис. 2б).

Вычисленные направления компонент остаточной намагниченности для всех проанализированных файлов отображаются в сводной таблице, доступной из панели управления по нажатию на кнопку “ПО ВСЕМ ФАЙЛАМ”. В верхней части таблицы (рис. 3) имеется поле ввода имени файла, который будет создан при экспорте таблицы. Экспорт результатов компонентного анализа может быть произведен в форматах .dig и .pmm, а также .csv и .xlsx с аналогичной структурой.

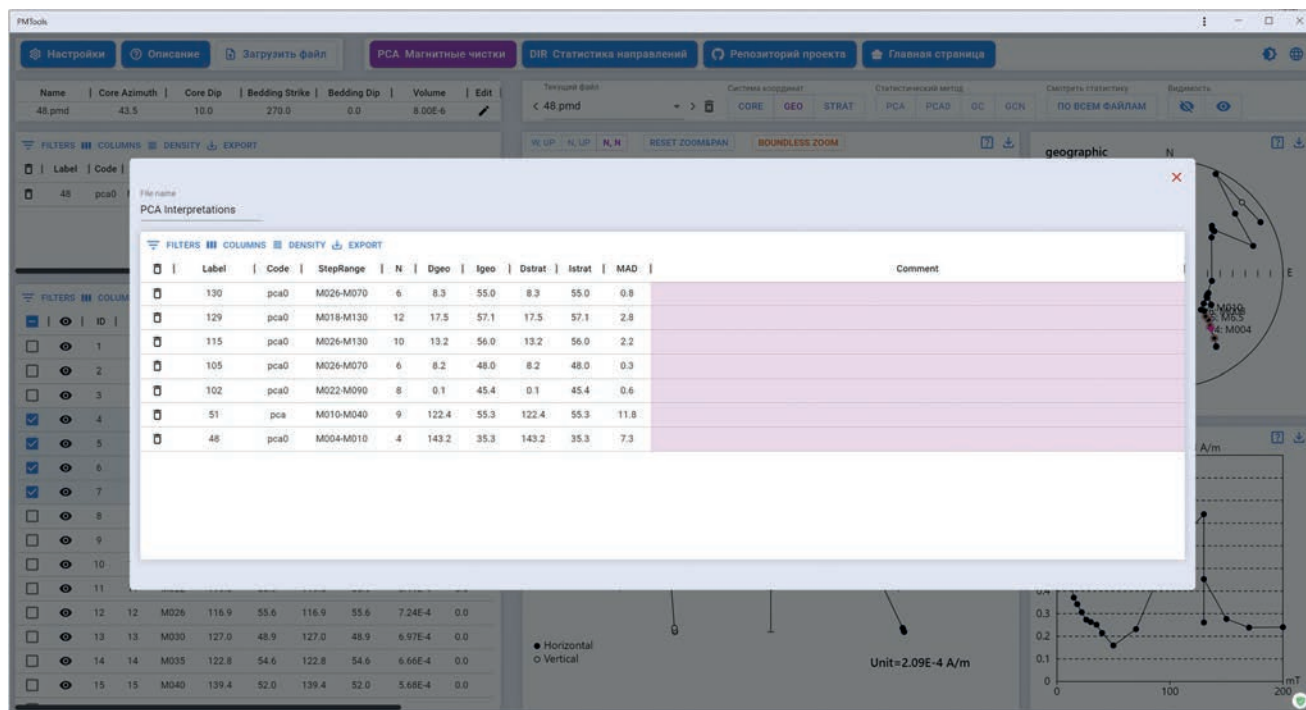


Рис. 3. Таблица с результатами компонентного анализа: единичные палеомагнитные направления в географической и стратиграфической системах координат и их максимальные угловые отклонения (MAD).

СТАТИСТИКА НАПРАВЛЕНИЙ

Второй модуль приложения PMTools (рис. 1) используется для операций с результатами компонентного анализа, в частности для вычисления средних направлений компонент намагниченности и палеомагнитных полюсов, выполнения полевых тестов и теста обращения. Соответствующая страница называется “DIR Статистика направлений” (рис. 4).

Работа с модулем “DIR Статистика направлений” начинается с импорта результатов компонентного анализа, который доступен из форматов .dir и .rmm, а также их структурных аналогов в форматах .csv и .xlsx. Импортированные единичные палеомагнитные направления отображаются в табличном виде в левой части страницы (рис. 4в) и на стереограмме справа (рис. 4г). С данными возможны следующие ключевые операции:

(i) удаление выбранных направлений из выборки нажатием кнопки “Видимость” или горячей клавиши *H*;

(ii) обращение выбранных направлений нажатием кнопки “Обращение” или горячей клавиши *R*;

(iii) вычисление среднего палеомагнитного направления для выбранных единичных направлений несколькими методами: (1) по Фишеру (FISHER, горячая клавиша *F*), (2) модифицированным методом Фишера для учета данных, пред-

ставленных в виде нормалей к кругам перемagnetничивания (MCFADDEN, горячая клавиша *M*), (3) методом пересечения кругов перемagnetничивания (GC, горячая клавиша *G*);

(iv) экспорт вычисленных средних направлений в файлы формата .rmm или его структурные аналоги .csv и .xlsx;

(v) центрирование выборки векторов относительно их среднего на стереограмме (кнопка “CENTER BY MEAN”);

(vi) использование метода селекции единичных направлений “cutoff 45” [Koymans et al., 2016].

Функция “ПОСТРОИТЬ VGP” позволяет вычислять виртуальные геомагнитные полюсы (VGP) или палеомагнитные полюсы для каждого палеомагнитного направления, отображенного на стереограмме. При нажатии на кнопку “ПОСТРОИТЬ VGP” появляется диалоговое окно, в котором пользователю предлагается ввести ручную или импортировать из Excel-файла координаты точек отбора образцов (сайтов). Если предполагается экспорт полученных VGP в формат программы GPlates [Muller et al., 2018], то для каждого палеомагнитного направления можно также заполнить поля *age* и *plate_id*. При нажатии на кнопку “Рассчитать VGP” появится таблица с координатами VGP и статистическими параметрами (полуоси овала 95%-доверия *dp/dm*, а также

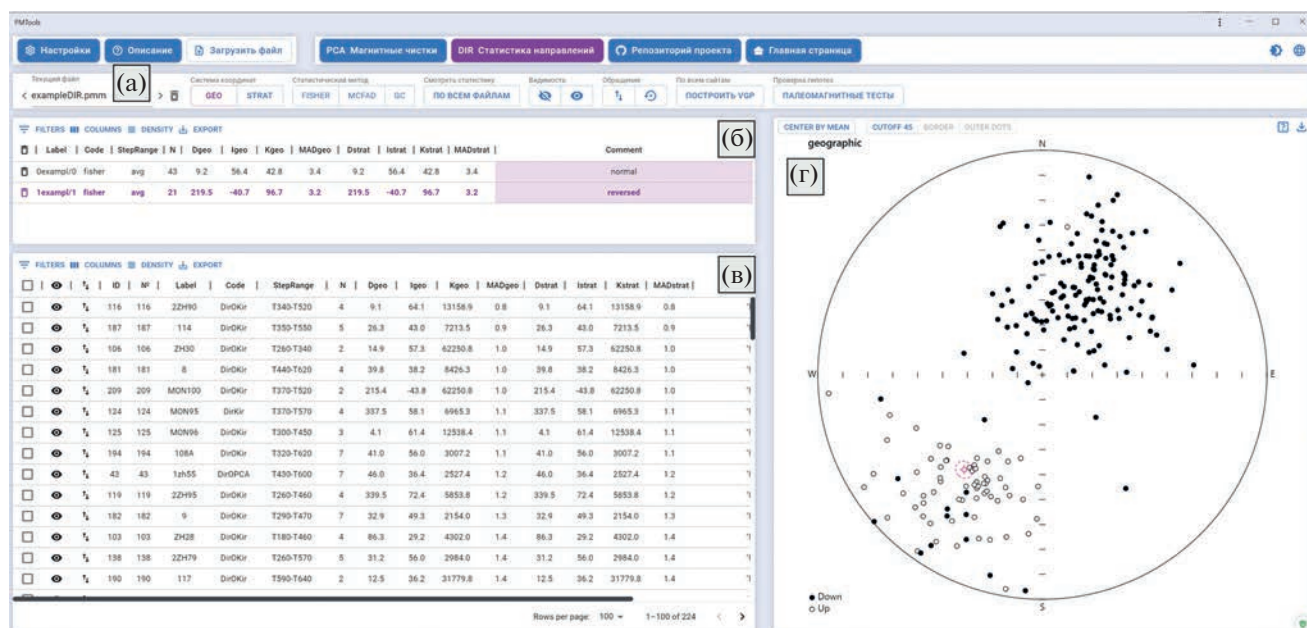


Рис. 4. Общий вид блока “Статистика направлений” приложения PMTools: (a) — меню выбора системы координат и метода вычисления среднего направления компоненты намагниченности, вызова сводной таблицы средних направлений, а также функций вычисления VGP и выполнения палеомагнитных тестов; (б) — таблица со средними направлениями компонент намагниченности для данного файла; (в) — таблица с результатами магнитной чистки образца; (г) — визуализация выборки единичных векторов в таблице (в) на стереограмме.

значение палеошироты *paleolat*). Табличные данные отображаются на стереограмме и могут быть экспортированы в форматах программ GMap (.vgp) [Torsvik and Smethurst, 1998] и GPlates (.gpml), широко используемых для палеотектонической интерпретации результатов палеомагнитных исследований, а также в форматах .csv или .xlsx.

В разделе меню “Проверка гипотез”, при нажатии на кнопку “Палеомагнитные тесты”, пользователь имеет возможность применить к загруженным данным следующие тесты:

(1) тест складки (bootstrap-версия по алгоритму [Tauхе et al., 2016]) по всем имеющимся данным из текущего открытого файла;

(2) тесты обращения в вариантах [McFadden, McElhinny, 1990; Tauхе, 2010], выполняемые автоматически по всем имеющимся данным из текущего открытого файла;

(3) тест обращения по работе [McFadden, McElhinny, 1990] в ручном варианте ввода данных;

(4) тест конгломератов в варианте [Watson, 1956] (выполняется автоматически по всем имеющимся данным из текущего открытого файла).

Графические результаты примененных палеомагнитных тестов могут быть экспортированы в векторном формате, а текстовая информация скопирована в буфер обмена.

Таким образом, оба рассмотренных модуля программы — “PCA Магнитные чистки” и “DIR

Статистика направлений” — позволяют пользователю с максимальным комфортом пройти весь путь от интерпретации результатов магнитных чисток до вычисления палеомагнитных полюсов и их экспорта для дальнейшей работы в специализированных программах. Важно отметить, что поддержка программой PMTools импорта и экспорта палеомагнитных данных в наиболее распространенных форматах позволяет работать с обоими блоками как последовательно, так и раздельно, что оставляет пользователю возможность выбора наиболее удобной для него рабочей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье кратко представлено новое приложение, названное нами PMTools и предназначенное для первичной интерпретации и визуализации палеомагнитных данных — результатов магнитных чисток и компонентного анализа естественной остаточной намагниченности горных пород. Мы постарались реализовать в PMTools не только классический набор палеомагнитных операций, но и максимально дружелюбный для отечественных исследователей пользовательский опыт, накопленный за многие годы работы с различными программными продуктами в области палеомагнетизма. Полная документация по приложению, равно как и актуальная его версия, до-

ступна на сайте <https://pmtools.ru>. Отличительными особенностями PMTools являются:

- кросс-платформенность и возможность работы не только на ПК, но и на планшетах, смартфонах и т.п., в том числе без доступа к сети Интернет;
- поддержка наиболее распространенных базовых форматов хранения палеомагнитных данных, как в плане импорта, так и в плане экспорта;
- возможность управлять приложением посредством настраиваемых пользователем “горячих клавиш”;
- экспорт графики в виде, максимально готовом для использования в публикациях и презентациях;
- открытый исходный код и интерфейс на двух языках — русском и английском.

Приложение PMTools было протестировано несколькими пользователями, однако, как и в любой программе, в нем возможны ошибки, поэтому все замечания и предложения мы просим присылать авторам статьи. Дальнейшее развитие PMTools будет заключаться в совершенствовании интерфейса и функционала приложения.

Приложение PMTools имеет свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669034 от 14 октября 2022 г.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Программа PMTools написана при поддержке гранта РНФ №22-27-00597.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны И.Е. Лебедеву, А.М. Пасенко и В.Ю. Водовозову за неоценимую помощь при тестировании приложения PMTools и ценные советы в ходе разработки, а также двум рецензентам за доброжелательные отзывы на рукопись статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др. Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 312 с.
- Chadima M., Hrouda F. Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer // *Travaux Géophysiques*. 2006. V. 27. P. 20–21.
- Cogne J.P. PaleoMac: a Macintosh™ application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2003. V. 4. № 1. <https://doi.org/10.1029/2001GC000227>
- Collinson D. (ed.). *Methods in rock magnetism and palaeomagnetism: techniques and instrumentation*. Springer Science & Business Media. 2013. 503 p.
- Kirschvink J. L. The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data // *Geophysical Journal International*. 1980. V. 62(3). P. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>
- Kirschvink J.L., Kopp R.E., Raub T.D., Baumgartner C.T., Holt J.W. Rapid, precise, and high-sensitivity acquisition of paleomagnetic and rock-magnetic data: Development of a low-noise automatic sample changing system for superconducting rock magnetometers // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9. P. Q05Y01. <https://doi.org/10.1029/2007GC001856>
- Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Geological Survey of Canada. 1994. 16 p.
- Enkin R.J. Paleomagnetism data analysis: Version 4.2. Geological Survey of Canada. 2004.
- McFadden P.L., McElhinny M.W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism // *Geophys. J. Int.* 1990. V. 103. № 3. P. 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>
- Koymans M.R., Langereis C.G., Pastor-Galán D., van Hinsbergen D.J.J. Paleomagnetism.org: An online multi-platform open source environment for paleomagnetic data analysis // *Computers & Geosciences*. 2016. V. 93. P. 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.007>
- McFadden P.L., McElhinny M.W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism // *Geophysical J. International*. 1990. V. 103. № 3. P. 725–729.
- Muller R.D., Cannon J., Qin X., Watson R.J., Gurnis M., Williams S. et al. GPlates: building a virtual Earth through deep time // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018. V. 19. № 7. P. 2243–2261. <https://doi.org/10.1029/2018GC007584>
- Tauxe L. *Essentials of paleomagnetism*. University of California Press. 2010.
- Tauxe L., Shaar R., Jonestrask L., Swanson-Hysell N.L., Minnett R., Koppers A.A.P., Constable C.G., Jarboe N., Gaastra K., Fairchild L. PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetism Information Consortium (MagIC) Database // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2016. V. 17. № 6. P. 2450–2463. <https://doi.org/10.1002/2016GC006307>
- Torsvik T., Smethurst M. GMAP v.32: Geographic mapping and palaeoreconstruction package. Norges geologiske undersøkelse. 1998. 65 p.
- 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 RAS // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. V. 13(2). P. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>
- Watson G. S. A test for randomness of directions // *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1956. V. 7. № 4. P. 160–161.

PMTOOLS: New Application for Paleomagnetic Data Analysis

I. V. Efremov^{a, b} and R. V. Veselovskiy^{a, b, *}

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia*

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

**e-mail: roman.veselovskiy@ya.ru*

Abstract—This paper introduces PMTools (<https://pmtools.ru>), a novel cross-platform open-source web application designed for the analysis of paleomagnetic data. Our software offers a user-friendly interface and supports the most commonly used data formats in paleomagnetism, including .pmd, .dir, .pmm, .rs3, .squid, .vgp, and .gpml. It encompasses all the necessary functionalities for conducting principal component analysis of natural remanent magnetization and computing mean paleomagnetic directions along with corresponding virtual geomagnetic (paleomagnetic) poles. PMTools facilitates the application of various paleomagnetic tests to user data, such as the fold test, conglomerate test, and reversals test. Notably, the application allows for seamless import and export of paleomagnetic data (tables) in formats compatible with .csv and MS Excel. Additionally, all generated figures can be exported as high-quality vector graphics in .svg format, specifically designed for direct integration into publications and presentations. Furthermore, PMTools enables the export of sets of paleomagnetic poles in GMap and GPlates software formats, enabling researchers to promptly use their paleomagnetic data for paleotectonic reconstructions. PMTools has an intuitive interface, customizable hotkeys, and an extensive array of graph elements, all of which contribute to making PMTools an appealing, cutting-edge tool for processing and analyzing the results of paleomagnetic studies.

Keywords: PMTools, web application, paleomagnetism, paleomagnetism data processing, statistics for paleomagnetism, visualization of the paleomagnetic data, principal component analysis, virtual geomagnetic poles, paleomagnetic poles