

PMTools

v.2.0.

Руководство пользователя

от 31.05.2022

Москва, 2022 г.

Условия использования и доп. информация

Актуальная версия PMTools написана в 2021-2022 гг.

PMTools распространяется бесплатно и имеет открытый исходный код.

Автор: Ефремов Иван Вадимович

Автор идеи PMTools: Веселовский Роман Витальевич

По всем вопросам и пожеланиям, связанным с использованием PMTools, обращаться в раздел issues репозитория PMTools https://github.com/I194/PMTools_2.0/issues.

doi: (статья на рассмотрении)

Руководство пользователя является выдержкой из оригинального диплома "Новое программное обеспечение для палеомагнитных операций и его практическое использование" [Ефремов И. В., 2022] и не претендует на статус полноценной документации.

PMTools распространяется под лицензией MIT

Copyright © 2022 Ivan Efremov

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Основы визуализации и статистической обработки палеомагнитных данных	7
1.1. Диаграмма Зийдервельда	8
1.2. Стереограммы.....	9
1.3. Распределения векторов на сфере.....	10
1.4. Палеомагнитные статистические тесты	12
1.4.1. Тесты значимости	12
1.4.2. Полевые тесты и тест обращения	14
1.5. Метод Bootstrap.....	16
1.5.1. Модификации тестов	17
Глава 2. Программа PMTools для выполнения палеомагнитных операций	19
2.1. Главная страница	19
2.2. Страница компонентного анализа.....	21
2.3. Страница статистики направлений	27
2.3.1. Модуль работы с виртуальными геомагнитными полюсами	31
2.3.2. Модуль работы с палеомагнитными тестами	32
2.4. Настройка программы, горячие клавиши и графика	33
2.5. Выводы.....	36
Глава 3. Демонстрация работы PMTools на примере реальных палеомагнитных данных .	37
3.1. Лабораторные исследования.....	37
3.2. Компонентный анализ.....	38
3.3. Вычисление средних направлений	40
3.4. Вычисление виртуальных геомагнитных полюсов	41
3.5. Пример использования страницы DIR, тест обращения.....	43
3.6. Выводы.....	44
Заключение.....	45
Список литературы.....	46

Введение

Палеомагнитология сегодня — это активно развивающееся направление в науках о Земле, а результаты палеомагнитных исследований находят широкое применение при решении как фундаментальных, так и прикладных задач. Первые палеомагнитологи появились в нашей стране примерно в 1950-х годах, тогда же увидели свет и первые публикации, представляющие результаты палеомагнитных исследований и их интерпретацию. С тех пор прошло около 70 лет, и за это время требования к форме представления палеомагнитных данных стали неотъемлемым критерием, позволяющим оценить их качество и надёжность. Поэтому в настоящее время палеомагнитологи уделяют большое внимание качественной визуализации полученных данных, их статистической обработке и стараются максимально представительно отображать их в своих публикациях и на докладах на конференциях.

Последние 30 лет для визуализации и обработки палеомагнитных данных используются компьютерные программы, которые заметно эволюционировали со времен первых операционных систем с примитивными (по сегодняшним меркам) графическими возможностями. Однако на рынке соответствующих «палеомагнитных» программных продуктов сложилась интересная ситуация: несмотря на довольно ограниченный круг пользователей (во всем мире вряд ли найдётся более нескольких тысяч пользователей программами для палеомагнетизма), существует достаточно большое количество программ для работы с результатами палеомагнитных исследований, число которых явно превышает 10. Значительная часть из них написана студентами и, как следствие, их развитие очень быстро остановилось, а функционал сильно ограничен. Часть программ написана производителями оборудования для палеомагнитных лабораторий, и хотя эти программы и являются конечным и надёжным продуктом, но для практического использования они нередко бывают недостаточно удобны. В то же время существуют и прекрасно зарекомендовавшие себя программы, написанные профессиональными палеомагнитологами; одной из таких программ, написанной более 30 лет назад, до сих пор пользуется мой научный руководитель и многие другие знакомые мне исследователи, запуская её с помощью эмуляторов и тратя многие часы на последующую доводку графики в графическом редакторе.

Отдельных слов заслуживает ситуация с форматами хранения палеомагнитных данных. Каждая из программ использует свой несовместимый с другими программами формат данных. Это приводит к тому, что практически каждая палеомагнитная лаборатория использует свой формат данных, что затрудняет сопоставление данных, полученных в разных лабораториях. Наконец все палеомагнитные программы написаны зарубежными авторами, что нередко затрудняет их адаптацию под традиции отечественной палеомагнитной школы и требования отечественных исследователей.

Поэтому перед данной работой была поставлена достаточно амбициозная цель — написать новую программу для обработки и визуализации палеомагнитных данных, которая в

полной мере удовлетворяла бы требованиям отечественных палеомагнитологов и давала бы возможность работы с наиболее распространенными в нашей стране форматами данных. При этом требования отечественных палеомагнитологов к будущей программе следующие:

- доступность с любого устройства;
- интуитивный и простой user-friendly интерфейс;
- широкий функционал, не уступающий программам-предшественникам и дополняющий их;
- поддержка наиболее распространённых базовых форматов хранения палеомагнитных данных, как в плане импорта, так и в плане экспорта, и при этом возможность конвертации их в форматы .csv и .xlsx;
- соответствие графиков 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, специальные интерфейсы ввода данных, и возможность управлять программой посредством горячих клавиш.

Для достижения этой цели были обозначены следующие задачи:

1. анализ всех широко используемых программ для статистической обработки палеомагнитных данных;
2. выявление наиболее значимых для отечественных исследователей функций, требующих обязательной реализации в будущей программе;
3. изучение всей теоретической части выделенных на прошлом этапе функций и способов их программной реализации, вкупе с анализом и последующим выбором имеющихся в свободном доступе технологий, позволяющих реализовать программу в рамках поставленных к ней требований;
4. реализация программы для статистической обработки палеомагнитных данных;
5. демонстрация работы с результатами палеомагнитных исследований в созданной программе.

Далее, в Главе 1 рассматриваются теоретические визуализации палеомагнитных данных и основы всех функций для их статистического анализа, выделенных в качестве необходимых в будущей программе. Затем, в Главе 2 приводится список технологий, с использованием которых было решено реализовать программу, рассматривается её архитектура, а также даётся

детальное описание самой программы с указанием её возможностей, преимуществ и недостатков. И в Главе 3 приводятся примеры работы в программе с использованием реальных данных, полученных непосредственно автором работы.

Глава 1. Основы визуализации и статистической обработки палеомагнитных данных

Для описания магнитного поля в веществе используется вектор магнитной индукции \mathbf{B} , который связан с напряжённостью поля в вакууме \mathbf{H} выражением $\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{J}$, где μ_0 — магнитная постоянная, а \mathbf{J} — намагниченность. Намагниченность выражается через напряжённость и магнитную восприимчивость вещества следующим образом: $\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}$. Различают индуктивную намагниченность и остаточную намагниченность. Индуктивная намагниченность вызвана действием внешнего магнитного поля и исчезает после его снятия, оставшаяся при этом намагниченность вещества называется остаточной. В палеомагнитологии изучается естественная остаточная намагниченность горных пород \mathbf{J}_n .

Вектор остаточной намагниченности, подобно вектору напряжённости, можно разложить на три составляющие: X , Y и Z — северная, восточная и вертикальная составляющие соответственно, связанные с величиной напряжённости следующим образом:

$$X = J_n \cos I \cos D; \quad Y = J_n \cos I \sin D; \quad Z = J_n \sin I, \quad (2.1)$$

где D и I — магнитные склонение и наклонение соответственно. Склонение — это угол между направлением на северный географический полюс и проекцией вектора естественной остаточной намагниченности на горизонтальную плоскость, наклонение — угол между горизонтальной плоскостью и вектором естественной остаточной намагниченности (рис. 2.1).

Именно эти 6 взаимосвязанных величин — \mathbf{J}_n , D , I , X , Y , Z — используются для статистического анализа в палеомагнитологии.

Здесь важно заметить, что отобранные образцы можно рассматривать в 3 различных декартовых системах координат:

1. *система координат образца* — ось X совпадает с линией падения, ось Y совпадает с правой линией простирания, ось Z направлена вниз.
2. *современная система координат (географическая)* — плоскость маркировки совпадает с текущей плоскостью горизонта;
3. *древняя система координат (стратиграфическая)* — плоскость маркировки совпадает с первичной плоскостью горизонта для породы, откуда был извлечён образец;

При этом плоскость маркировки образца есть плоскость, образуемая линией падения и линией простирания (рис. 2.2).

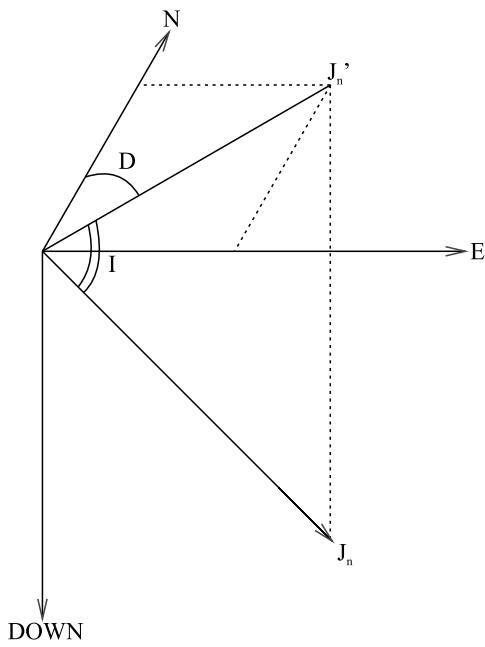


Рис. 1.1: Разложение вектора естественной остаточной намагниченности J_n на склонение D и наклонение I

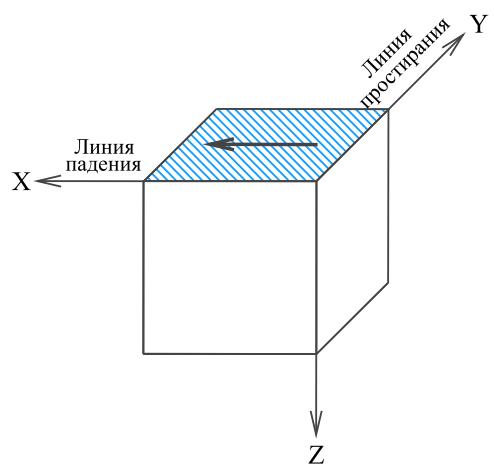


Рис. 1.2: Ориентировка образца. Линия простирания и линия падения задают плоскость маркировки

Обычно, после проведения магнитной чистки коллекции образцов имеется множество векторов естественной остаточной намагниченности, представленных в виде описанных выше взаимосвязанных величин. И при этом необходимо проанализировать распределение этих векторов — вычислить среднее направление, выявить компоненты естественной остаточной намагниченности. Для этого данные сначала визуализируются, а затем подвергаются статистической обработке. Визуализируются палеомагнитные данные при помощи различных графиков и диаграмм, но основные из них — диаграммы Зийдервельда и стереограммы.

1.1. Диаграмма Зийдервельда

Диаграмма Зийдервельда используется очень часто в палеомагнитологии, поскольку позволяет удобным образом изобразить трёхмерный вектор намагниченности в декартовых координатах на плоскости. Делается это путём отображения двух ортогональных проекций вектора намагниченности на одной диаграмме, при этом одному вектору ставится в соответствие сразу две точки (рис. 2.3). Если диаграмма отображает множество векторов естественной остаточной намагниченности J_n , полученных в ходе, например, температурной магнитной чистки образца, то точки принято соединять между собой линиями в порядке убывания температуры, при которой они были получены (рис. 2.4).

Подписи осей на диаграмме Зийдервельда принято менять при переходе от системы координат образца в древнюю или современную и наоборот. В случае системы координат образца оси подписываются как в обычных декартовых координатах — X , Y и Z . В двух других слу-

чаях X и $-X$ заменяется на N и S соответственно, Y и $-Y$ — на E и W , а Z и $-Z$ — на $DOWN$ и UP [Collinson, 2013] (рис. 2.3).

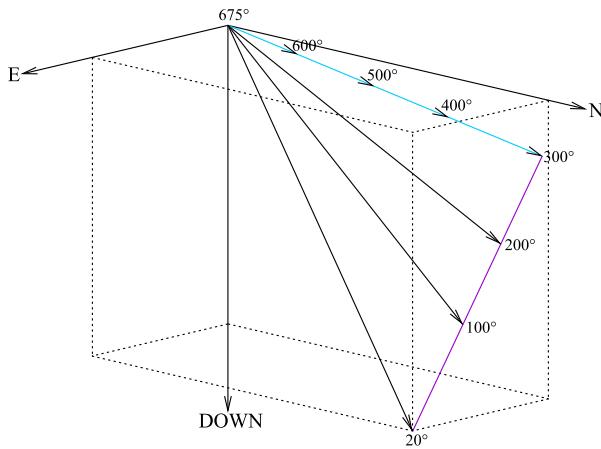


Рис. 1.3: Как строится диаграмма Зийдервельда

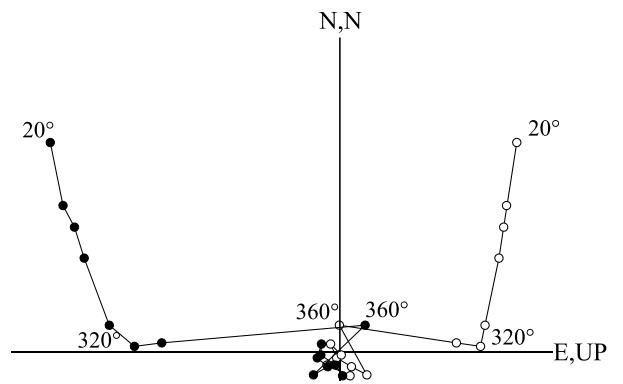


Рис. 1.4: Пример нанесения на диаграмму Зийдервельда реальных данных с температурной магнитной чистки, выколотые точки — это проекции на плоскость NE

1.2. Стереограммы

Наравне с диаграммами Зийдервельда используются в палеомагнитологии и стереограммы. Они применяются для отображения любых ориентированных в трёхмерном пространстве данных, в том числе и векторов естественной остаточной намагниченности \mathbf{J}_n .

Образцы, отбираемые для палеомагнитных исследований, ориентированы в пространстве, это же касается их векторов естественной остаточной намагниченности \mathbf{J}_n . Для удобства длины этих векторов принимаются равными 1, и тогда их распределение легко рассматривать на единичной сфере. В таком случае точки на этой сфере и будут визуальным представлением \mathbf{J}_n . Для большего удобства сфера вместе с точками на ней проецируется на плоскость.

Различают равноугольную и равновеликую стереографические проекции (рис. 2.5). Обычно в палеомагнитологии придерживаются равновеликой проекции, дающей наименьшие средние искажения площади сферы. В качестве плоскости проецирования выступает современная горизонтальная плоскость толщи, откуда был извлечен образец, с вводом поправки на её первичное залегание.

На получаемой стереограмме удобно изображать вектора намагниченности, используя их склонение D и наклонение I . В основном используется полярная проекция с часовой ориентацией, где линии равных склонений — радиусы, линии равных наклонений — концентрические окружности (рис. 2.6). Склонение может принимать значения от 0° до 360° , при этом увеличиваясь по ходу часовой стрелки. Наклонение имеет диапазон значений от -90° до 90° , точки с отрицательным склонением обычно изображаются выколотыми. При этом точки

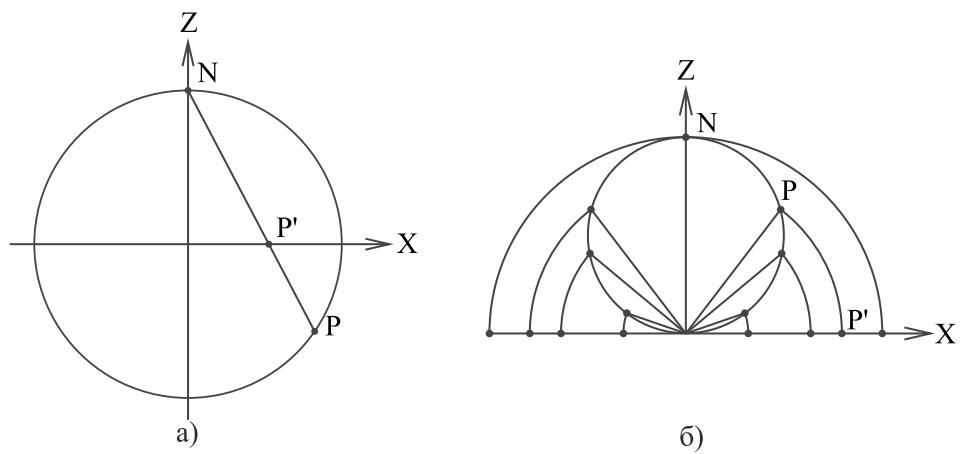


Рис. 1.5: Стереографическая (равноугольная) а) и равновеликая б) проекции сферы на плоскость.

между собой надо соединять не прямыми линиями, а дугами больших кругов, поскольку на сфере расстояние между двумя точками есть длина дуги большого круга, их соединяющей (рис. 2.7).

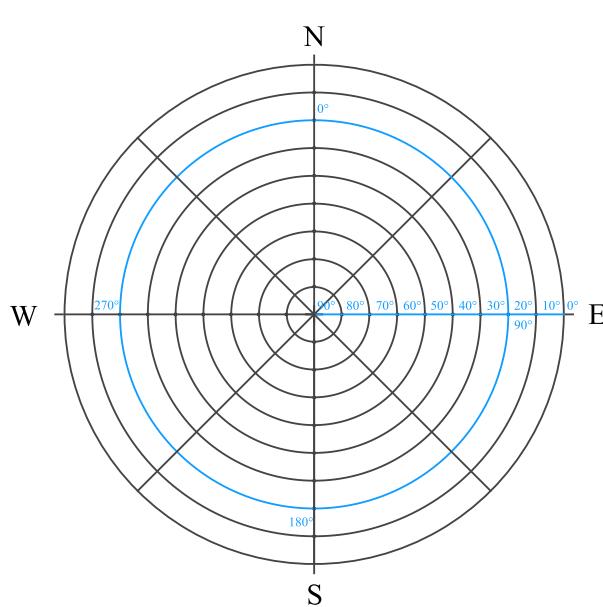


Рис. 1.6: Радиусы — линии равных склонений, концентрические окружности — линии равных наклонений

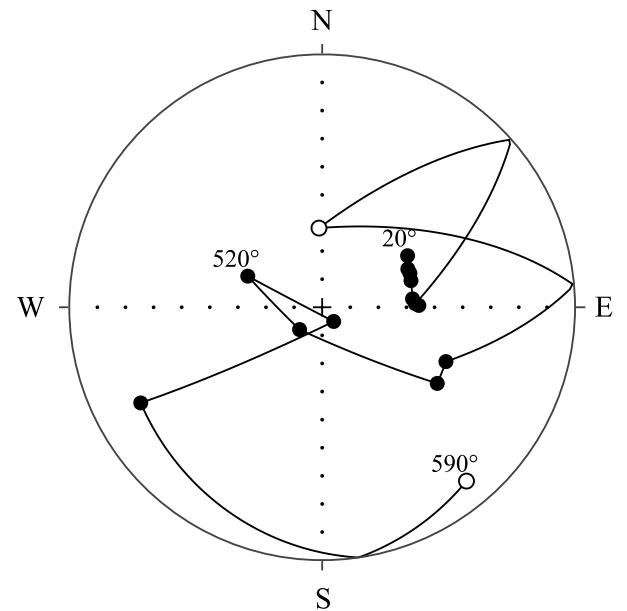


Рис. 1.7: Пример нанесения на стереограмму реальных данных с температурной магнитной чистки чистки, выколотые точки имеют отрицательное наклонение

1.3. Распределения векторов на сфере

Полученные в ходе палеомагнитных исследований вектора естественной остаточной намагниченности (Natural Remanent Magnetization, NRM) \mathbf{J}_n всегда имеют некоторое распределение в пространстве. В большинстве случаев, лучше всего любое подобное распределение

описывается распределением Бингхэма. Основной причиной этого является тот факт, что в сферической системе координат распределение Бингхэма не осесимметрично, то есть оно предполагает, что рассматриваемые данные находятся в пределах некоторого эллипса на поверхности сферы.

В ходе компонентного анализа, при выделении компонент естественной остаточной намагниченности, используется метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) [Kirschvink, 1980] — с математической точки зрения этот метод уменьшает размерность данных, то есть обобщает их. Происходит это за счёт аппроксимации данных. Если представить данные как хаотично распределённое облако точек (векторов) в n -мерном пространстве, то PCA аппроксимирует это облако n -мерным эллипсоидом, причём таким образом, что проекция точек (векторов) на оси этого эллипса позволяет достичь минимальных потерь исходной информации. Таким образом данные после применения к ним метода PCA переходят в систему координат меньшей размерности ($n-1$), причем центр координат соответствует условному центру масс, а оси позиционируются посредством метода наименьших квадратов. При работе с палеомагнитными данными, которые представляют собой трехмерные вектора, используется распределение Бингхэма, а главным статистическим параметром для выделенных компонент является величина MAD (Maximum Angular Deviation). Для векторов она вычисляется следующим образом:

$$MAD = \arctan \left(\sqrt{\frac{\lambda_{\text{int}} + \lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}} \right). \quad (1..1)$$

И следующим образом для плоскостей (кругов перемагничивания):

$$MAD = \arctan \left(\sqrt{\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\text{int}}} + \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}} \right), \quad (1..2)$$

где λ_{\min} , λ_{int} , λ_{\max} — собственные значения следующей симметричной матрицы:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sum(x_i - \bar{x})^2 & \sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum(x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) \\ \sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum(y_i - \bar{y})^2 & \sum(y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \\ \sum(x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) & \sum(y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) & \sum(z_i - \bar{z})^2 \end{pmatrix}. \quad (1..3)$$

Затем, для полученной коллекции выделенных компонент NRM находится среднее направление (средний вектор). Обычно, на данном этапе используется распределение Фишера.

Распределение Фишера — аналог распределения Гаусса на сфере, то есть оно осесимметрично относительно своего генерального среднего направления. Главными параметрами этого распределения являются кучность k и радиус круга доверия α_{1-p} [Храмов, 1982]:

$$k = \frac{N-1}{N-R}, \quad (1..4)$$

$$\alpha_{1-p} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{N-R}{R} \left(\left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right) \right) \quad (1..5)$$

где p — вероятность того, что среднее направление рассматриваемого набора данных лежит за пределами круга доверия (обычно принимают $p = 0.05$), N — число рассматриваемых направлений, а R — модуль вектора $\mathbf{R} = \sum_{i=1}^N \mathbf{j}_{ni}$, где \mathbf{j}_n — единичный вектор для \mathbf{J}_n .

Если же имеется смешанный набор данных — выделенных направлений и кругов перемагничивания, тогда вместо обычного распределения Фишера необходимо воспользоваться его модификацией [McFadden, 1988]. Суть модификации заключается в том, что итеративно производится поиск такого направления вдоль каждого из кругов перемагничивания, которое максимизирует длину искомого среднего направления.

На основе этих распределений и их параметров были созданы палеомагнитные статистические тесты, рассматриваемые далее.

1.4. Палеомагнитные статистические тесты

1.4.1. Тесты значимости

Используя распределение Фишера мы можем достаточно точно охарактеризовать наши данные, в частности мы можем узнать:

1. Носит ли распределение случайный характер?
2. Насколько один набор данных лучше сгруппирован, чем другой?

Разрешаются эти вопросы проведением т. н. тестов значимости, суть которых заключается в проверке нужной нам нулевой гипотезы. В ходе теста производится сравнение выборки с заранее заданной нулевой гипотезой, причём производится оно только на некотором уровне значимости — вероятностном уровне, на котором любые различия между выборкой и генеральной совокупностью носят исключительно случайный характер. Например, если уровень значимости составляет 5% и тест успешно пройден, то вероятность случайного соответствия выборки генеральной совокупности составляет 5%, а с вероятностью 95% выборка является частью рассматриваемой генеральной совокупности.

Тест на случайность

Имея средний вектор для выборки по Фишеру \mathbf{R} и зная размер выборки N можно понять, носит ли рассматриваемое распределение случайный характер. Тест Ватсона [Watson, 1956] заключается в расчёте параметра $R_0 = \sqrt{7.815 \cdot N/3}$ и сравнении его с модулем среднего направления выборки $R = \sqrt{(\sum_i x_i)^2 + (\sum_i y_i)^2 + (\sum_i z_i)^2}$. Если $R > R_0$, тогда нулевая гипотеза о случайности распределения может быть принята только на рассматриваемом уровне значимости, в противном случае распределение однозначно случайно.

Сравнение кучностей

Рассмотрим 2 выборки с параметрами N_1, k_1 и N_2, k_2 соответственно. Возьмём за нулевую гипотезу идею, что эти выборки принадлежат генеральным совокупностям с одинаковыми кучностями k , тогда соотношение k_1/k_2 будет отличаться из-за ошибок отбора образцов следующим образом [McElhinny, 1964]:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\text{var}(2(N_2 - 1))}{\text{var}(2(N_1 - 1))}, \quad (1..6)$$

где $\text{var}(2(N_2 - 1))$ и $\text{var}(2(N_1 - 1))$ — дисперсии с $2(N_2 - 1)$ и $2(N_1 - 1)$ степенями свободы. Это соотношение должно согласовываться с F-распределением, если предположение о генеральных совокупностях с одной кучностью k верное. Чтобы подтвердить это, соотношение должно быть близко к 1. А о том насколько сильно может отклониться оно от единицы, прежде чем это отклонение станет статистически значимым, позволяют судить таблицы для F-распределения.

Тест на общее среднее

Пусть имеется два средних направления, полученных как средние по Фишеру, и необходимо понять, насколько статистически значимо различие между ними. Наиболее простой и известный метод проверки значимости в этом случае — вариация F-теста, предложенная Ватсоном [Watson, 1956]. Рассмотрим две выборки единичных векторов размерами N_1, N_2 и со средними направлениями длинами R_1, R_2 соответственно. Тогда F-статистика имеет вид:

$$F = (N - 2) \frac{R_1 + R_2 - R}{N - R_1 - R_2}, \quad (1..7)$$

где $N = N_1 + N_2$, а R — среднее направление для объединённых выборок. Полученная F-статистика сопоставляется с табличными значениями для 2 и $2(N - 2)$ степеней свободы. Если она превышает табличное значение на выбранном уровне значимости, тогда рассматриваемые средние направления различны на этом уровне значимости.

Также существует альтернативный и более корректный в большинстве случаев способ определения, имеют ли два рассматриваемых набора данных общее среднее направление — V_w -тест Ватсона [Watson, 1983].

Пусть $R_1, R_2, (x_{11}, x_{12}, x_{13}), (x_{21}, x_{22}, x_{23})$ и k_1, k_2 — длины средних векторов, их декартовы координаты и кучности для двух выборок размерами N_1 и N_2 соответственно. Тогда средневзвешенная сумма и средневзвешенные значения вычисляются следующим образом:

$$S_w = k_1 R_1 + k_2 R_2, \quad (1..8)$$

$$\hat{X}_j = k_1 R_1 \bar{x}_{1j} + k_2 R_2 \bar{x}_{2j}, \quad (1..9)$$

где $j = 1, 3$, а $\bar{x} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N x_{ij}$ — компонента среднего вектора. Зная средневзвешенные значения по всем координатным осям, можем найти средневзвешенное направление:

$$R_w = \sqrt{\hat{X}_1^2 + \hat{X}_2^2 + \hat{X}_3^2}, \quad (1..10)$$

И тогда величина V_w -статистики вычисляется как:

$$V_w = 2(S_w - R_w). \quad (1..11)$$

Таким образом, V_w -статистика растёт с ростом разницы между двумя рассматриваемыми направлениями. И если величина V_w -статистики превышает некоторое критическое значение $V_{w|crit}$, тогда нулевая гипотеза об общем среднем для рассматриваемых наборов данных отклоняется. Критическое значение при этом можно найти используя метод Монте-Карло. Алгоритм нахождения критического значения следующий:

1. создаются два набора данных размерами N_1, N_2 и кучностями k_1, k_2 , но с одинаковым средним направлением (данные соответствуют распределению Фишера);
2. рассчитывается V_w -статистика для созданных наборов данных;
3. шаги 2–3 повторяются необходимое число раз (например, $Q = 1000$);
4. полученное распределение V_w -статистик сортируется по возрастанию;
5. находится критическое значение $V_{w|crit}$, которое будет являться пороговым для установленного уровня значимости: пусть уровень значимости равен s , тогда критическое значение V_w будет $(1 - s)Q$ по счёту (с учётом сортировки);

Затем, рассчитав V_w -статистику для исследуемых данных, остаётся лишь сравнить её с $V_{w|crit}$. Например, пусть уровень значимости составляет 5%, и если найденное V_w превысит 95% сортированных по возрастанию симулированных V_w , тогда можно считать, что с вероятностью 95% рассматриваемые наборы данных не имеют общего среднего направления.

1.4.2. Полевые тесты и тест обращения

Всегда важно понимать, когда изучаемый образец приобрёл остаточную намагниченность. Для этого были созданы тест обжига (контакта), тест галек (конгломератов) и тест складки. В этой работе рассматриваются только последние два теста, а также тест обращения.

Тест галек

Тест галек позволяет датировать намагниченность изучаемого образца относительно момента переотложения породы в виде конгломератов. Для проведения теста необходимо удостовериться в следующем:

- Гальки конгломератов представлены именно той породой, намагниченность которой изучается (внутриинформационные конгломераты);
- Намагниченность галек однородна по направлению (высокая кучность);

Сам по себе тест при этом является, по сути, проверкой того, носит ли распределение направлений намагниченности галек в пространстве случайный характер (равновероятно в пространстве). И, таким образом, математически полностью сводится к тесту Ватсона на случайность. Интерпретация у результатов теста однозначная: если распределение направлений намагниченности галек не случайное, тогда они приобрели намагниченность после переотложения в виде конгломератов.

Тест складки

Тест складки заключается в изучении истории складчатости геологического тела, из которого был отобран изучаемый образец. Он позволяет понять, когда была приобретена намагниченность - до, после или во время смятия тела в складку. Для проведения этого теста достаточно отобрать образцы с обоих крыльев складки.

Математически этот тест сводится к сравнению кучностей рассматриваемого набора направлений до и после смятия в складку. Интерпретируются результаты теста следующим образом: если направления лучше сгруппированы до складчатости, чем после неё, значит намагниченность была приобретена после смятия в складку (тест считается непройденным); в противном случае результат противоположный.

В ходе теста сначала исследуется соотношение кучностей k до k_b и после k_a тектонических движений, а затем применяется тест значимости на сравнение кучностей, который позволяет понять, статистически значимо ли отличие соотношения k_a/k_b от 1. Если это соотношение превышало величину F-статистики для 5% уровня значимости, значит с вероятностью менее 5% увеличение k после тектонических движений не связано напрямую с тектоническими движениями, а является случайным. И, соответственно, это даёт 95% вероятность, что увеличение k после тектонических движений значимо и k_a/k_b значимо отличается от 1. Такой результат считается статистически значимым прохождением теста складки.

Тест обращения

Если набор палеомагнитных сайтов даёт приемлемое усреднение вековых вариаций в ходе интервалов как с нормальной полярностью, так и с обратной, и при этом не было приобретено вторичных компонент NRM, тогда среднее направление первичной NRM для сайтов с нормальной полярностью должно быть антипараллельным (антиподальным) к аналогичному среднему направлению для сайтов с обратной полярностью.

Тест обращения проверяет, насколько статистически значимо отклонение угла между направлениями с сайтов прямой и обратной полярности от 180° . Математически эта процедура

полностью может быть описана тестом Ватсона на сопоставление средних направлений, для этого достаточно в качестве двух наборов данных взять направления прямой и обратной полярности. При этом важно учитывать, что корректно применять этот тест только для Фишеровских распределений.

1.5. Метод Bootstrap

Многие имеющиеся палеомагнитные данные часто имеют распределения не осесимметричные и не бимодальные, их невозможно корректно описать распределением Фишера, а порой и распределением Бингхэма. Как следствие, необходимо найти непараметрический способ описания таких данных. Таким подходом будет применение метода бутстрэп (bootstrap) [Efron, 1979], который отлично подходит для палеомагнитных данных [Tauxe, 1991].

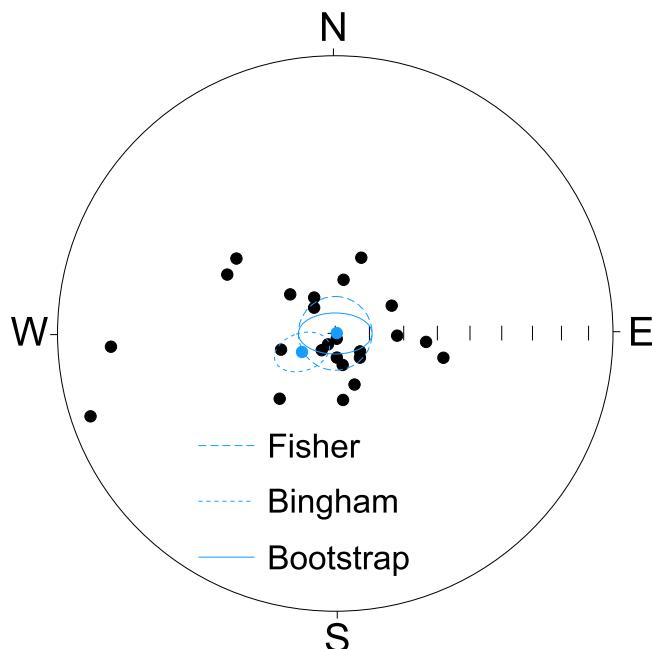


Рис. 1.8: Сравнение 95% доверительных областей, полученных по Фишеру, Бингхэму и с использованием бутстрэпа [Tauxe, 1991].

Допустим, что имеется набор сложным образом распределённых палеомагнитных векторов, размер выборки N и необходимо найти её среднее. Напрямую применить к этой выборке какое-либо известное распределение нельзя, поскольку любое из них будет плохо его описывать. В таком случае можно использовать бутстрэп:

1. случайным образом выбираются N векторов из выборки, причём каждый вектор может быть выбран неоднократно;
2. для полученного нового распределения рассчитывается средний вектор по Фишеру;
3. шаги 1–2 повторяются необходимое число раз (чем больше повторений, тем лучше будет итоговое распределение), сохраняя каждый раз результат шага 2;

4. полученное распределение средних принимается соответствующим распределению Бингхэма и, исходя из этого, рассчитываются все его параметры.

Пример применения описанного метода представлен на рис. 1.8.

1.5.1. Модификации тестов

Существует множество различных модификаций палеомагнитных тестов, но почти все из них так или иначе отходят от заложенных в основу этих тестов идей. Например, существуют как минимум 8 известных модификаций теста складки, причём все они уже сравнивались между собой в работе [Enkin, 2003]. И, по озвученной выше причине, все эти тесты и любые другие подобные им нельзя назвать классическими. Более того, в настоящее время ни один из таких тестов не используется широко, а большая их часть не используется вовсе. Тем не менее, существуют такие их модификации [Tauxe, 2010], которые не изменяют базовые идеи тестов, а только лишь дают новые статистические способы их описания, лишённые недостатков тех способов, которые ранее использовались в качестве классических. К тому же, именно эти модификации тестов сейчас наиболее широко используются палеомагнитологами, являясь частью широко используемого за рубежом пакета анализа палеомагнитных данных PmagPY [Tauxe et al., 2016].

Модификация теста складки

Классический тест складки, описанный ранее, имеет ряд недостатков:

1. исследуемые направления могут быть двух полярностей и при этом разбросаны по сфере;
2. исследуемые направления могут быть лучше всего скучены не точно в географический или стратиграфической системе координат (не до и после смятия в складку), а где-то «между» (неполное «распрямление» складки);
3. все структурные изменения, приведшие складку к настоящему виду, доподлинно неизвестны и в большинстве случаев не могут быть известны в принципе.

Все эти недостатки не позволяют применять классический тест складки ко многим палеомагнитным данным, особенно к не соответствующим распределению Фишера. Чтобы избежать недостатков, связанных с распределением Фишера, вместо классической кучности можно использовать её аналог из симметрической матрицы сумм и квадратов:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix}, \quad (1..12)$$

Здесь роль кучности выполняют относительные величины собственных значений λ : с ростом сгруппированности («кучности»), дисперсия вдоль главной оси возрастает, а вдоль других уменьшается. Таким образом, исследование величины λ_1 в ходе распрямления складки позволит определить момент, когда достигается наибольшая сгруппированность направлений. И это сразу же решает второй из упомянутых выше недостатков: можно постепенно, с необходимой «скоростью» распрямлять складку, что позволяет выделить конкретный момент, когда была достигнута максимальная сгруппированность направлений.

Теперь, чтобы понять, является ли полученный результат статистически значимым, можно воспользоваться бутстрэпом. Рассчитав λ_1 необходимое число раз и построив его кумулятивное распределение, выделяем граничные значения процентов распрямления складки, внутри которых находится 95% распределения. И если эти границы включают в себя момент 100% распрямления складки, значит тест складки для рассматриваемых данных пройден.

Модификация теста на общее среднее

В первую очередь стоит обобщить V_w -тест на случай распределения, не соответствующего фишеровскому. Для этого вместо метода Монте-Карло необходимо воспользоваться бутстрэпом. При этом все средние направления переводятся в декартовы координаты и строятся графики их кумулятивного распределения. Для каждого распределения находим границы, содержащие 95% всех средних. Если хотя бы по одной из осей координат границы распределений не будут пересекаться, значит, с вероятностью 95%, у рассматриваемых наборов данных средние направления различаются.

Модификация теста обращения

Для модификации теста достаточно воспользоваться модифицированным тестом на общее среднее и взять в качестве двух наборов данных направления, соответствующие прямой полярности, и направления, соответствующие обратной.

Глава 2. Программа PMTools для выполнения палеомагнитных операций

В предыдущих главах убедительно показана необходимость в разработке нового, современного и универсального программного обеспечения, а также рассмотрены основные методические аспекты, которые будут учтены при его создании.

PMTools — это новое веб-приложение, созданное в рамках этой работы, будучи её целью. PMTools, как было обозначено в первой главе, обладает всеми лучшими свойствами уже существующих и используемых исследователями программ для статистической обработки палеомагнитных данных.

PMTools написана на языке TypeScript, с использованием фреймворка React. Также используется библиотека Redux для хранения данных в рамках сессии, MaterialUI — в качестве источника шаблонов элементов интерфейса, и множество других немаловажных библиотек. При этом все графики в PMTools написаны с нуля 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, где каждый модуль абстрагирован настолько, насколько это возможно в рамках той или иной конкретной ситуации. 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 её основе программные решения могли развиваться в будущем самостоятельно силами заинтересованного в этом сообщества.

Далее, в соответствующих разделах, рассмотрены ключевые инструменты PMTools, включая описание взаимодействия пользователя с ними и их функционала.

2.1. Главная страница

PMTools в данный момент доступна по адресу <https://pmtools.vercel.app/>. Вероятно, адрес в будущем будет изменён, о чём пользователи будут проинформированы.

При переходе на адрес, по которому располагается PMTools, пользователь попадает на главную страницу. Главная страница (рис. 2.1) предназначена для краткого ознакомления пользователя с программой. Здесь вкратце представлены различные возможности програм-

мы и дано её описание, представлена основная юридическая информация, а также имеется навигационная панель, позволяющая как посмотреть различные метаданные о проекте, так и перейти непосредственно к функциональной части.

Далее, в следующих разделах, приведено детальное описание функциональной части программы.

PMTools
for paleomagnetism researchers

Почему PMTools? Магнитные чистки (PCA) Статистика направлений (DIR) Репозиторий проекта Авторы и источники

Работайте с результатами палеомагнитных исследований.
В любое время, в любом месте, с любого устройства.
И не беспокойтесь о защите данных.

Приступить к работе

Найти средние направления методом суммирования, 99% доверительный интервал на 99.9%
Однако для этого требуется более 100 точек

Decl. [°] 0.1 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

Latitude [°] 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9 -10 -11 -12 -13 -14 -15 -16 -17 -18 -19 -20 -21 -22 -23 -24 -25 -26 -27 -28 -29 -30

Longitude [°] 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 200 190 180 170 160 150 140 130 120 110 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290

geographic

Latitude [°] 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9 -10 -11 -12 -13 -14 -15 -16 -17 -18 -19 -20 -21 -22 -23 -24 -25 -26 -27 -28 -29 -30

Longitude [°] 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 200 190 180 170 160 150 140 130 120 110 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290

Находите виртуальные геомагнитные полюса

Для расчёта полюсов достаточно на странице DIR открыть соответствующий модуль и просто ввести или импортировать координаты точек отбора образцов (можно даже из XLSX)

Рис. 2.1: Главная страница PMTools, некоторые её элементы.

2.2. Страница компонентного анализа

Страница компонентного анализа (рис. 2.2) предназначена для работы с результатами магнитных чисток, то есть для проведения компонентного анализа коллекций образцов.

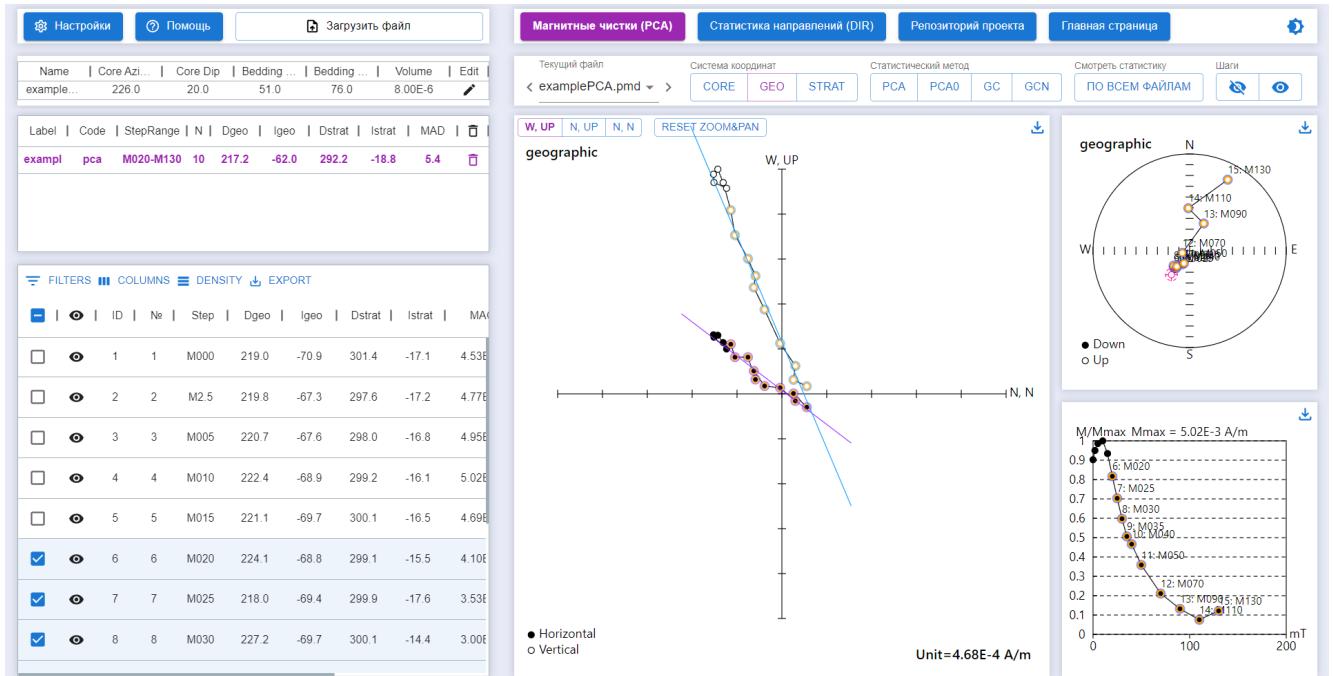


Рис. 2.2: Страница компонентного анализа

На вход принимаются файлы в формате .pmd (рис. 2.3) и .squid (рис. 2.4), а также их структурные аналоги в .csv и .xlsx форматах. Были выбраны конкретно эти форматы данных по причине максимальной распространённости результатов магнитных чисток у отечественных исследователей именно в них.

```

1 Author
2 133cr15 a=226.0 b= 70.0 s= 51.0 d= 76.0 v= 8.0E-6m3
3 P AL Xc (Am2) Yc (Am2) Zc (Am2) MAG(A/m) Dg Ig Ds Is a95
4 M000 3.62E-08 -1.45E-09 -6.32E-10 4.53E-03 219.0 -70.9 301.4 -17.1 0.0
5 M2.5 3.81E-08 -1.60E-09 1.73E-09 4.77E-03 219.8 -67.3 297.6 -17.2 0.0
6 M005 3.95E-08 -1.38E-09 1.59E-09 4.95E-03 220.7 -67.6 298.0 -16.8 0.0
7 M010 4.01E-08 -9.11E-10 7.71E-10 5.04E-03 222.4 -68.9 299.2 -16.1 0.0
8 M015 3.75E-08 -1.11E-09 1.31E-10 4.69E-03 221.1 -69.7 300.1 -16.5 0.0
9 M020 3.28E-08 -4.01E-10 6.87E-10 4.10E-03 224.1 -68.8 299.1 -15.5 0.0
10 M025 2.82E-08 -1.38E-09 1.97E-10 3.53E-03 218.0 -69.4 299.9 -17.6 0.0
11 M030 2.40E-08 1.68E-10 1.26E-10 3.00E-03 227.2 -69.7 300.1 -14.4 0.0
12 M035 2.01E-08 -1.51E-09 -2.23E-09 2.54E-03 208.5 -75.7 307.0 -19.0 0.0
13 M040 1.87E-08 -7.18E-10 -4.25E-10 2.34E-03 219.2 -71.2 301.7 -17.0 0.0
14 M050 1.42E-08 -1.17E-09 -2.03E-09 1.80E-03 204.4 -77.3 308.9 -19.4 0.0
15 M070 8.22E-09 4.89E-10 -2.01E-09 1.06E-03 253.8 -82.9 314.3 -11.2 0.0
16 M090 3.55E-09 8.07E-10 -3.85E-09 6.63E-04 27.4 -61.4 347.0 -1.5 0.0
17 M110 1.75E-09 1.43E-09 -2.02E-09 3.79E-04 358.3 -50.4 344.9 17.8 0.0
18 M130 -3.49E-10 1.44E-09 -4.65E-09 6.10E-04 28.2 -15.0 30.0 17.5 0.0

```

Рис. 2.3: Внутренняя структура файла с расширением .pmd

```

1 6t 60
2 149.9 24.0 270.0 0.0 11.0
3 NRM 093.7 66.8 093.7 66.8 2.70E-07 002.1 108.8 76.6 0.066897 0.008804 0.006351 kramov 2020-08-07 10:30:07
4 TT 120 101.5 70.2 101.5 70.2 2.41E-07 001.9 124.1 74.3 0.005449 0.007705 0.002332 kramov 2020-08-07 14:02:59
5 TT 120 101.5 70.2 101.5 70.2 2.41E-07 001.9 124.1 74.3 0.005449 0.007705 0.002332 kramov 2020-08-07 14:02:59
6 TT 240 081.7 79.0 2.00E-07 022.7 163.4 75.6 0.066440 0.065597 0.000930 kramov 2020-08-08 04:16:52
7 TT 300 067.9 75.6 067.9 75.6 1.54E-07 002.7 163.4 80.0 0.005394 0.006250 0.003047 kramov 2020-08-08 09:02:46
8 TT 350 017.9 29.4 017.9 29.4 7.34E-08 005.9 303.9 45.4 0.007021 0.006232 0.000558 kramov 2020-08-08 13:29:23
9 TT 400 304.9 60.9 304.9 60.9 1.17E-07 002.7 121.5 62.0 0.004983 0.003338 0.001158 kramov 2020-08-08 18:22:13
10 TT 450 204.4 37.2 204.4 37.2 4.50E-08 008.1 151.1 16.8 0.006837 0.007678 0.002694 kramov 2020-08-09 05:09:08
11 TT 520 210.7 -25.0 210.7 -25.0 1.93E-07 022.9 141.3 -45.0 0.007106 0.0069153 0.004307 kramov 2020-08-09 10:37:16
12 TT 550 040.6 14.4 040.6 14.4 3.97E-07 008.9 336.5 36.8 0.005910 0.01490 0.007896 kramov 2020-08-09 15:04:35

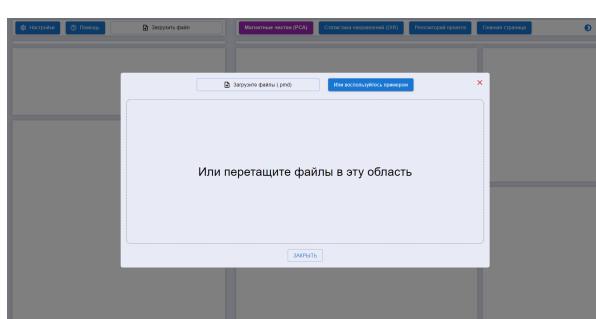
```

Рис. 2.4: Внутренняя структура файла с расширением .squid

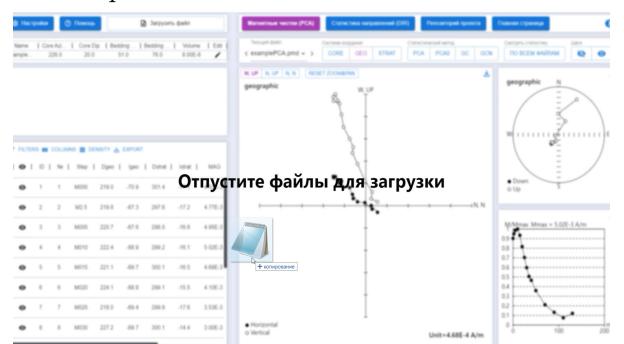
Есть несколько способов импорта данных в PMTools (рис. 2.5). Когда пользователь попадает на страницу компонентного анализа, на которую не загружен ещё ни один файл с данными, он видит окно импорта данных (рис. 2.5.2). Окно это можно закрыть и тогда для импорта данных можно либо воспользоваться специальной кнопкой в левом верхнем углу приложения (рис. 2.5.1), либо просто переместив файл допустимого формата поверх приложения (рис. 2.5.3). При условии, что на страницу уже загружены какие-либо данные, окно импорта более не отображается и загрузка дополнительных данных возможно только через два других, упомянутых выше способа.



(2.5.1) Панель с кнопкой импорта.



(2.5.2) Стартовое окно импорта.



(2.5.3) Импорт путём перетаскивания файла.

Рис. 2.5: Импорт файлов в PMTools.

Загруженные данные представлены в программе, в первую очередь, в виде файлов. Это видит и пользователь при взаимодействии с интерфейсом программы. Список загруженных на страницу файлов находится на панели инструментов (рис. 2.6). По умолчанию на панели инструментов отображается только текущий файл, а чтобы увидеть все остальные, необходимо нажать на название отображаемого файла — оно является кнопкой, разворачивающей меню выбора и удаления всех загруженных на страницу файлов.

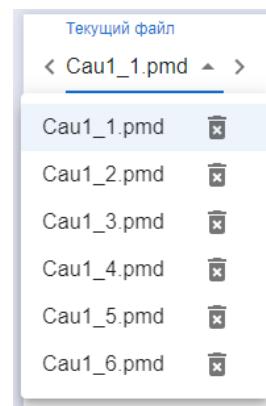


Рис. 2.6: Страница компонентного анализа, меню всех открытых файлов.

Данные текущего открытого файла на странице РСА отображаются в двух таблицах в

левой половине интерфейса страницы (рис. 2.7). Данные по ориентировке образца находятся в верхней таблице (рис. 2.7.1). Эти данные редактируемые (рис. 2.7.3) и изменения в них влияют на отображаемые графики, которые будут рассмотрены далее. Данные по шагам магнитной чистки текущего образца находятся в нижней таблице (рис. 2.7.2). Эта таблица не может быть отредактирована, однако данные в ней могут быть отфильтрованы различными способами, столбцы её могут быть скрыты, а вертикальный размер строк может быть изменён. При этом, в одном ряду с элементами управления этими параметрами располагается кнопка экспорта всех данных текущего открытого файла. Данная модель взаимодействия с таблицей в PMTools будет встречаться и далее, в других окнах и модулях. Различаться будет исключительно экспорт — для каждого вида данных он свой. В частности, данные текущего файла на странице PCA могут быть экспортированы в форматах .pmd, .csv и .xlsx.

Name	Core Azimuth	Core Dip	Bedding Strike	Bedding Dip	Volume	Edit
Cau1_1....	244.1	69.0	334.1	21.0	1.00E-6	

(2.7.1) Таблица с элементами залегания образца.

ID	№	Step	Dgeo	Igeo	Dstrat	Istrat	MAZ
1	1	T020	64.7	39.0	64.6	18.0	6.57
2	2	M001	68.3	78.0	65.7	57.0	2.37
3	3	M001	68.3	77.9	65.7	56.9	2.37
4	4	M1.5	67.7	77.6	65.5	56.6	2.35
5	5	M002	66.7	77.6	65.1	56.6	2.32
6	6	M2.5	64.8	76.2	64.4	55.2	2.32
7	7	M003	63.4	75.3	63.8	54.3	2.33
8	8	M3.5	63.9	75.7	64.0	54.7	2.31

(2.7.2) Таблица с данными по шагам магнитной чистки.

Core Azimuth	244.1
Core Dip	69
Bedding Strike	334.1
Bedding Dip	21
Volume	0.000001

(2.7.3) Окно редактирования элементов залегания образца.

Рис. 2.7: Страница компонентного анализа, таблицы с входными данными и внесение изменений в них.

Эти же данные, помимо табличного отображения, имеют графическое. На странице компонентного анализа они представлены на диаграмме Зийдервельда, стереограмме и графике размагничивания (рис. 2.8). Диаграмма Зийдервельда имеет ряд особенностей, отличающих её от всех других графиков. Главное отличие — возможность масштабировать данные и передвигать их в поле отображения. Эта особенность крайне важна и потому была сделана специально для этого графика. Важность её заключается в том, что без должного масштабирования порой невозможно произвести корректный компонентный анализ. Другая особенность заключается в том, что на диаграмме Зийдервельда, в отличие от других графиков, имеются элементы управления. Посредством этих элементов управления пользователь может

изменять проекцию и сбрасывать применённое масштабирование.

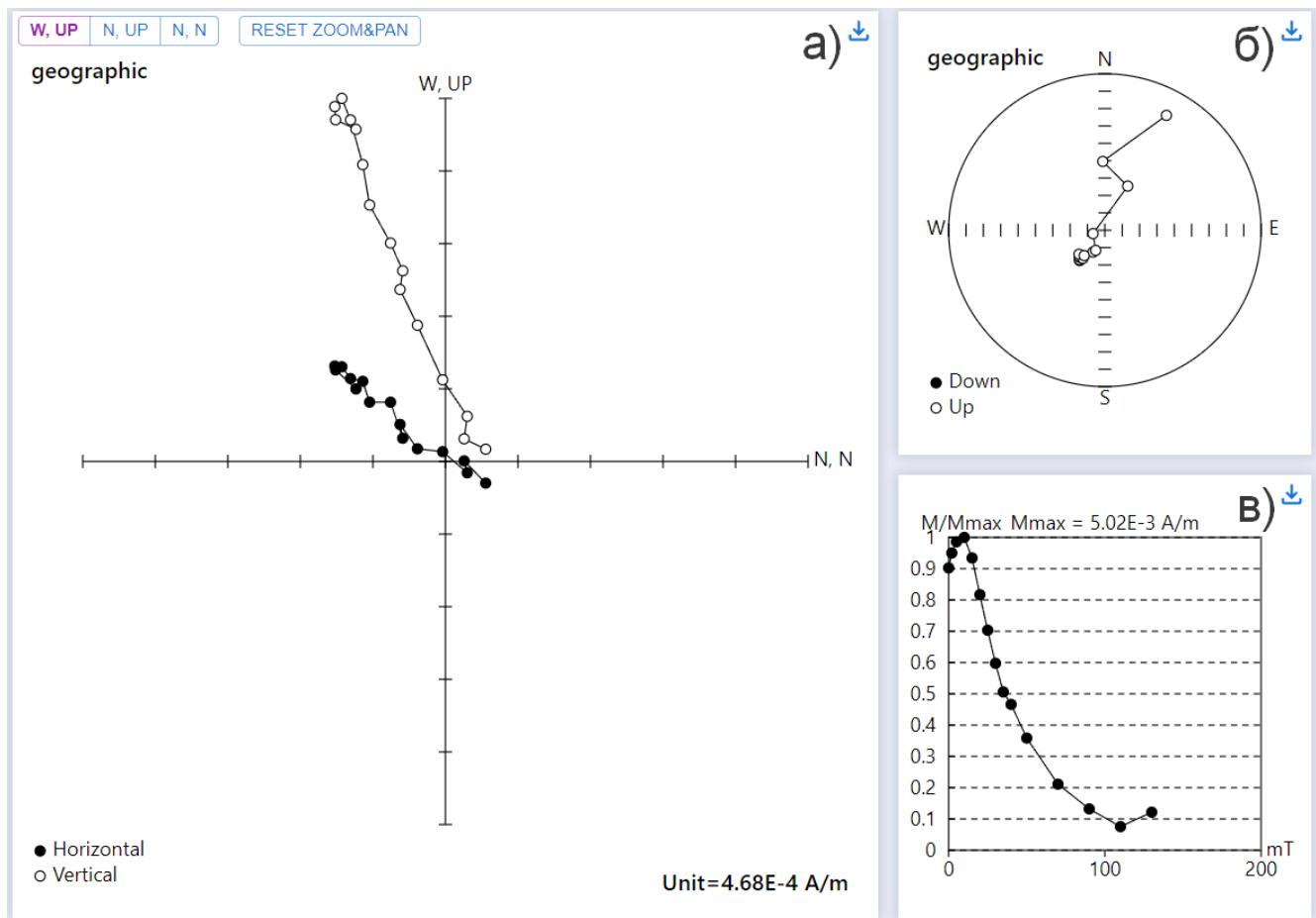


Рис. 2.8: Страница компонентного анализа, все графики: а) диаграмма Зийдервельда; б) стереограмма; в) график размагничивания.

Графическое отображение данных необходимо для проведения компонентного анализа. Все статистические операции над результатами магнитных чисток, позволяющие выделить компоненты намагниченности, на странице PCA представлены в панели инструментов, находящейся строго над вышеописанными графиками (рис. 2.9). На панели инструментов, слева направо, располагаются следующие элементы:

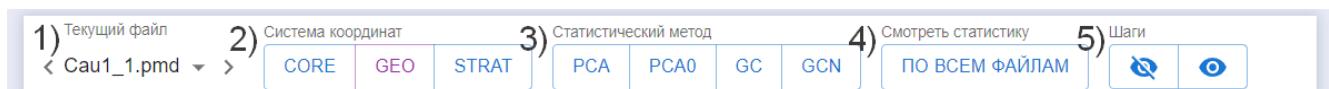


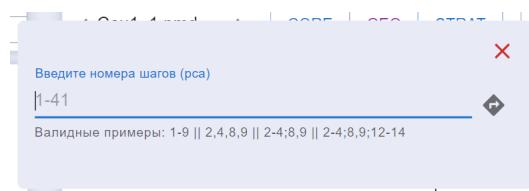
Рис. 2.9: Страница компонентного анализа, панель инструментов.

1. меню взаимодействия с загруженными файлами, описанное ранее;
2. меню выбора системы координат, где предоставлен выбор между системой координат образца (CORE), географической системой координат (GEO) и стратиграфической (STRAT);

3. меню выбора применяемого к текущим данным статистического метода, где предоставлен выбор между классическим методом главных компонент (PCA), методом главных компонент с привязкой к началу координат (PCA0), метод пересечения кругов перемагничивания (GC) и метод пересечения кругов перемагничивания с нормированием длин исходных векторов (GCN);
4. кнопка открытия модального окна, в котором представлены результаты применения статистических методов по отношению ко всем загруженным на данную страницу файлам в рамках текущей сессии;
5. меню скрытия и отображения шагов магнитной чистки (текущего файла).

Первые два элемента на панели инструментов не требуют дополнительного описания, однако все последующие описаны далее в деталях.

Меню выбора статистического метода и скрытия/отображения шагов имеют принципиально одинаковую внутреннюю структуру: скрытие шагов, как и применение к определённым шагам определённого статистического метода, работает только с одним, одинаковым для обоих элементов меню, параметром — выбранными шагами магнитной чистки. Выбор шагов магнитной чистки может быть осуществлён тремя способами (рис. 2.10):



(2.10.1) Выбор шагов через окно ввода.



(2.10.2) Выбор шагов через таблицу.

(2.10.3) Выбор шагов через график.

Рис. 2.10: Страница компонентного анализа, различные способы выбора шагов (направлений).

1. выбор через специальное модальное окно ввода, которое появляется в случае если был выбран статистический метод или скрытие шагов, и при этом шаги ещё не были выбраны (рис. 2.10.1);
2. выбор через таблицу со входными данными, посредством взаимодействия с первым столбцом таблицы, в котором есть специальные поля(рис. 2.10.2);
3. выбор через график, путём захвата требуемых шагов в область, вызываемую зажатием левой клавиши мыши на графике и изменяемую последующим перемещением курсора по области графика (рис. 2.10.3).

Результатом применения функции скрытия точек является их скрытие со всех графиков, а также добавление специального характерного визуального оформления скрытых точек в таблице (рис. 2.11). При этом особенностью скрытых точек является то, что они не могут быть выбраны, поскольку у них нет порядковых номеров, по которым производится выбор.

The screenshot shows a data table with various columns: ID, №, Step, Dgeo, Igeo, Dstrat, Istrat, and MA. The first column contains icons for filtering and selecting rows. Rows 1 through 6 are listed, with rows 3 and 5 having an eye icon next to their selection checkboxes, indicating they are hidden.

		ID	№	Step	Dgeo	Igeo	Dstrat	Istrat	MA
<input type="checkbox"/>		1	-	T020	64.7	39.0	64.6	18.0	6.57
<input type="checkbox"/>		2	-	M001	68.3	78.0	65.7	57.0	2.37
<input type="checkbox"/>		3	1	M001	68.3	77.9	65.7	56.9	2.37
<input type="checkbox"/>		4	2	M1.5	67.7	77.6	65.5	56.6	2.35
<input type="checkbox"/>		5	3	M002	66.7	77.6	65.1	56.6	2.32
<input type="checkbox"/>		6	-	M2.5	64.8	76.2	64.4	55.2	2.32

Рис. 2.11: Страница компонентного анализа, пример отображения скрытых точек (шагов, направлений) в таблице со входными данными.

Результатом применения любой из функций статистической обработки данных является расчёт соответствующих статистических параметров и отображение их в специальной таблице, располагающейся между описанными ранее таблицами со входными данными (рис. 2.12).

Все статистические параметры, полученные как результат применения к данным того или иного статистического метода, отображаются, помимо описанной выше таблицы, также и в специальной общей таблице, доступной из панели управления по нажатию на кнопку "ПО ВСЕМ ФАЙЛАМ". При нажатии на эту кнопку пользователю открывается модальное окно (рис. 2.13), в котором находится таблица, содержащая в себе отсортированные по файлам выделенные компоненты намагниченности (результаты применения статистических методов

Label	Code	StepRange	N	Dgeo	Igeo	Dstrat	Istrat	MAD	
Cau1_1	pca0	M001-M030	21	69.1	75.9	66.2	54.9	2.9	□

Рис. 2.12: Страница компонентного анализа, таблица с параметрами, рассчитанными после применения любой из доступных функций статистической обработки данных.

на странице PCA), а также поле ввода имени файла, который может быть экспортирован из этой таблицы. Экспорт может быть произведен как в классических форматах: .dir, .pmm, так и в .csv и .xlsx с аналогичной структурой.

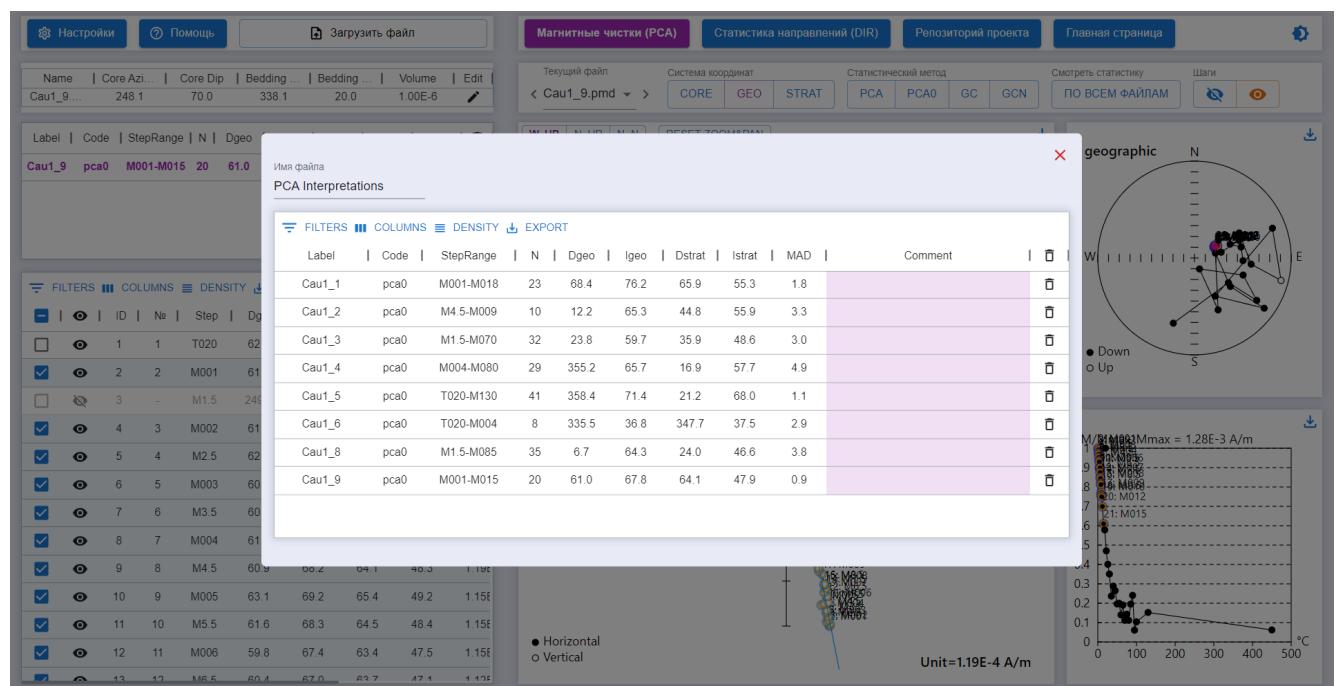


Рис. 2.13: Страница компонентного анализа, итоговая таблица с параметрами, рассчитанными после применения любой из доступных функций статистической обработки данных: координаты среднего направления в географической и стратиграфической системах координат (Dgeo, Igeo), (Dstrat, Istrat) и максимальным угловым отклонением MAD. Данные в таблице представлены по всем открытым файлам.

2.3. Страница статистики направлений

Страница статистики направлений (рис. 2.14) предназначена для работы с выделенными компонентами намагниченности, а также с любыми производными от них данными, представленными в виде трехмерных векторов в сферической системе координат.

На вход принимаются файлы в форматах .dir (рис. 2.15) и .pmm (рис. 2.16), а также их структурные аналоги в .csv и .xlsx форматах. Процесс импорта аналогичен таковому на

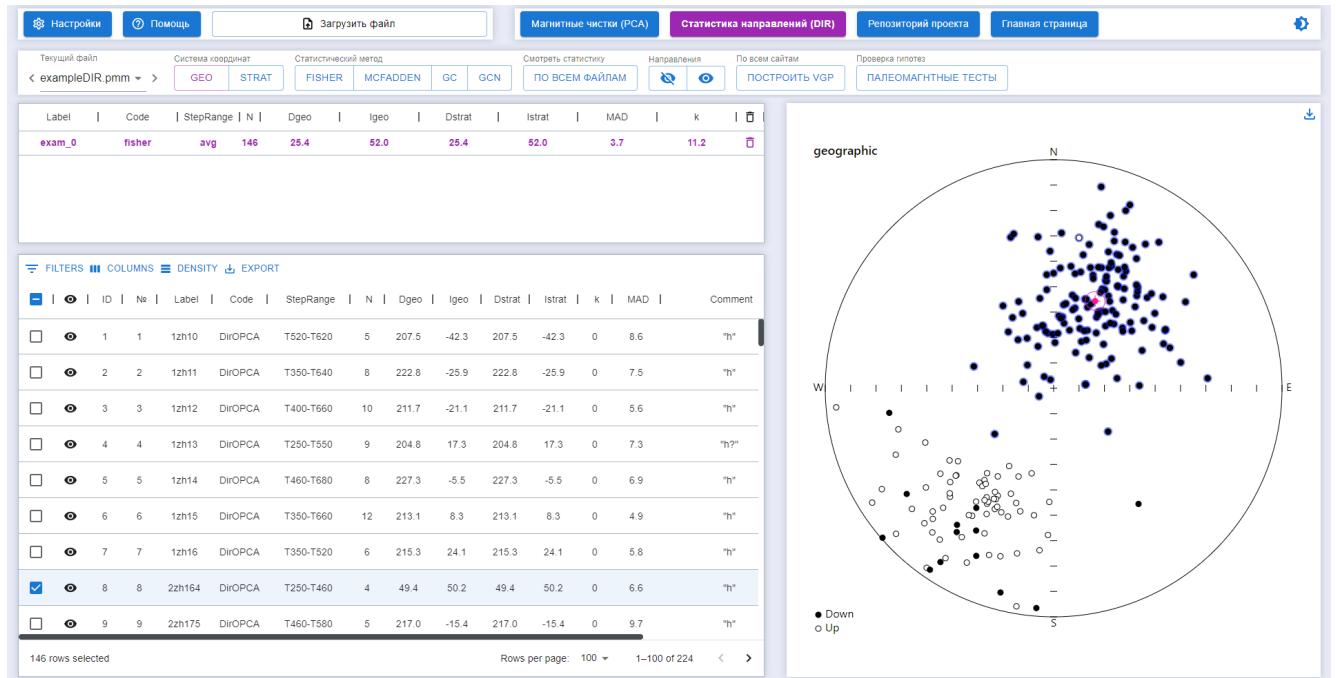


Рис. 2.14: Страница статистики направлений.

странице компонентного анализа — модальное окно импорта при попадании пользователя на страницу статистики направлений без загруженных файлов, кнопка загрузки в верхнем левом углу страницы и возможность перемещения файлов для загрузки непосредственно поверх приложения.

1	477	DiroKir	T460-T565	5	334.9	62.7	334.9	62.7	2.0	h
2	478	DiroKir	T430-T565	6	338.0	67.5	338.0	67.5	1.7	h
3	479	DiroKir	T430-T545	5	342.2	53.3	342.2	53.3	1.9	h
4	480	DiroKir	T520-T580	4	355.0	59.2	355.0	59.2	0.9	h
5	481	DiroKir	T460-T565	5	344.7	58.6	344.7	58.6	1.5	h
6	484	DiroKir	T490-T580	5	339.4	61.6	339.4	61.6	1.0	h
7	485	DiroKir	T460-T565	5	357.6	65.7	357.6	65.7	1.6	h
8	486	DiroKir	T460-T565	5	355.8	52.4	355.8	52.4	0.7	h
9	487	DiroKir	T460-T565	5	348.0	59.3	348.0	59.3	1.6	h
10	488	DiroKir	T490-T565	4	359.1	59.3	359.1	59.3	1.3	h

Рис. 2.15: Внутренняя структура файла с расширением .dir

```

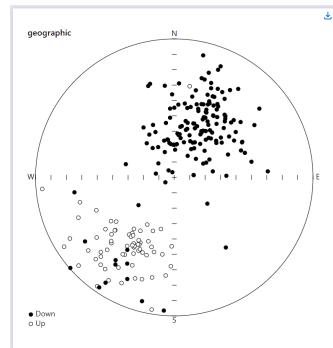
1 """
2 "exmp2645",""2645-05-09"
3 ID, CODE, STERFRANGE, N, Dg, Ig, kg, a95g, Ds, Is, ks, a95s, comment,
4 1zh10, DiroPCA, T520-T620, 5, 207.5, -42.3, 80.1, 8.6, 207.5, -42.3, 80.1, 8.6, "h"
5 1zh11, DiroPCA, T350-T640, 8, 222.8, -25.9, 55.5, 7.5, 222.8, -25.9, 55.5, 7.5, "h"
6 1zh12, DiroPCA, T400-T660, 10, 211.7, -21.1, 54.4, 5.0, 211.7, -21.1, 55.4, 5.6, "h"
7 1zh13, DiroPCA, T250-T550, 5, 204.8, 17.3, 50.1, 7.3, 204.8, 17.3, 50.1, 7.3, "h"
8 1zh14, DiroPCA, T460-T680, 8, 227.3, -5.5, 65.4, 6.9, 227.3, -5.5, 65.4, 6.9, "h"
9 1zh15, DiroPCA, T350-T660, 12, 213.1, 8.3, 79.4, 4.9, 213.1, 8.3, 79.4, 4.9, "h"
10 1zh16, DiroPCA, T350-T520, 6, 215.3, 24.1, 134.4, 5.8, 215.3, 24.1, 134.4, 5.8, "h"
11 2zh14, DiroPCA, T250-T460, 4, 49.4, 50.2, 194.7, 6.6, 49.4, 50.2, 194.7, 6.6, "h"
12 2zh17, DiroPCA, T460-T580, 5, 217.0, -15.4, 63.2, 9.7, 217.0, -15.4, 63.2, 9.7, "h"
13 2zh18, DiroPCA, T350-T580, 7, 205.2, -32.2, 134.4, 5.8, 205.2, -32.2, 134.4, 5.8, "h"
14 2zh177, DiroPCA, T580-T680, 6, 182.2, -32.2, 134.4, 5.8, 182.2, -32.2, 134.4, 5.8, "h"
15 2zh178, DiroPCA, T550-T680, 7, 210.0, -37.5, 105.6, 5.9, 210.0, -37.5, 105.6, 5.9, "h"
16 2zh179, DiroPCA, T400-T660, 11, 205.5, -26.7, 394.7, 2.3, 205.5, -26.7, 394.7, 2.3, "h"
17 1zh17a, DiroPCA, T350-T520, 6, 281.8, 77.8, 296.0, 3.9, 281.8, 77.8, 296.0, 3.9, "h"
18 1zh17b, DiroPCA, T350-T460, 4, 234.3, 18.7, 213.6, 6.3, 234.3, 18.7, 213.6, 6.3, "h"
19 1zh21, DiroPCA, T300-T580, 9, 212.9, 33.9, 20.7, 11.6, 212.9, 33.9, 20.7, 11.6, "h"
20 1zh22, DiroPCA, T400-T550, 6, 1.7, 72.0, 1552.6, 1.7, 1.7, 72.0, 1552.6, 1.7, "h"
21 1zh26, DifFish, T460-T550, 4, 215.3, -3.4, 90.7, 9.7, 215.3, -3.4, 90.7, 9.7, "h"
22 1zh27, DiroPCA, T400-T520, 5, 220.3, -38.3, 158.3, 6.1, 220.3, -38.3, 158.3, 6.1, "h"

```

Рис. 2.16: Внутренняя структура файла с расширением .pmm

Загруженные данные представлены на странице в таблице и на стереограмме (рис. 2.17). Таблица находится в левом нижнем углу страницы (рис. 2.17.1) и имеет те же возможности, что и другие таблицы в PMTools, а также позволяет экспорттировать данные в любом из следующих форматов: .dir, .pmm, .csv, .xlsx. Стереограмма расположена в правой части страницы (рис. 2.28.3).

(2.17.1) Таблица с входными данными.



(2.17.2) Стереограмма, отображающая загруженные данные.

Рис. 2.17: Страница статистики направлений, отображение данных импортированного файла.

Взаимодействие с данными воспроизводится в полной аналогии с тем, как это сделано на странице РСА. Имеется панель управления (рис. 2.18), обладающая следующими функциями:

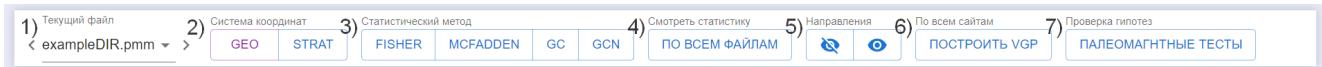


Рис. 2.18: Страница статистики направлений, панель инструментов.

1. меню взаимодействия с загруженными файлами, позволяющее переключаться между ними и удалять их из памяти приложения;
2. меню выбора системы координат, где предоставлен выбор между географической системой координат (GEO) и стратиграфической (STRAT);
3. меню выбора применяемого к текущим данным статистического метода, где предоставлен выбор между статистикой Фишера (FISHER), модифицированной статистики Фишера для учёта данных, представленных в виде нормалей к кругам перемагничивания (MCFADDEN), метод пересечения кругов перемагничивания (GC) и метод нормализованный пересечения кругов перемагничивания (GCN);
4. кнопка открытия модального окна, в котором представлены результаты применения статистических методов по отношению ко всем загруженным на данную страницу файлам в рамках текущей сессии;
5. меню скрытия и отображения направлений;
6. кнопка открытия модального окна, в котором представлен интерфейс для загрузки данных по сайтам (точкам отбора образцов) и расчёта по этим данным, в совокупности с загруженными на страницу направлениями, виртуальных геомагнитных полюсов;

7. кнопка открытия модального окна, в котором пользователь может применить к загруженным направлениям различные палеомагнитные статистические тесты.

Выбор направлений для статистических методов и скрытия производится в полной аналогии с тем, как это сделано на странице PCA: имеется возможность производить выбор через таблицу, через стереограмму, и через окно ввода номеров направлений.

Результаты применения статистических методов записываются в таблицу, расположенную над таблицей со входными данными (рис. 2.19). А также имеется таблица с этими же рассчитанными статистическими параметрами, но уже содержащая в себе эти данные по всем файлам в текущей сессии (рис. 2.20). Данные из этой таблицы можно экспортовать как .dir, .pmm, .csv и .xlsx файлы.

Label	Code	StepRange	N	Dgeo	Igeo	Dstrat	Istrat	MAD	k	
exam_0	fisher	avg	146	25.4	52.0	25.4	52.0	3.7	11.2	✖
exam_1	mcfadden	avg	78	215.5	-24.8	215.5	-24.8	5.7	8.8	✖

Рис. 2.19: Страница статистики направлений, таблица с параметрами, рассчитанными после применения любой из доступных функций статистической обработки данных.

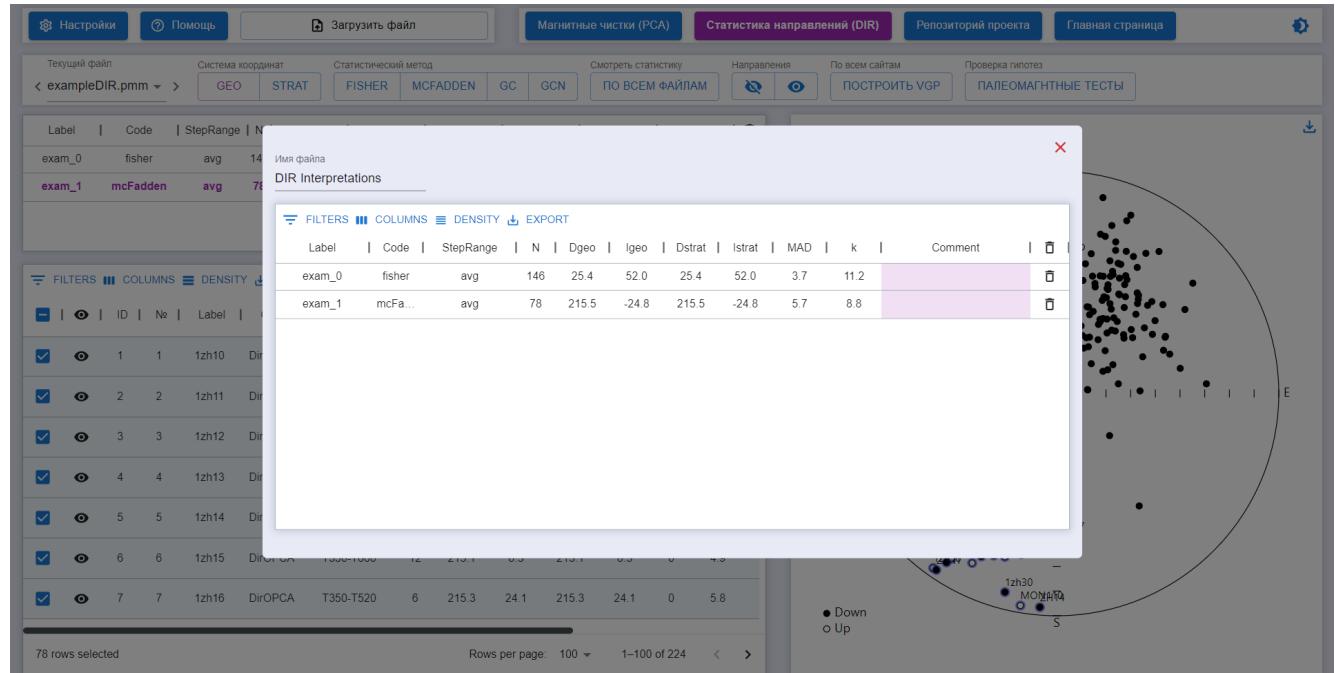


Рис. 2.20: Страница статистики направлений, итоговая таблица с параметрами, рассчитанными после применения любой из доступных функций статистической обработки данных: координаты среднего направления в географической и стратиграфической системах координат (Dgeo, Igeo), (Dstrat, Istrat) и максимальным угловым отклонением MAD или углом 95% доверия a95 и кучностью k. Данные в таблице представлены по всем открытым файлам.

2.3.1. Модуль работы с виртуальными геомагнитными полюсами

Загрузив на страницу статистики направлений файл с данными по направлениям, которые являются средними по сайтам (точкам отбора образцов), можно воспользоваться модулем расчёта виртуальных геомагнитных полюсов (Virtual Geomagnetic Pole, VGP).

Окно модуля работы с виртуальными геомагнитными полюсами является модальным и открывается через соответствующую кнопку на панели инструментов, которая была описана ранее. Интерфейс для работы с виртуальными геомагнитными полюсами в этом окне представлен тремя блоками (рис. 2.21):

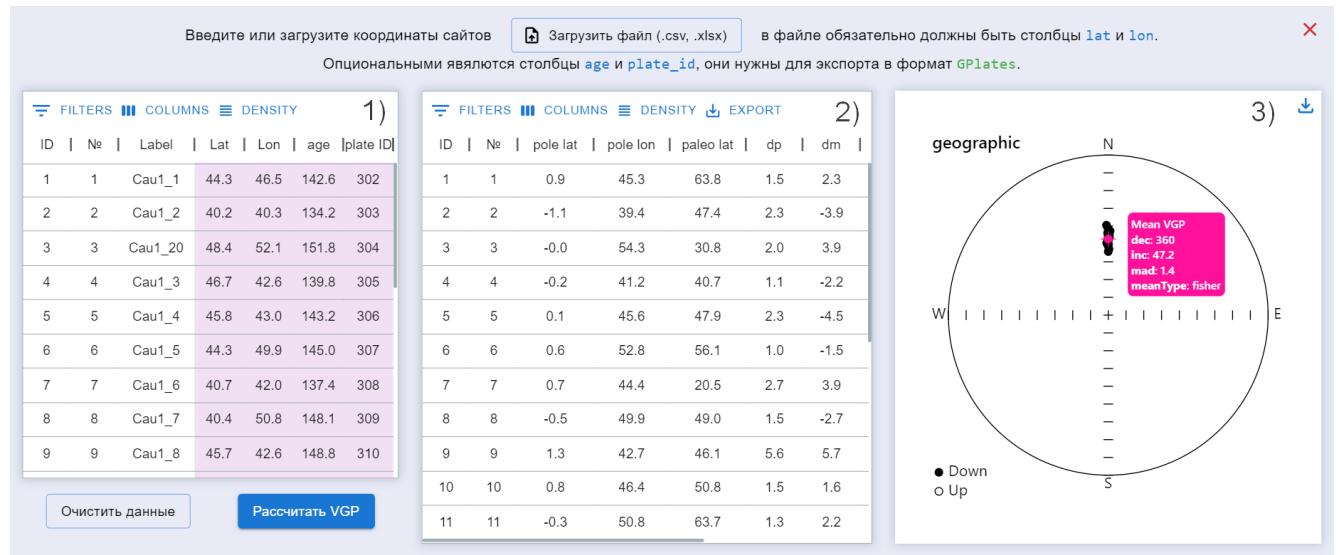


Рис. 2.21: Страница статистики направлений, окно для работы с виртуальными геомагнитными полюсами. Делится на три блока: 1) таблица с входными данными по сайтам, где можно ввести их координаты, предполагаемый возраст и ID плит, а также кнопки по этой таблицей, позволяющие рассчитать VGP по данным из этой таблицы или очистить все введённые и рассчитанные данные; 2) таблица с рассчитанными VGP, данные из которой можно экспорттировать в следующих форматах: .vgp, .gpml, .csv и .xlsx; 3) стереограмма, на которой отображаются рассчитанные VGP — в качестве координат используются координаты рассчитанных VGP, где широта выступает в роли наклонения, а долгота выступает в роли склонения. На стереограмме автоматически отображается среднее направление, рассчитанное по статистике Фишера.

Ввод данных по сайтам можно воспроизвести и через специальную кнопку импорта, расположенную над описанными тремя блоками. Импортированы могут быть данные в форматах .csv и .xlsx. Чтобы импортировать координаты, файл должен содержать в себе следующие поля: lat, lon. Импорт координат обязателен для расчёта VGP. Для импорта предполагаемого возраста плиты и её ID необходимо, чтобы импортируемый файл содержал в себе поля age и plate_id соответственно. Импорт этих полей необходим для экспорта рассчитанных VGP в формат .gpml.

Экспортируемые из этого модуля данные могут быть напрямую импортированы в такие программы, как GMAP [Torsvik, 1998] и GPlates [Muller, 2018].

2.3.2. Модуль работы с палеомагнитными тестами

К данным, полученным из загруженных на страницу статистики направлений файлов, можно применить различные палеомагнитные статистические тесты, описанные в главе 2. В PMTools для этой цели реализован интерфейс, доступный в специальном модальном окне, которое можно открыть из панели управления.

Окно модуля работы с палеомагнитными тестами позволяет пользователю применять к данным следующие палеомагнитные статистические тесты:

1. тест конгломератов (рис. 2.22) с автоматическим расчётом, расчёт производится по всем видимым направлениям из текущего открытого файла;
2. тест обращения классический [McFadden and McElhinny, 1990] с ручным вводом входных данных (рис. 2.23);
3. тест обращения классический [McFadden and McElhinny, 1990], автоматически рассчитывающийся с параллельным расчётом и отображением результатов bootstrap-версии теста обращения (рис. 2.24), расчёт производится по всем видимым направлениям из текущего открытого файла;
4. bootstrap-версия теста складки (рис. 2.25), расчёт производится по всем видимым направлениям из текущего открытого файла.

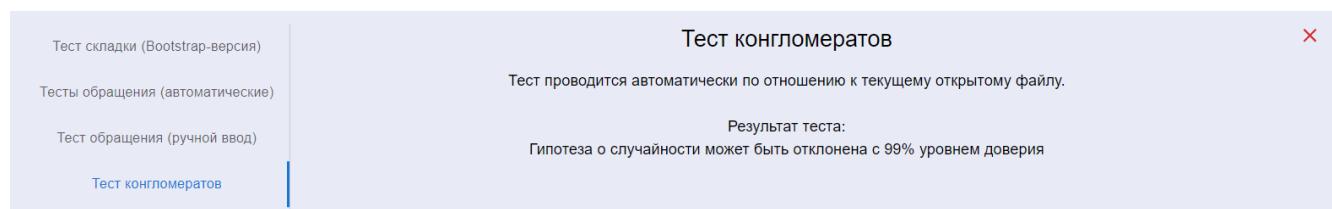


Рис. 2.22: Страница статистики направлений, интерфейс теста конгломератов.

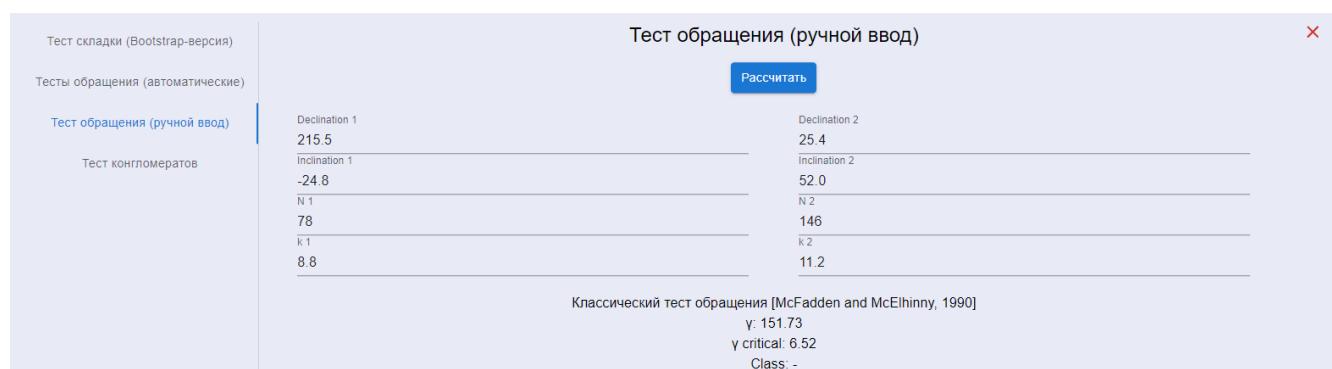


Рис. 2.23: Страница статистики направлений, интерфейс теста обращения с ручным вводом данных.

Для каждого теста приводится минимальная необходимая теоретическая информация, необходимая для понимания результата теста. А графики, получаемые в ходе проведения теста, если таковые имеются, могут быть экспортированы.

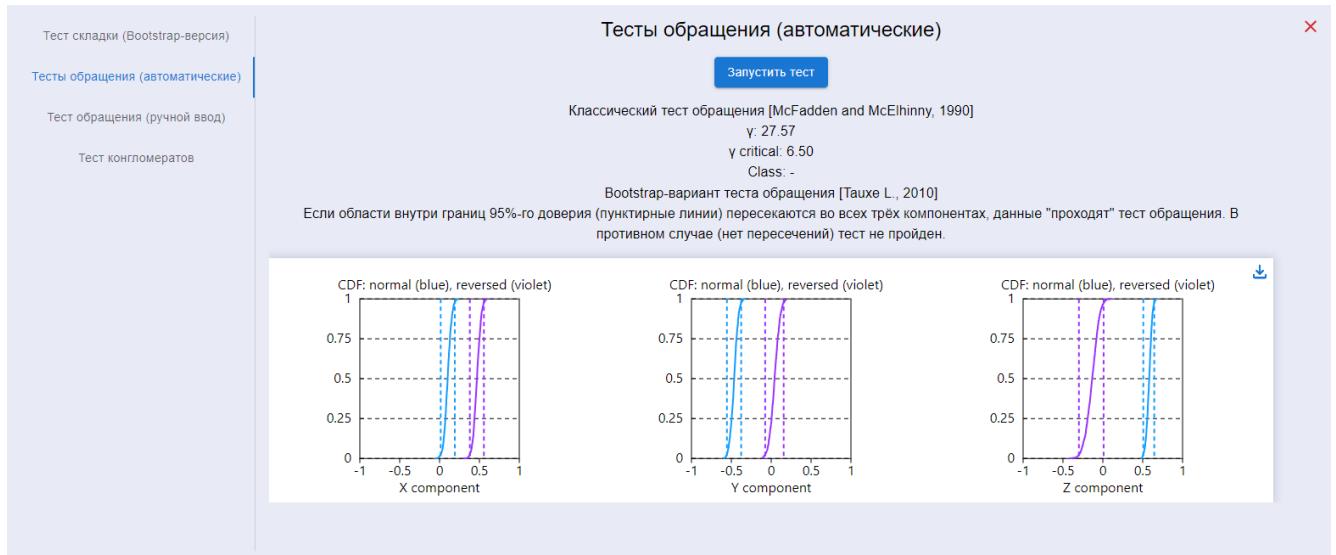


Рис. 2.24: Страница статистики направлений, интерфейс тестов обращения, выполняющихся по данным текущего открытого файла.

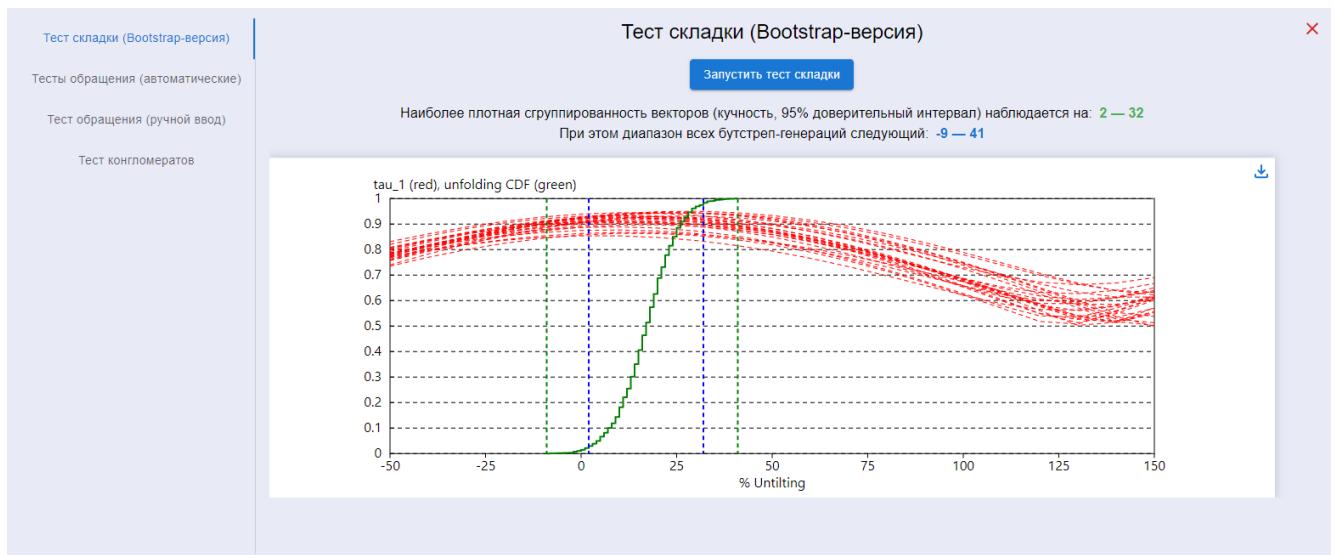


Рис. 2.25: Страница статистики направлений, интерфейс теста складки, модифицированного методом bootstrap.

2.4. Настройка программы, горячие клавиши и графика

PMTools имеет ряд настроек, которые могут быть полезны пользователям для более комфортной работы.

Одна из главных настроек — это цветовая тема приложения, которая может быть либо светлой (рис. 2.26), либо тёмной (рис. 2.27). Тема по умолчанию устанавливается такой же, какая выбрана в операционной системе пользователя. При этом тему можно поменять вручную, для этого имеется кнопка-переключатель в правом верхнем углу любой из страниц PMTools.

В PMTools пользователь может вызывать различные функции посредством горячих кла-

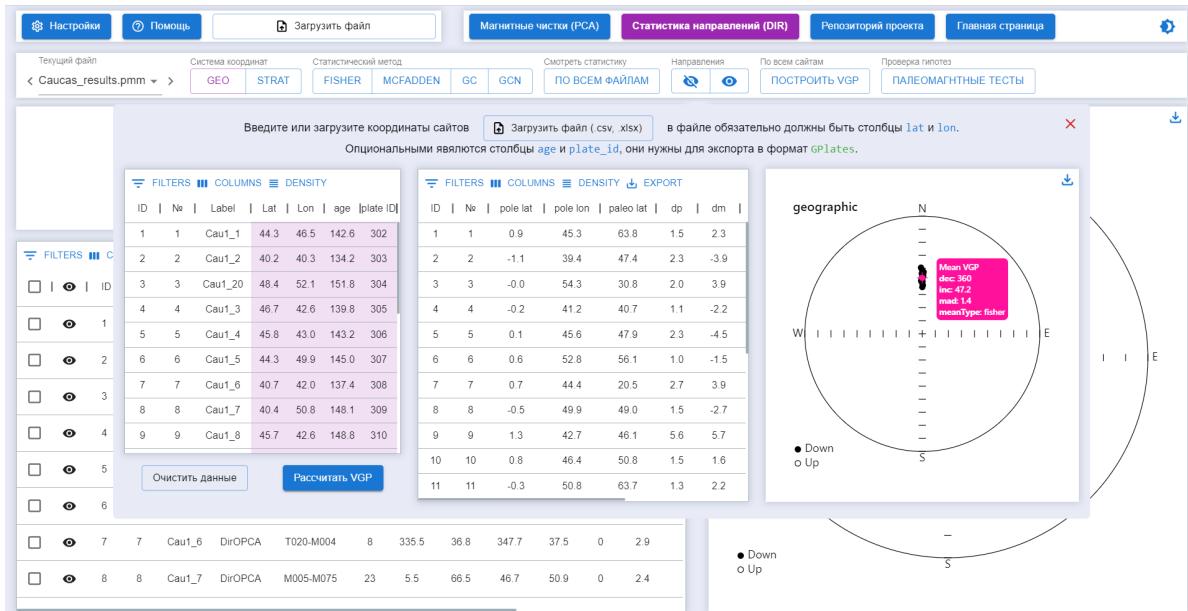


Рис. 2.26: PMTools, пример экрана в светлой цветовой теме.

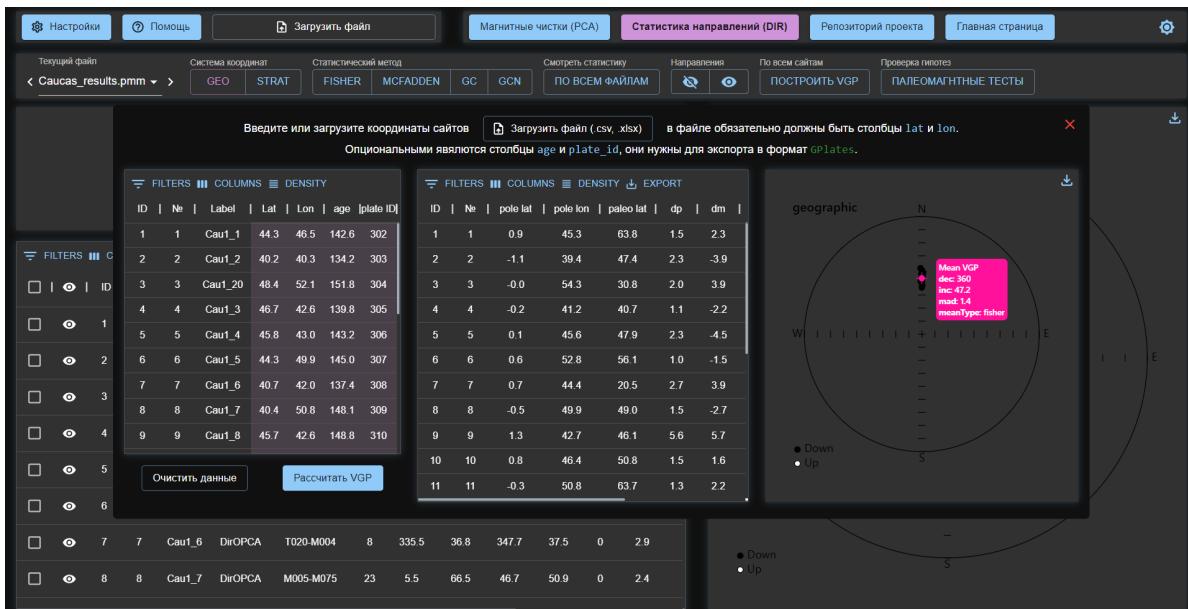
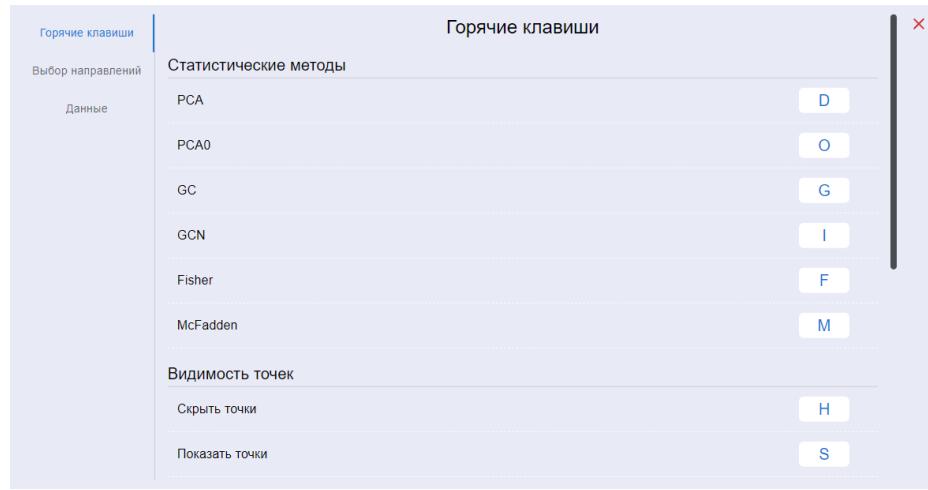


Рис. 2.27: PMTools, пример экрана в тёмной цветовой теме.

виш, список и настройки которых (рис. 2.28) находятся в модальном окне, доступном при нажатии на клавишу "Настройки" в левом верхнем углу любой из страниц приложения. Этот список находится в окне настроек по той причине, что он настраиваемый. Пользователь может изменить горячие клавиши на те, которые ему более удобны, и сохранить это на своём устройстве.

Горячие клавиши также отображаются у тех кнопок, для которых они имеются, если навести на такую кнопку курсор и подождать 1 секунду (рис. 2.29).

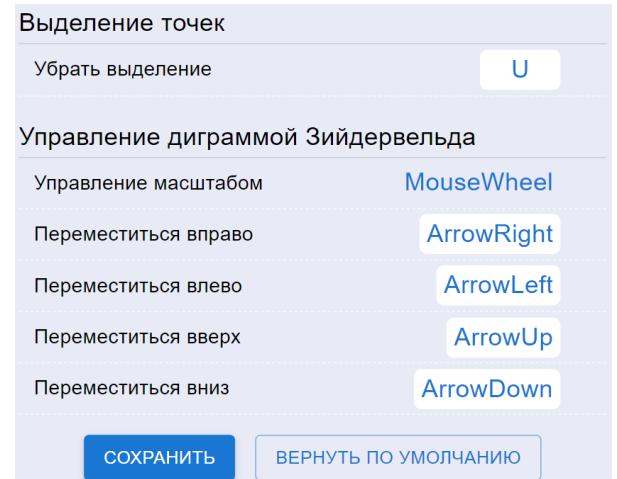
Помимо горячих клавиш, пользователь может в окне настроек задать цветовую тему по умолчанию, если он хочет, чтобы его тема по умолчанию не зависела от темы по умолчанию в его операционной системе.



(2.28.1) Окно настроек с открытой вкладкой горячих клавиш.



(2.28.2) Горячие клавиши в PMTools, часть первая.



(2.28.3) Горячие клавиши в PMTools, часть вторая.

Рис. 2.28: Окно настроек горячих клавиш.

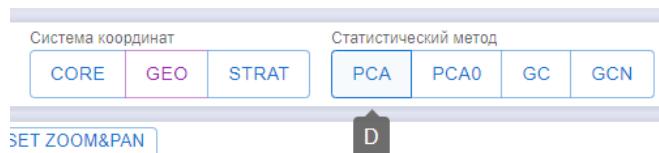


Рис. 2.29: PMTools, пример отображения всплывающей подсказки о горячей клавише.

Также имеются настройки у всех графиков в PMTools. После нажатия правой клавиши мыши по графику, отобразится всплывающее окно настроек (рис. 2.30), позволяющее изменить следующие настройки отображения графиков:

1. Tooltips — если активировано, то пользователь видит всплывающие подсказки при наведении курсора на точки на графиках;
2. Ticks — если активировано, то все деления на графике отображаются;

3. Annotations — если активировано, то все подписи отображаются у выделенных точек;
4. Show ID — если активировано, то у подписей в начале отображается ID точки;
5. Show label — если активировано, то у подписей в конце отображается название (label).

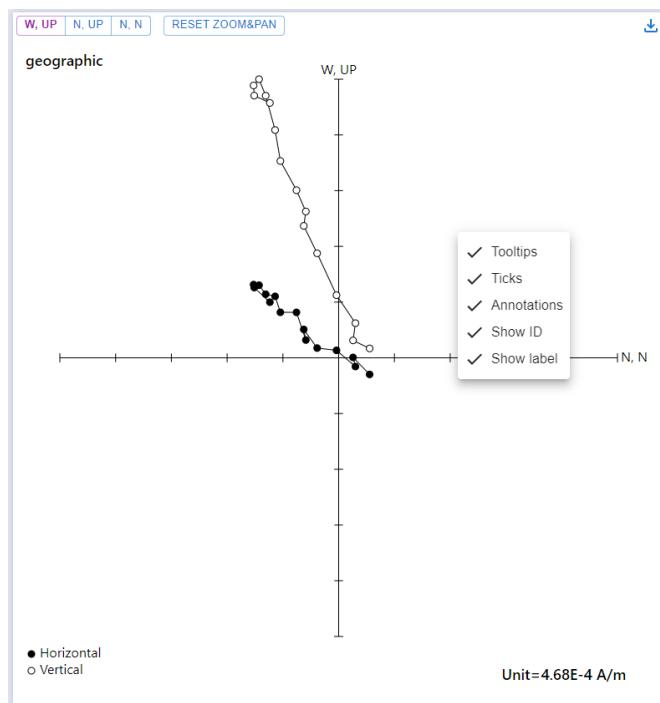


Рис. 2.30: PMTools, меню настроек графика.

2.5. Выводы

В главе рассмотрены все ключевые инструменты и возможности PMTools. А также даны их описания и способы взаимодействия с ними пользователя.

Глава 3. Демонстрация работы PMTools на примере реальных палеомагнитных данных

Для демонстрации работы PMTools было решено рассмотреть набор данных, представленный 528 ориентированными палеомагнитными образцами из естественных обнажений верхней части Норильской лавовой толщи Сибирских траппов. Лабораторная обработка коллекции выполнена лично автором работы.

3.1. Лабораторные исследования

В рамках работы автором были произведены лабораторные исследования остаточной намагниченности 528 образцов из 26 сайтов Норильских траппов в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН для проведения детальных исследований структуры магнитного поля Земли на границе палеозоя и мезозоя.



Рис. 3.1: Температурная чистка образцов в немагнитной печи MMTD80

Для изучения остаточной намагниченности образцы подвергались магнитным чисткам: температурной магнитной чистке при помощи немагнитной печи Magnetic Measurements MMTD80 (рис. 3.1) и криогенного (SQUID) магнитометра 2G Enterprises (рис. 3.2). После температурной магнитной чистки остаточная намагниченность образцов измерялась при помощи спин-магнитометра AGICO JR-6 (рис. 3.3).



(3.2.1) Немагнитная комната, в дальнем правом углу которой расположен криогенный магнитометр



(3.2.2) Автоматизированная система подачи образцов криогенного магнитометра ИФЗ РАН

Рис. 3.2: Криогенный (SQUID) магнитометр (2G Enterprises)

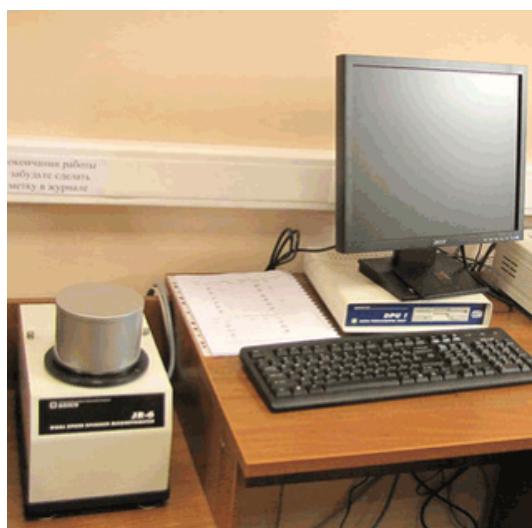


Рис. 3.3: Спин-магнитометр JR-6 (AGICO)

3.2. Компонентный анализ

В результате магнитных чисток образцов, для каждого из них был получен файл с результатами чисток. Все файлы были представлены в формате .pmd.

Для проведения компонентного анализа все файлы обрабатывались PMTools на странице компонентного анализа (рис. 3.4). В отличие от многих других программ, где пользователю надо по отдельности загружать и обрабатывать каждый файл, в PMTools пользователь может загрузить сразу несколько файлов. Потому файлы загружались группами по коллекциям, где каждая коллекция соответствовала одному из 26 сайтов.

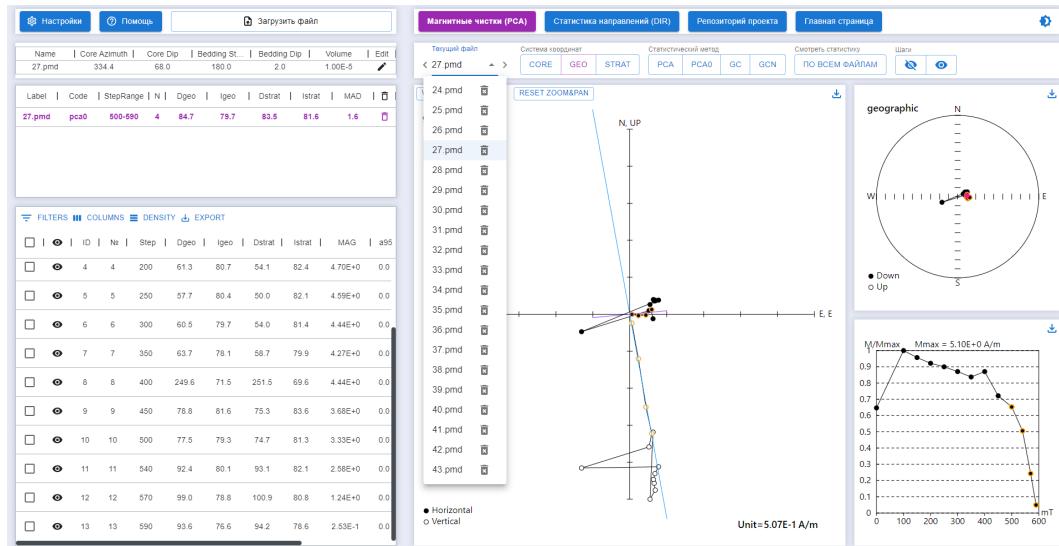


Рис. 3.4: Пример работы на странице компонентного анализа: вычисленное направление компоненты намагниченности отображается на диаграмме Зийдервельда, стереограмме и в таблице, при этом открыт список загруженных файлов.

Вычисление компонент остаточной намагниченности представляет собой следующий процесс:

1. визуально на диаграмме Зийдервельда выделяются прямолинейные или близкие к таким участки — на них направления векторов намагниченности неизменно в ходе чистки. Выделенные участки могут быть аппроксимированы, и результатом аппроксимации будет компонента намагниченности.
2. если выделяется один участок, то есть два варианта:
 - (a) если участок конечный (заканчивается на последнем шаге чистки), то аппроксимация производится методом главных компонент с центром масс в начале координат (кнопка PCA0);
 - (b) если участок не конечный, то для аппроксимации используется метод главных компонент без каких либо изменений (кнопка PCA).
3. если выделяются два участка и более, то можно воспользоваться методом пересечения кругов перемагничивания, причём выделяются два варианта:
 - (a) если необходимо учесть различие в длинах векторов аппроксимируемой группы, тем самым придав им веса, соответствующие их длинам, то для аппроксимации используется метод кругов перемагничивания без каких либо изменений (кнопка GC);
 - (b) если различия между длинами векторов необходимо нивелировать, приняв тем самым веса векторов за единицы, то для аппроксимации используется метод кругов перемагничивания с нормализацией (кнопка GCN).

Как только компонента вычислена для образца, она автоматически сохраняется в память программы и после можно переключиться на следующий образец из списка загруженных.

Выделив компоненты для всех образцов с сайта, можно экспортовать итоговую таблицу со всеми выделенными компонентами, перед этим, при необходимости, добавив в неё комментарии (рис. 3.5). Доступные форматы для экспорта — .dir, .pmm, .csv, .xlsx.

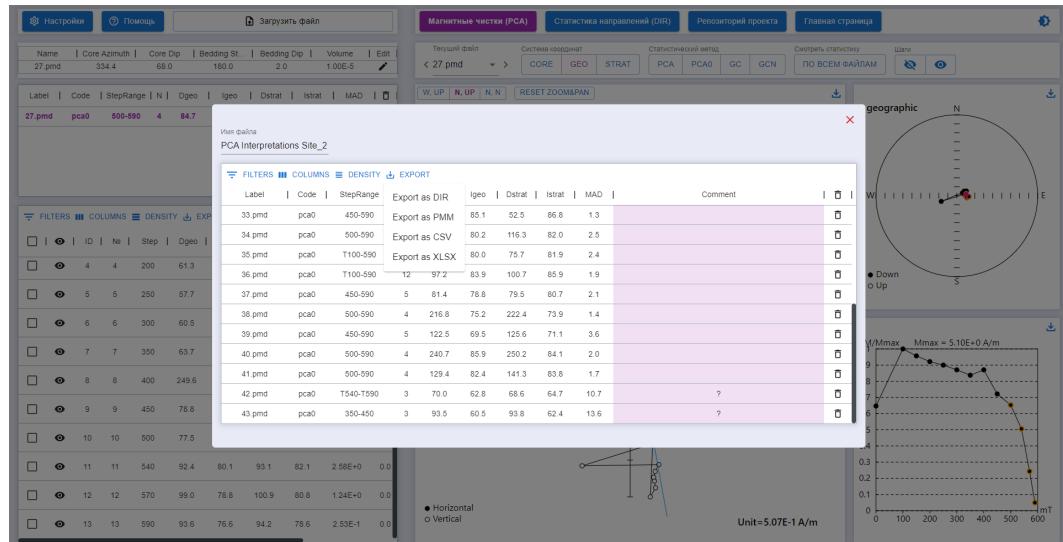


Рис. 3.5: Пример работы на странице компонентного анализа: экспорт вычисленных компонент.

3.3. Вычисление средних направлений

Полученные после этапа компонентного анализа файлы с выделенными компонентами намагниченности можно открыть и продолжить анализировать на странице DIR (рис. 3.6).

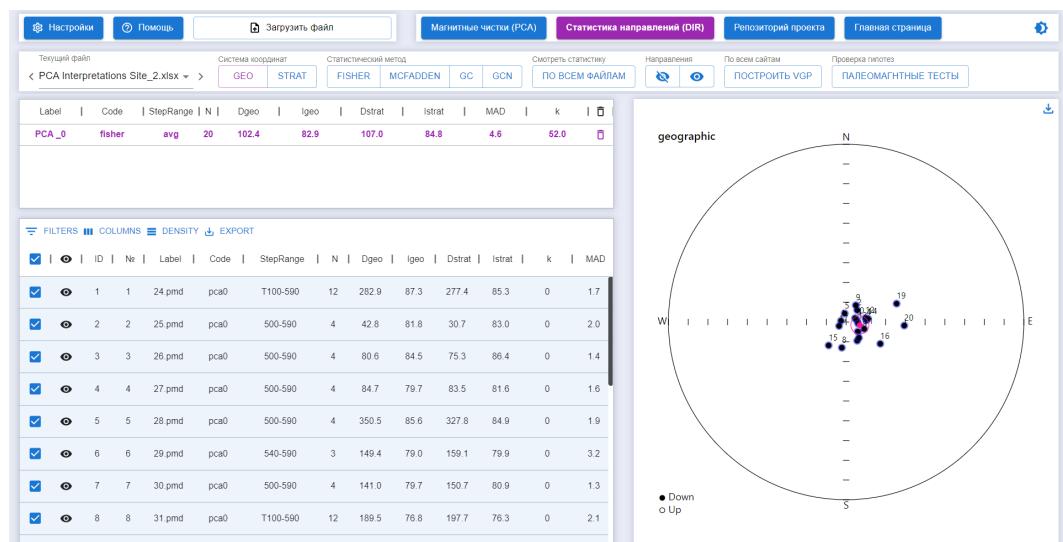


Рис. 3.6: Пример работы на странице статистики направлений: рассчитанное среднее по Фишеру (красным цветом).

Процесс анализа ничем не отличается по своей сути от такового на странице компонентного анализа: пользователю так же надо выбирать направления, убирать выбросы, находить средние по сайтам, а итоговую таблицу со средними направлениями по сайтам экспортировать для дальнейшего вычисления виртуальных геомагнитных полюсов. Доступные форматы для экспорта — .dir, .pmm, .csv, .xlsx (рис. 3.7).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	id	Code	StepRange	N	Dgeo	Igeo	Dstrat	Istrat	K	MAD	Comment
2	exam_0	fisher	avg		146	25.4	52	25.4	52	11.2	3.7 example
3	exam_1	fisher	avg		80	215.2	-23.3	215.2	-23.3	6.9	6.5 test
4	exam_2	fisher	avg		224	358.9	73.4	358.9	73.4	1.5	12.8
5	exam_3	fisher	avg		158	24.8	57.3	24.8	57.3	5.5	5.3
6	exam_4	fisher	avg		66	215.9	-33.5	215.9	-33.5	12.9	5.1

Рис. 3.7: Excel-таблица со средними направлениями, экспортированной со страницы статистики направлений как .xlsx файл.

3.4. Вычисление виртуальных геомагнитных полюсов

Файл со средними направлениями по сайтам загружается в PMTools снова на страницу DIR, однако инструменты на самой странице уже не нужны, поскольку теперь задача состоит в расчёте VGP. Для этого пользователю необходимо нажать на кнопку "ПОСТРОИТЬ VGP" открывшую модальное окно расчёта и построения VGP (рис. 3.8).

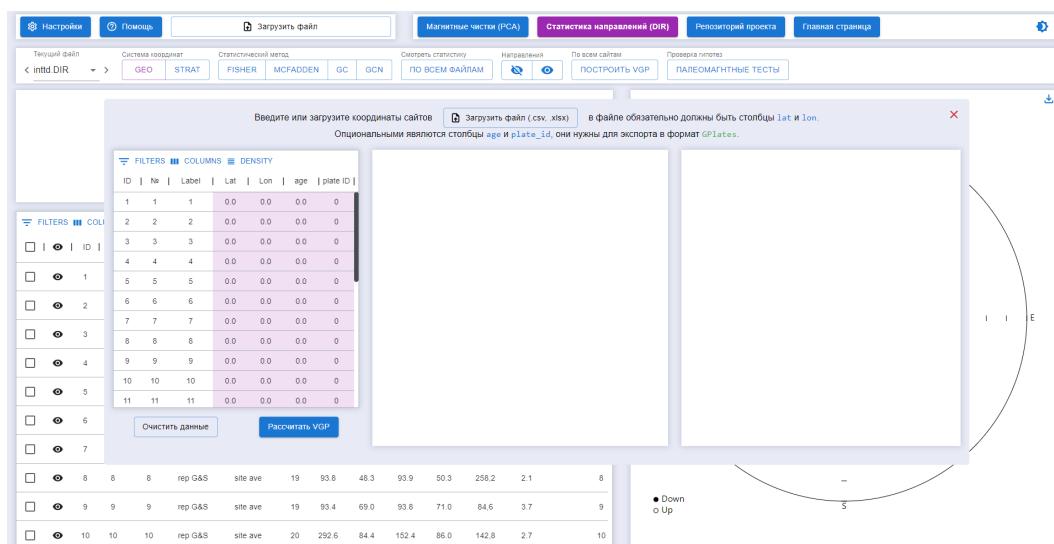


Рис. 3.8: Пример работы на странице статистики направлений: модальное окно расчёта и построения VGP.

Изначально загруженные данные не имеют в себе всё необходимое для расчёта VGP — нужно дополнитель но внести географические координаты сайтов. Для удобства, внесение можно осуществить непосредственно импортировав в это модальное окно .xlsx файл (рис. 3.9) со столбцами lat и lon, в которых, соответственно, будут широты и долготы сайтов.

	A	B	C	D
1	lat	lon	age	plate_id
2	69.93021	89.11361	251	500
3	69.92941	89.11631	251	500
4	69.92964	89.11681	251	500
5	69.92954	89.11903	251	500
6	69.9088	89.14085	251	500
7	69.89764	89.15353	251	500
8	69.89564	89.15392	251	500
9	69.89432	89.14916	251	500
10	69.89312	89.147	251	500
11	69.88782	88.54805	251	500
12	69.8868	88.65508	251	500
13	69.88595	88.6557	251	500
14	69.88544	88.65649	251	500
15	69.88692	88.66071	251	500
16	69.88701	88.66531	251	500
17	69.88275	88.67703	251	500
18	69.88483	88.68911	251	500
19	69.88433	88.69798	251	500
20	69.88467	88.72967	251	500
21	69.88282	88.74181	251	500
22	69.88489	88.77556	251	500
23	69.874	88.67776	251	500
24	69.62334	88.37507	251	500
25	69.62371	88.3785	251	500
26	69.62421	88.37805	251	500
27	69.62439	88.37826	251	500
28				
29				
30				
31				

Рис. 3.9: Пример работы с VGP: Excel-таблица с дополнительными данными по сайтам.

Также можно добавить столбец age с возрастами сайтов, это позволит в дальнейшем корректно экспортовать файл в формат .vgp. И если помимо столбца age ещё добавить столбец plate_id, в котором указать id плит, то итоговые VGP можно будет корректно экспортировать в формате .gpm1.

Загрузив недостающие данные, можно нажать на кнопку "Рассчитать VGP" и получить таблицу со всеми VGP, а также стереограмму с рассчитанным и отображённым на ней средним VGP (рис. 3.10).

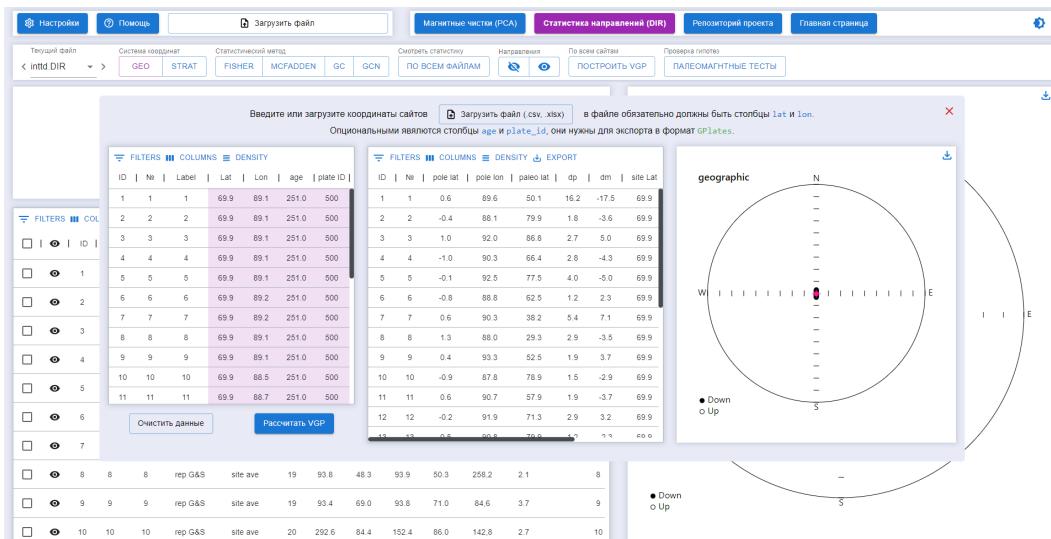


Рис. 3.10: Пример работы с виртуальными геомагнитными полюсами: результат расчёта VGP.

Полученную таблицу можно экспорттировать и открыть, например, в GPlates (рис. 3.11).

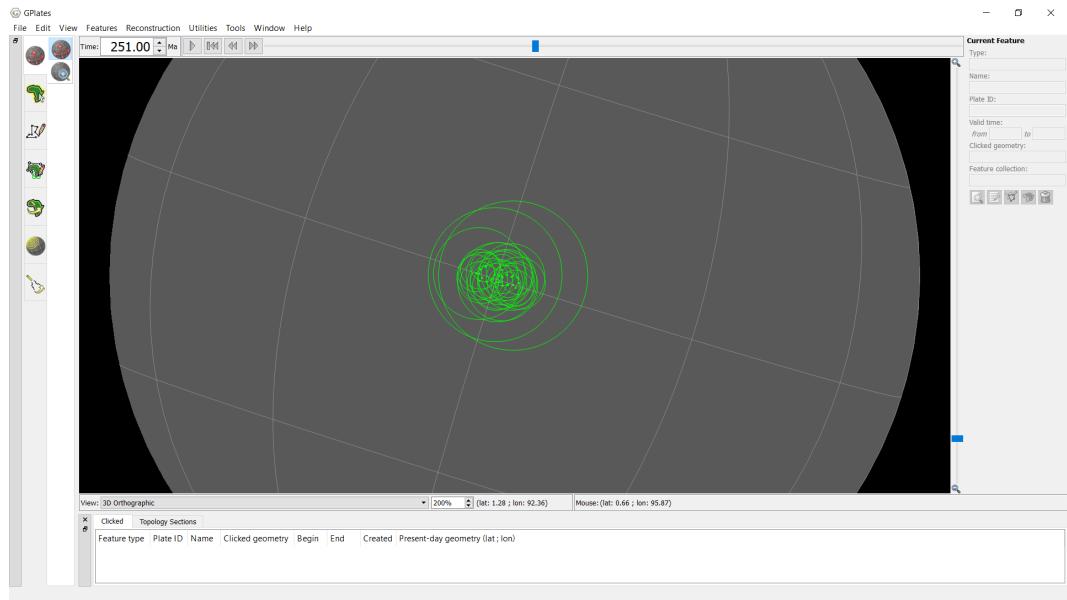


Рис. 3.11: Пример работы с виртуальными геомагнитными полюсами: импорт рассчитанных VGP в программу GPlates.

3.5. Пример использования страницы DIR, тест обращения

Помимо классического набора операций из цикла палеомагнитных статистических операций, который был описан и продемонстрирован выше, пользователь также может проверить при помощи PMTools те или иные гипотезы, воспользовавшись модулем палеомагнитных статистических тестов.

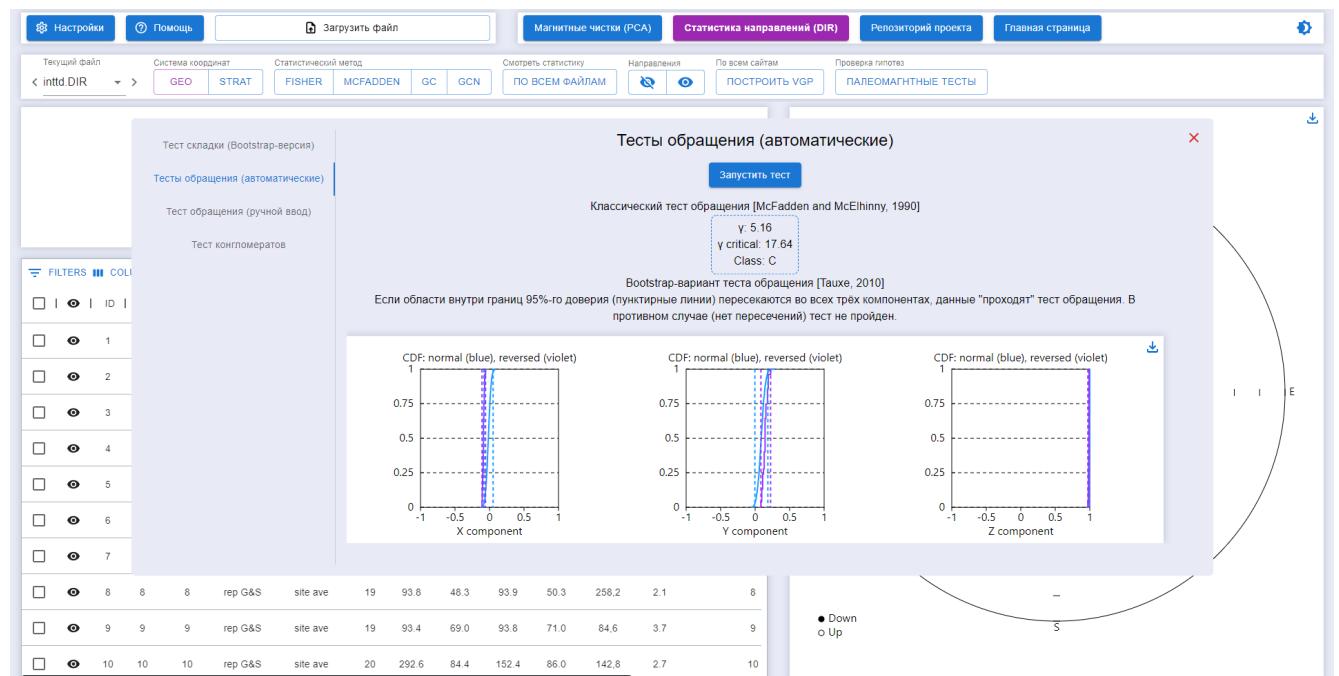


Рис. 3.12: Пример работы с палеомагнитными статистическими тестами: тест обращения.

В случае рассматриваемой коллекции, полезными могут оказаться результаты теста обращения (рис. 3.12). В разделе "Тесты обращения (автоматические)" пользователю достаточно нажать кнопку "Запустить тест", и далее будут рассчитаны по текущему открытому файлу (на странице DIR) два теста обращения — классический и базовый модифицированный при помощи bootstrap. Автоматический расчёт тестов возможен благодаря алгоритму автоматического деления направлений на прямую и обратную полярность.

Как видно по результатам обоих тестов, средние направления для прямой и обратной полярности всех 26 сайтов хорошо различимы (почти антиподальны, $\gamma/\gamma_{cr} = 5.16^\circ/17.64^\circ$), а по классификации соответствуют классу "C". Тест обращения пройдён.

3.6. Выводы

В главе была представлена коллекция, состоящая из 528 ориентированных палеомагнитных образцов из естественных обнажений верхней части Норильской лавовой толщи Сибирских траппов, и продемонстрированы её лабораторные исследования.

Далее был рассмотрен процесс статистического анализа палеомагнитных данных, полученных по результатам лабораторных исследований остаточной намагниченности рассматриваемой коллекции. Представленный процесс анализа палеомагнитных данных включает в себя все этапы полного цикла обработки палеомагнитных данных:

1. компонентный анализ;
2. вычисление средних направлений;
3. вычисление виртуальных геомагнитных полюсов и их экспорт.

Также было рассмотрено применение теста обращения по отношению к имеющимся данным.

Все операции были проведены в программе PMTools, создание которой являлось целью настоящей работы.

Заключение

В ходе работы были выполнены все поставленные задачи:

1. произведён всесторонний анализ всех широко используемых программ для статистической обработки палеомагнитных данных;
2. обозначены наиболее значимые для отечественных исследователей функции, требующие обязательной реализации в будущей программе;
3. изучена вся теоретическая часть выделенных на прошлом этапе функций и способов их программной реализации, а также произведён анализ и последующий выбор имеющихся в свободном доступе технологий, позволяющих реализовать программу в рамках поставленных к ней требований;
4. создана новейшая программа для статистической обработки палеомагнитных данных;
5. проведена демонстрация работы с результатами палеомагнитных исследований в созданной программе.

Таким образом, была достигнута поставленная цель работы — написана новая программа для обработки и визуализации палеомагнитных данных, которая в полной мере удовлетворяет следующим требованиям отечественных палеомагнитологов:

- доступность с любого устройства;
- интуитивный и простой user-friendly интерфейс;
- широкий функционал, не уступающий программам-предшественникам и дополняющий их;
- поддержка наиболее распространённых базовых форматов хранения палеомагнитных данных, как в плане импорта, так и в плане экспорта, и при этом возможность конвертации их в форматы .csv и .xlsx;
- соответствие графиков 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, специальные интерфейсы ввода данных, и возможность управлять программой посредством горячих клавиш.

PMTools находится в активном тестировании со стороны отечественного палеомагнитного сообщества и дорабатывается согласно пожеланиям пользователей. В том числе в программе проводится статистический анализ и визуализация палеомагнитных данных в рамках гранта РНФ № 22-27-00597 "Палеомагнетизм, магнитостратиграфия и питающие провинции пограничного пермо-триасового комплекса Восточно-Европейской платформы", при поддержке которого и разрабатывается PMTools.

В дальнейшем PMTools будет продолжено развитие PMTools и будет осуществляться её поддержка. Также будет проведена работа над документацией кодовой базы, что позволит PMTools развиваться как программе с открытым исходным кодом силами заинтересованных в этом разработчиков.

Список литературы

- [1] Храмов А. Н., Гончаров Г. И. и др. Палеомагнитология. Под ред. Храмова А. Н. – Л.: Недра, 1982. – 312 с.
- [2] Chadima M., Hrouda F. Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer //Travaux Géophysiques. – 2006. – Т. 27. – С. 20-21.
- [3] Cogné J. P. PaleoMac: a Macintosh™ application for treating paleomagnetic data and making plate reconstructions //Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2003. – Т. 4. – №. 1.
- [4] Collinson D. (ed.). Methods in rock magnetism and palaeomagnetism: techniques and instrumentation. – Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] Efron B. Computers and the theory of statistics: thinking the unthinkable //SIAM review. – 1979. – Т. 21. – №. 4. – С. 460-480.
- [6] Enkin R. J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data //Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada. – 1994. – Т. 16. – С. 16.
- [7] Enkin R. J. Paleomagnetism data analysis: Version 4.2 //Geol. Surv. Can., Sidney, BC. – 2004.
- [8] Enkin R. J. The direction–correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies //Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – Т. 212. – №. 1-2. – С. 151-166.
- [9] Jarboe N. A. et al. The online MagIC Database: data archiving, compilation, and visualization for the geomagnetic, paleomagnetic and rock magnetic communities //AGU Fall Meeting Abstracts. – 2012. – Т. 2012. – С. GP31A-1063.
- [10] Kirshvink J. L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data //Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1980. – Т. 62. – №. 3. – С. 699-718.
- [11] Koymans M. R. et al. Paleomagnetism. org: An online multi-platform open source environment for paleomagnetic data analysis. – 2016.
- [12] McElhinny M. W. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism //Geophysical Journal International. – 1964. – Т. 8. – №. 3. – С. 338-340.
- [13] McFadden P. L., McElhinny M. W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism //Geophysical Journal International. – 1990. – Т. 103. – №. 3. – С. 725-729.
- [14] McFadden P. L., McElhinny M. W. The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in palaeomagnetism //Earth and Planetary Science Letters. – 1988. – Т. 87. – №. 1-2. – С. 161-172.

- [15] Müller R. D. et al. GPlates: building a virtual Earth through deep time //Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2018. – T. 19. – №. 7. – C. 2243-2261.
- [16] Tauxe L., Kylstra N., Constable C. Bootstrap statistics for paleomagnetic data //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1991. – T. 96. – №. B7. – C. 11723-11740.
- [17] Tauxe L. Essentials of paleomagnetism //Essentials of Paleomagnetism. – University of California Press, 2010.
- [18] Tauxe L. et al. PmagPy: Software package for paleomagnetic data analysis and a bridge to the Magnetics Information Consortium (MagIC) Database //Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2016. – T. 17. – №. 6. – C. 2450-2463.
- [19] Torsvik T., Smethurst M. GMAP v. 32: Geographic mapping and palaeoreconstruction package. Norges geologiske underskelse. – 1998.
- [20] Watson G. S. A test for randomness of directions //Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1956. – T. 7. – №. 4. – C. 160-161.
- [21] Watson G. S. Limit theorems on high dimensional spheres and Stiefel manifolds //Studies in econometrics, time series, and multivariate statistics. – Academic Press, 1983. – C. 559-570.