РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

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

На правах рукописи



Кулакова Екатерина Петровна

МАГНИТОСТРАТИГРАФИЯ И ПЕТРОМАГНЕТИЗМ ЛЁССОВО-ПОЧВЕННЫХ СЕРИЙ ЮЖНОГО ТАДЖИКИСТАНА: НОВАЯ ШКАЛА МАГНИТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОВЕТРОВ В АФГАНО-ТАДЖИКСКОЙ ДЕПРЕССИИ

Специальность 1.6.1

«Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2026 г.

Работа выполнена в Лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Научный руководитель: **Павлов Владимир Эммануилович**

доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Официальные оппоненты:

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные изменения климата и связанные с ними природные процессы определяют необходимость совершенствования методов прогнозирования климатической системы Земли. Одним из важнейших условий построения достоверных климатических прогнозов является понимание закономерностей естественной изменчивости климата, его реакции на внешние воздействия и механизмов регионального проявления глобальных климатических изменений. Решение этих задач невозможно без изучения климатических изменений геологического прошлого, позволяющего оценивать масштабы, скорости и периодичность климатических вариаций на временных интервалах, существенно превышающих продолжительность инструментальных наблюдений. Особое значение в этом отношении имеет четвертичный период (последние 2,6 млн лет геологической истории Земли), характеризующийся выраженной климатической цикличностью, проявляющейся в чередовании ледниковых и межледниковых эпох.

Одним из важнейших источников знаний об изменении климата в прошлом являются лёссово-почвенные серии. Их формирование обусловлено чередованием периодов преимущественного накопления эолового пылеватого материала и активизации процессов почвообразования, связанных с изменениями глобальных природно-климатических условий. В холодные и относительно сухие эпохи ледниковий происходило интенсивное накопление лёссовых отложений, тогда как в более теплые и влажные периоды межледниковий усиливались процессы почвообразования. Таким образом, последовательности лёссов и палеопочв отражают как глобальную климатическую цикличность, так и региональные особенности изменения температуры, увлажнения, атмосферной циркуляции и интенсивности пыленакопления.

Средняя Азия является одним из крупнейших регионов распространения лёссово-почвенных отложений, образующих обширные покровы в предгорьях Тянь-Шаня и Памира [Muhs et al., 2014; Li Yanrong et al., 2020]. Особенно мощные лёссово-почвенные серии развиты в Южно-Таджикской депрессии, где их мощность достигает 200 м [Додонов, 2002], а продолжительность накопления охватывает весь четвертичный период [Zan et al., 2022]. Лёссово-почвенные серии Южного Таджикистана изучаются на протяжении многих десятилетий, однако, несмотря на значительный объем накопленных геологических, палеоклиматических и магнитостратиграфических данных, сохраняется необходимость уточнения их хронологии, совершенствования региональной корреляции и детальной интерпретации зарегистрированных в них палеоклиматических сигналов. В этой связи особую актуальность приобретает применение комплекса современных геохронологических и геофизических методов, позволяющих сопоставлять региональные изменения природной среды с глобальными климатическими событиями и оценивать влияние местных условий на формирование лёссово-почвенных последовательностей.

Помимо палеоклиматического значения, лёссово-почвенные серии Южного Таджикистана представляют исключительный интерес для изучения ранних этапов заселения Центральной Азии древним человеком. Регион находился на одном из предполагаемых путей расселения представителей рода *Homo* из Африки в восточные области Евразии. Обнаруженные в лёссово-почвенных отложениях многочисленные каменные артефакты свидетельствуют о нескольких этапах присутствия древнего человека на протяжении плейстоцена [Ranov, 1995; Ранов, Шефер, 2000; Деревянко, 2018]. Установление возраста археологических горизонтов и реконструкция соответствующих им природно-климатических условий необходимы для определения хронологии

расселения древних людей и оценки возможного влияния климатических факторов на развитие палеолитических культур региона.

Необходимым условием для выполнения палеоклиматических реконструкций и решения археологических задач является создание надежной хроностратиграфической схемы лёссово-почвенных серий. Одним из ведущих методов при этом является палеомагнитный метод, позволяющий выделять в разрезах уровни, отвечающие геомагнитным инверсиям и экскурсам, которые используются как независимые хронологические реперы.

Важную роль в реконструкции климатических изменений играют петромагнитные методы, основанные на изучении магнитных свойств горных пород. Минералогический состав, концентрация и гранулометрические характеристики магнитных минералов в лёссово-почвенных отложениях определяются условиями поступления исходного обломочного материала, интенсивностью почвообразования и последующими преобразованиями осадка. Поэтому вариации петромагнитных параметров могут служить индикаторами изменений природно-климатических условий. Особое значение имеет изучение анизотропии магнитной восприимчивости, позволяющее исследовать магнитную текстуру отложений и реконструировать направления эолового переноса в геологическом прошлом. Для Южного Таджикистана, расположенного в области сложного взаимодействия атмосферной циркуляции и горного рельефа, установление долговременной динамики переноса минеральной пыли представляет значительный интерес для понимания регионального отклика на глобальные климатические изменения.

Степень разработанности темы исследования. Систематическое изучение лёссово-почвенных серий Южного Таджикистана ведется с 1970-х годов. В результате многолетних геологических, археологических, палеопедологических и геохронологических исследований разработана региональная стратиграфическая схема отложений, охарактеризован облик педокомплексов, установлена связь формирования лёссово-почвенных серий с глобальными климатическими изменениями северного полушария, описаны археологические комплексы в погребенных почвах и составлена региональная хроностратиграфическая схема [Додонов, 2002; Ranov, 1995; Ding et al., 2002; Dodonov, 2007]. Исследования последних десяти лет значительно расширили представления об условиях лёссонакопления и климатической истории региона [Jia et al., 2018; Li et al., 2019; Lu et al., 2020]. Вместе с тем, несмотря на значительный объем накопленных данных, к началу выполнения настоящего исследования сохранилась необходимость уточнения положения ключевых палеомагнитных границ, проверки достоверности регистрации кратковременных геомагнитных событий, а также изучения особенностей формирования и сохранения палеомагнитной записи в лёссово-почвенных отложениях. Недостаточно исследованной оставалась также долговременная динамика направлений эолового переноса и ее связь с эволюцией атмосферной циркуляции Центральной Азии. Решение этих вопросов требует комплексного применения современных палеомагнитных, петромагнитных и геохронологических методов, на что направлена настоящая работа.

Цели и задачи работы. Перед работой ставились следующие **цели**:

1. Актуализация магнитостратиграфии и хронологии лёссово-почвенных серий Южного Таджикистана, исследование особенностей формирования и сохранения в них палеомагнитной записи геомагнитных событий.

2. Реконструкция долговременной динамики атмосферного переноса минеральной пыли в Афгано-Таджикской депрессии за последний 1,1 млн лет.

Для достижения поставленных целей было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести детальные палеомагнитные исследования опорных разрезов, установить положение основных магнитостратиграфических границ и охарактеризовать переходные интервалы геомагнитных инверсий.

2. Исследовать магнитоминералогический состав, концентрацию и размерные характеристики магнитных минералов лёссов и палеопочв, определить основные носители естественной остаточной намагниченности и выявить особенности ее формирования и сохранения.

3. Установить наличие записей кратковременных геомагнитных событий в лёссово-почвенных отложениях и оценить возможности их использования в качестве хроностратиграфических реперов.

4. Построить возрастную модель изучаемых опорных разрезов на основе корреляционного анализа, петромагнитных и палеомагнитных данных и независимых геохронологических ограничений.

5. Исследовать анизотропию магнитной восприимчивости лёссово-почвенных отложений, оценить влияние вторичных постседиментационных процессов на первичную магнитную текстуру отложений и реконструировать направления атмосферного переноса минеральной пыли.

6. Проанализировать современные данные метеорологических наблюдений в регионе исследования, выявить закономерности и особенности пылевых явлений.

7. Установить особенности долговременной эволюции эолового переноса в Афгано-Таджикской депрессии на протяжении последних 1,1 млн лет и оценить устойчивость региональной атмосферной циркуляции в условиях глобальных климатических изменений плейстоцена.

Фактический материал для написания данной работы был получен в течение четырех экспедиций на территорию Ховалингского лёссового плато в Южном Таджикистане в 2021–2023 гг. В результате проведенных работ была вскрыта ненарушенная последовательность отложений для трех опорных разрезов, проведены полевые измерения, стратиграфическое описание, отбор материала каждые 2 см на общий анализ и отбор ориентированных блоков для проведения петро- и палеомагнитных исследований. Суммарная палеомагнитная коллекция составила 5458 образцов, дополнительно для изучения магнитной текстуры отложений разрезов получено 3669 образцов, таким образом, представленные в данной работе результаты основаны на изучении магнитных характеристик 9127 образцов. Изучение скалярных магнитных параметров отложений выполнено на около 1500 образцах.

Методология и методы исследования. Методологическую основу работы составляет комплексный подход к изучению лёссово-почвенных серий, основанный на совместном анализе палеомагнитных, петромагнитных и геохронологических данных с учетом литостратиграфического строения разрезов. Такой подход позволяет уточнять хроностратиграфию отложений, исследовать особенности регистрации геомагнитных событий и реконструировать условия пылевого переноса в прошлом.

Пробоподготовка ориентированных коллекций осуществлялась в совместной российско-таджикской лаборатории в Институте истории, археологии и этнографии им. А. Дониша НАНТ (г. Душанбе, Таджикистан), в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва) и в Институте наук о Земле Уппсальского университета (г. Уппсала, Швеция). Все палеомагнитные исследования и подавляющая часть петромагнитных исследований выполнены в ИФЗ РАН. Некоторые петромагнитные исследования были проведены на оборудовании НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Казанского федерального университета (г. Казань) и в Геофизической обсерватории «Борок» (пгт Борок, Ярославская область).

Для построения возрастных моделей использовались также результаты люминесцентного и космогенного датирования, полученные в рамках совместных исследований [Buylaert et al., 2024; Sørensen et al., 2026].

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах полевых исследований лёссово-почвенных разрезов Южного Таджикистана в 2021–2023 гг., включавшее подготовку траншей к изучению, выполнение аэрофотосъемки разрезов, проведение полевых измерений и отбор образцов на различные виды анализов. В частности, лично автором блок за блоком с помощью ножа был отобран весь ориентированный материал для проведения палеомагнитных исследований. Также были организованы дополнительные выезды в г. Душанбе для распиловки отобранного материала и его подготовки к вывозу в Москву. Лично автором были выпилены 8620 ориентированных образцов для палео- и петромагнитных исследований. Автором проведена обработка полевой документации и составление итоговых стратиграфических схем для двух опорных разрезов. Непосредственно автором был проделан полный комплекс палеомагнитных и значительная часть петромагнитных лабораторных работ: выбор методики и определение необходимых экспериментов; проведение подавляющей части измерений; интерпретация полученных данных и формулирование основных выводов исследований; создание итоговых иллюстративных материалов. Автор принимал активное участие в обсуждении совместных геохронологических и палеоклиматологических исследований, а также в написании текста публикаций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложена магнитостратиграфическая схема опорных разрезов лёссово-почвенных серий Южного Таджикистана Хонако-II и Кульдара, которая определяет положение границ, отвечающих трем последним инверсиям геомагнитного поля – границы Матуяма–Брюнес, верхней и нижней границ субхрона Харамильо. Границы Матуяма–Брюнес и верхняя граница Харамильо расположены выше, чем считалось ранее, и находятся в почвенных горизонтах отвечающих, соответственно, морским изотопным стадиям (МИС) 19 и МИС 28b. Этот результат снимает противоречие между палеомагнитными записями инверсий в морских и континентальных лёссово-почвенных отложениях и указывает на отсутствие значительного запаздывания реакции окружающей среды на континенте и в океане на глобальные изменения климата.

2. В разрезе Хонако-II присутствует запись геомагнитного экскурса Камикатсура, возраст которого в рамках принятой модели осадконакопления оценивается в ~0,88 млн лет, а продолжительность – ~9–10 тыс. лет. Выявленный экскурс является важным хроностратиграфическим репером, который может быть использован при региональных и межрегиональных корреляциях лёссово-почвенных серий. Наличие записи этого экскурса указывает на то, что лёссово-почвенные отложения Южного Таджикистана способны сохранять палеомагнитную запись кратковременных геомагнитных событий продолжительностью порядка 10 тыс. лет.

3. Магнитная текстура лёссово-почвенных отложений в опорных разрезах Хонако-II, Кульдара и Оби-Мазар несет в себе информацию о динамике атмосферной пыли в Афгано-Таджикской депрессии. Анализ текстур показывает, что направление ветров, транспортирующих пыль, по крайней мере, с конца раннего плейстоцена оставалось стабильным и соответствовало современным метеорологическим наблюдениям. Это говорит о неизменности локации источника пылевого материала для изучаемых лёссовых отложений, о стабильности орографического плана региона и о сохранении регионального механизма переноса пыли, связанного с западной атмосферной

циркуляцией и перенаправлением воздушных потоков в соответствии с барическим градиентом между Каспийским регионом и Гиндукушем, на протяжении, по крайней мере, последних 1,1 млн лет.

Научная новизна. Впервые для лёссово-почвенных серий Южного Таджикистана проведены высокодетальные палеомагнитные исследования, отвечающие современным требованиям качества и надежности и включающие непрерывное опробование и комплексное изучение переходных зон геомагнитных инверсий. Полученные результаты позволили уточнить положение палеомагнитных границ Матуяма–Брюнес и Харамильо– Матуяма, выявить и охарактеризовать запись геомагнитного экскурса Камикатсура, а также установить особенности регистрации геомагнитных инверсий и экскурсов в лёссово-почвенных отложениях изучаемого региона. Эти результаты легли в основу новой шкалы магнитной полярности лёссово-почвенных отложений Южного Таджикистана. Впервые для лёссовых отложений Средней Азии выполнено обширное изучение магнитной текстуры лёссово-почвенных отложений, охватывающее временной интервал последних 1,1 млн лет, что позволило реконструировать направления атмосферного переноса минеральной пыли в Афгано-Таджикской депрессии в прошлом.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений об особенностях формирования и сохранения палеомагнитной записи в лёссово-почвенных отложениях и возможностях ее использования для реконструкции изменений геомагнитного поля. Полученные результаты уточняют положение ключевых магнитостратиграфических границ в лёссово-почвенных сериях Южного Таджикистана и свидетельствуют о согласованности их положения с глобальной климатостратиграфической шкалой. Результаты исследования анизотропии магнитной восприимчивости расширяют представления об эволюции атмосферной циркуляции Центральной Азии в плейстоцене, что важно для разработки палеогеографических реконструкций и понимания взаимодействия атмосферной циркуляции в регионе в прошлом.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных палеомагнитных и петромагнитных данных для уточнения магнитостратиграфических и хроностратиграфических схем четвертичных отложений Южного Таджикистана. Уточненное положение границ Матуяма–Брюнес и субхрона Харамильо, а также впервые выявленная в таджикских лёссах запись экскурса Камикатсура могут использоваться в качестве хроностратиграфических реперов при региональной и межрегиональной корреляции лёссово-почвенных отложений Евразии, а также с другими климатическими палеоархивами. Полученные геохронологические данные и построенные возрастные модели опорных разрезов создают основу для уточнения возраста археологических горизонтов, связанных с этапами заселения Центральной Азии древними людьми, а также для палеоклиматических реконструкций.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом исследованного материала, применением комплекса современных палеомагнитных и петромагнитных методов, использованием независимых способов контроля и статистической обработки данных. Надежность интерпретации палеомагнитной записи обеспечивается анализом образцов-дублей, сопоставлением результатов различных методов размагничивания, изучением магнитоминералогического состава отложений и сравнением полученных данных с независимыми региональными и глобальными геологическими архивами. Реконструкции направлений пылевого переноса дополнительно сопоставлены с современными метеорологическими наблюдениями, данными модели ERA5 и с опубликованными реконструкциями для позднего плейстоцена и голоцена.

Апробация результатов и публикации. Результаты исследований, представленные в данной работе, докладывались на Общемосковском семинаре по палеомагнетизму и магнетизму горных пород ИФЗ РАН, на научном семинаре НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также на многочисленных российских и международных конференциях и семинарах, среди которых: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (г. Москва, 2021; 2022; 2023; 2024; 2025); XIV школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса — 2022» (г. Санкт-Петербург, 2022); Вторая Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Геохронология четвертичного периода: инструментальные методы датирования новейших отложений» (г. Москва, 2022); X International Siberian Conference of Young Scientists on Earth Sciences (г. Новосибирск, 2022); The 2022 INQUA LoessFest (г. Янань, Китай, 2022, онлайн-участие); XXX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2023); Всероссийская конференция «Каспий в плейстоцене и голоцене: эволюция природной среды и человек» (г. Волгоград-Астрахань, 2023); Всероссийская школа-конференция «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород» (г. Казань, 2023; 2025); Timing and Ecology of the Human Occupation of Central Asia – THOCA Seminars (Роскилле, Дания, онлайн-участие, 2024); Международная научно-практическая конференция «Археология и палеогеография Центральной Азии. Памяти выдающегося археолога В.А. Ранова» (г. Душанбе, Таджикистан, 2024); Mediterranean Geosciences Union 4th Annual Meeting (MedGU-2024) (г. Барселона, Испания, 2024); Всероссийская конференция с международным участием «Марковские чтения 2025 года» (г. Москва, 2025); XI Всероссийская конференция по изучению четвертичного периода (г. Санкт-Петербург, 2025); International research project: THOCA – Final THOCA Seminar (г. Копенгаген, Дания, 2025, онлайн-участие); XVI школа-конференция с международным участием «Проблемы Геокосмоса — 2026» (г. Санкт-Петербург, 2026).

По теме диссертационной работы автором лично и в соавторстве были подготовлены 24 публикации: 9 статей в рецензируемых отечественных и международных журналах и 15 тезисов и материалов отечественных и международных конференций. Перечень публикаций автора в научных журналах содержит 9 публикаций в изданиях, индексируемых в Scopus, 7 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection, 8 публикаций в изданиях, индексируемых в РИНЦ, и 6 публикаций в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или по SJR.

Структура и объем работы

Диссертационная работа общим объемом 232 страницы состоит из введения, 6 глав, заключения, списка принятых в работе сокращений и условных обозначений и списка литературы. Работа включает 54 иллюстрации, 11 таблиц. Библиографический список содержит 284 источника и 5 ссылок на интернет-ресурсы.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.ф.-м.н. В.Э. Павлову за рекомендации, всестороннюю поддержку и внимание, проявленное к работе. Автор благодарит всех сотрудников лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН за содержательные дискуссии, ценные замечания и обстановку доброжелательности и научного поиска. В особенности хочется поблагодарить близкую подругу и коллегу В.И. Дуданову, которая как никто понимает научную проблематику лёссовых исследований, за всестороннюю поддержку, часовые обсуждения результатов и, пожалуй, наиболее критическое отношение к получаемым данным. Отдельно хочется выразить благодарность д.г.-м.н., профессору РАН, Р.В. Веселовскому –

моему первому научному руководителю в области палеомагнетизма, который не просто обучил основам метода, но сформировал скрупулезное и добросовестное отношение к работе.

Масштабность и комплексность настоящего исследования была бы недостижима без наличия крупного международного проекта, посвященного изучению лёссово-почвенных серий Южного Таджикистана. Автор благодарит идейного руководителя проекта к.г.н. Р.Н. Курбанова за предоставленную возможность быть частью этого проекта, организационную поддержку и содействие на первых этапах работы. Автор выражает признательность всем участникам полевых работ: П.М. Сосину за документирование геологических разрезов и обучение региональной стратиграфии; О.А. Токаревой и О.А. Мещеряковой за содействие в проведении полевых исследований и взаимопомощь; сотрудникам Института истории, археологии и этнографии имени А. Дониша НАНТ – Туре Худжагелдиеву, Ислому Ашурмадову, Аслиддину Караеву, Абдулло Шарипову и Гафуру-аке, оказавшим неоценимую практическую помощь в полевых условиях; сотрудникам ИАЭТ СО РАН и, в частности, к.и.н. К.К. Павленку и д.и.н. А.А. Анойкину; а также всем участникам международного проекта THOCA.

Отдельную благодарность автор выражает сотрудникам Уппсальского университета (Швеция) – Рамоне Шнайдер, Томасу Стивенсу и Бьярне Алмквисту – за помощь в обработке данных измерений, плодотворное обсуждение методических вопросов и результатов петромагнитных исследований. Хотелось бы также поблагодарить сотрудников Орхусского университета (Дания) – профессора Мадса Кнудсена, Бирте Эриксон, Йеспера Норгарда, и Аске Суренсена – за предоставленную возможность использовать научную инфраструктуру учреждения, всестороннюю поддержку, обсуждение материалов и обучение методу космогенного датирования.

Автор также выражает благодарность всем коллегам, чьи профессиональные советы, конструктивные обсуждения и практическая помощь способствовали выполнению настоящей работы. Отдельно хотелось бы поблагодарить к.ф.-м.н. А.А. Костерова (СПбГУ), д.г.-м.н. А.Ю. Казанского (ГИН РАН), сотрудников лаборатории Палеоархивов природной среды ИГ РАН и сотрудников НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма КФУ, Казань.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Географическое и геологическое описание региона исследования

В главе рассмотрены терминологические определения Центральной Азии и Средней Азии, описаны физико-географические особенности региона исследования, геологическое строение Афгано-Таджикской депрессии и условия формирования лёссово-почвенных отложений региона.

В географическом отношении Афгано-Таджикская депрессия представляет собой крупную межгорную впадину, обрамленную с севера, востока и юга горными хребтами Гиссара, Алая, Памира и Гиндукуша, и расположенную в области аридного климата. Ее геологическое строение определяется развитием мезозойско-кайнозойского осадочного чехла и неоген-четвертичными деформациями, связанными с коллизией Индийской и Евразийской плит. В четвертичное время здесь сформировались мощные лёссово-почвенные серии, мощность которых на территории Южного Таджикистана достигает 100–200 м и более. Их строение отражает чередование периодов интенсивного эолового осадконакопления и активизации процессов почвообразования, происходившее на фоне глобальных климатических изменений и ледниково-межледниковой цикличности. Особенности орографического положения региона определяют сложное взаимодействие крупномасштабной атмосферной циркуляции с локальными ветровыми системами, что необходимо учитывать при интерпретации направлений эолового переноса.

Глава 2. История и современное состояние исследований лёссово-почвенных серий Южно-Таджикской депрессии

В главе в хронологическом порядке рассматривается опыт изучения лёссово-почвенных отложений Южно-Таджикской депрессии, развитие представлений об их стратиграфии и хронологии и обобщены результаты геологических, археологических, геохронологических и палеоклиматических исследований.

Выделены три основных этапа изучения лёссово-почвенных серий Южного Таджикистана. Первый, охватывающий преимущественно 1970–1980-е годы, связан с геологическим и археологическим изучением опорных разрезов, разработкой региональной стратиграфической схемы и выделением основных этапов развития палеолитических культур [Додонов, 1986; Ranov, 1995]. Тщательные палеопедологические исследования позволили получить полное представление об эволюции палеопочвенных комплексов в Южном Таджикистане и связать этапы присутствия древних людей в регионе с соответствующими климатическими условиями [Ломов, Сосин, Сосновская, 1982; Ломов, Ранов, 1984]. Первые магнитостратиграфические исследования позволили наметить положение основных палеомагнитных границ и отдельные кратковременные геомагнитные события [Пеньков, Гамов, 1980; Гурарий, Пеньков, 1985].

Во время второго этапа (1990 – 2000-е годы) магнитостратиграфические и геохронологические исследования лёссово-почвенных последовательностей получили дальнейшее развитие [Forster, Heller, 1994; Frechen, Dodonov, 1998; Mestdagh et al., 1999; Ding et al., 2002]. Корреляция лёссово-почвенных последовательностей региона по данным магнитной восприимчивости с изотопно-кислородной шкалой Мирового океана позволила существенно пересмотреть их хроностратиграфию, установить связь с глобальными климатическими событиями Северного полушария [Shackleton et al., 1995; Додонов и др., 1999] и уточнить возраст погребенных почвенных комплексов и связанных с ними археологических находок [Ранов, Шефер, 2000].

Современный этап исследований, начавшийся в конце 2010-х годов, характеризуется применением новых геохронологических, петромагнитных и геохимических методов и имеет, в основном, палеоклиматическую направленность [например, Jia et al., 2018; Wang et al., 2018; Tian et al., 2020; Aquino et al., 2024]. Получены новые данные об условиях лёссонакопления, источниках минеральной пыли и изменениях природной среды в позднем плейстоцене и голоцене [Häggi et al., 2019; Jia et al., 2022; Li et al., 2022a, 2022b; Kang et al., 2025a]. Однако большинство исследований атмосферной циркуляции охватывает не более двух последних ледниково-межледниковых циклов, тогда как сведения о направлениях и траекториях переноса пыли в более ранние периоды остаются фрагментарными.

Проведенный анализ предшествующих работ позволил определить нерешенные вопросы магнитостратиграфии лёссово-почвенных серий и выявить недостаточную изученность долговременной динамики атмосферного переноса минеральной пыли, что определило основные направления настоящей работы.

Глава 3. Объекты исследования

В главе представлены географическое положение и стратиграфия трех опорных лёссово-почвенных разрезов Ховалингского лёссового плато: Кульдара, Хонако-II и Оби-Мазар (рис. 1). Описаны четыре основных литологических типа отложений, встречающихся в разрезах: лёссы, биолитовые горизонты, палеопочвы и карбонатные коры, на основе которых дана краткая литологическая характеристика разрезов.

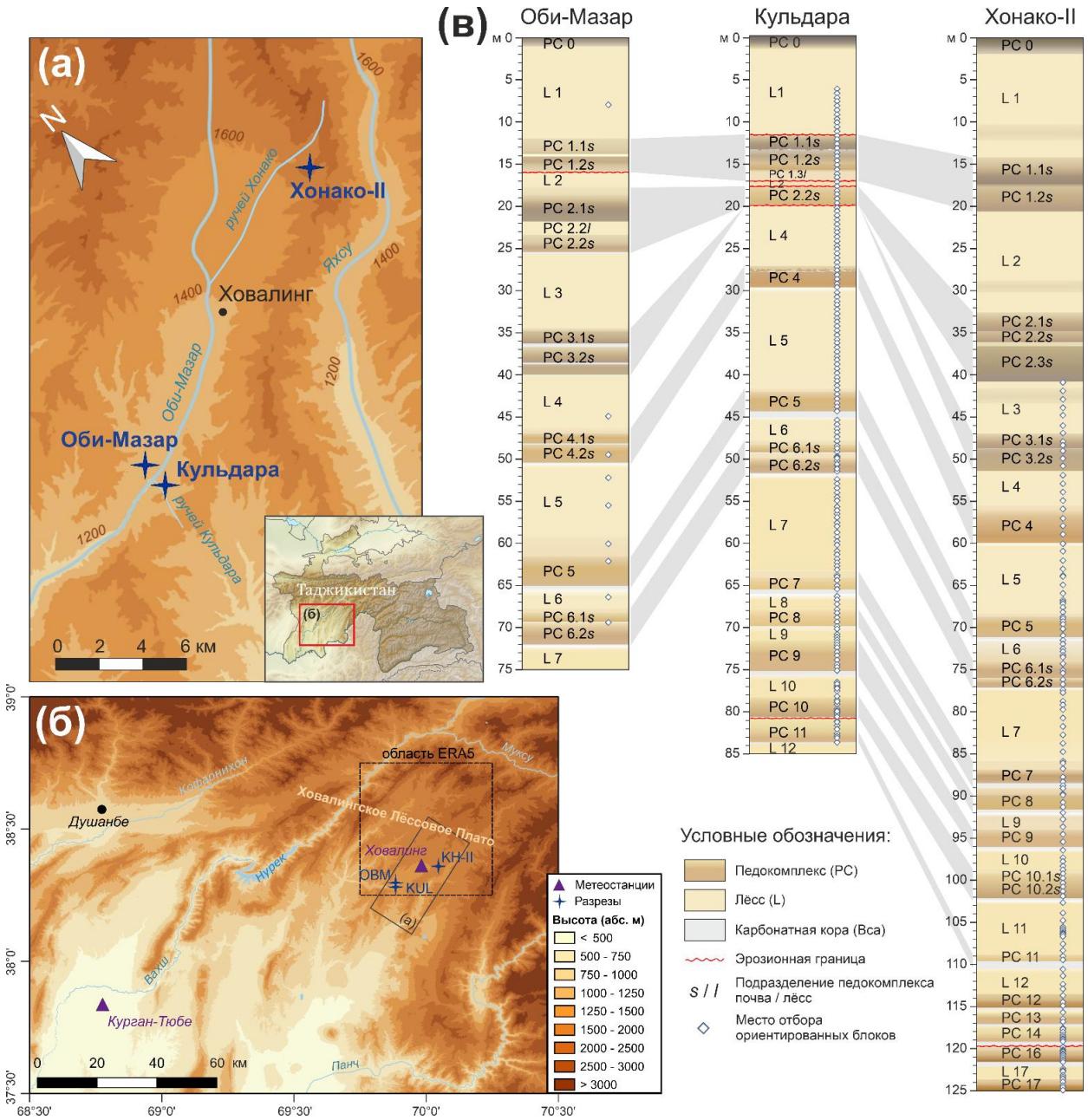

Рисунок 1. Географическое положение объектов исследования и орогидрография: *а* – Ховалингский район с обозначениями мест расположения изучаемых лёссово-почвенных разрезов (синие звездочки); *б* – карта Южного Таджикистана с обозначениями мест расположения разрезов (KH-II – Хонако-II, OBM – Оби-Мазар, KUL – Кульдара), метеостанций (фиолетовые треугольники) и области модели ERA5. *в* – Стратиграфические схемы изученных разрезов с местом отбора ориентированных блоков, использованных для измерения анизотропии магнитной восприимчивости и палеомагнитного анализа

Разрез Кульдара расположен в правом борту долины одноименного ручья, впадающего в р. Оби-Мазар, приблизительно в 1 км от его устья (рис. 1, а). Разрез охватывает стратиграфическую последовательность от современной почвы по верхнюю часть лёссовой пачки L12 суммарной мощностью 85 м (рис. 1, в). В строении разреза имеется несколько эрозионных границ в верхней части разреза, выделенных по почвенному описанию и данным люминесцентного датирования [Buylaert et al., 2024], а также предполагается отсутствие значимой части пачки L11.

Разрез Оби-Мазар расположен в обнажении правого борта широкой долины р. Оби-Мазар напротив пос. Лахути, приблизительно в 1,5 км севернее разреза Кульдара. Раскопочными работами

вскрыты отложения общей мощностью 75 м от современной почвы по верхнюю часть лёссовой пачки L7. В разрезе не наблюдается крупных эрозионных границ, за исключением несогласия между пачками PC1 и L2, которое прослеживается по всей ширине обнажения и связано с изменением топографии палеоповерхности.

Разрез Хонако-II вскрывает водораздельную часть лёссового плато между р. Оби-Мазар и Яхсу, приблизительно в 16 км к северо-востоку от разрезов Кульдара и Оби-Мазар, и представлен одной из наиболее полных лёссово-почвенных последовательностей региона [Додонов, 2002]. Суммарно в результате раскопочных работ всех сезонов был вскрыт интервал разреза мощностью 125 м, включающий в себя голоценовую почву, 16 педокомплексов и соответствующих им пачек лёсса (рис. 1, в). Стратиграфическая последовательность разреза полная за исключением лакуны, отвечающей региональным пачкам L15, PC15 и, возможно, верхней части пачки L16 вследствие эрозионного срезания.

Изученные разрезы отличаются геоморфологическим положением, условиями дренирования и степенью проявления постседиментационных процессов. Это позволяет оценивать влияние локальных условий на формирование и сохранение магнитных характеристик отложений. Все три объекта также имеют важное археологическое значение: в разновозрастных погребенных почвенных комплексах обнаружены раннепалеолитические каменные артефакты древних людей, относящиеся к различным этапам заселения региона.

Магнитостратиграфические исследования выполнены для разрезов Хонако-II и Кульдара. Все три разреза использованы для изучения магнитной текстуры и реконструкции направлений эолового переноса.

Глава 4. Методика исследований

В главе описаны полевые и лабораторные исследования, которые использовались в данной работе. *Полевые исследования* включали стратиграфическое (почвенное) описание разрезов, полевые измерения магнитной восприимчивости, отбор сыпучего материала и ориентированных блоков. В интервалах разрезов, фиксирующих смену полярности геомагнитных инверсий или зоны нестабильной полярности, проводился сплошной отбор ориентированных блоков. Из некоторых стратиграфических подразделений разрезов были отобраны дополнительные блоки для изучения магнитной текстуры отложений. Подробно описана методика распиловки; для палеомагнитных исследований с каждого исследуемого уровня было получено от 3 до 10 образцов-дублей; для изучения магнитной текстуры блоки распиливались полностью.

Палеомагнитные исследования. Для большинства образцов использовалось ступенчатое размагничивание переменным магнитным полем для выделения характеристической компоненты естественной остаточной намагниченности; из интервалов детального изучения для 2–3 образцов-дублей производилась также ступенчатое размагничивание температурой или комбинированная магнитная чистка (температура + переменное поле). Палеомагнитные характеристики образцов-дублей усреднялись.

Петромагнитные исследования включали измерение удельной магнитной восприимчивости и ее частотной и температурной зависимостей, гистерезисных параметров, кривых возврата первого порядка (FORC-диаграмм), анализ коэрцитивных спектров, а также изучение магнитоминералогического состава методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции. Для исследования магнитной текстуры отложений измерялась

анизотропия магнитной восприимчивости и ее частотная зависимость. Данные измерений были подвержены статистической фильтрации по критериям $F_{12} > 4,3$; $F_{23} > 10$ и $\varepsilon_{12} < 22,5°$.

Дополнительно анализировались результаты современных метеорологических наблюдений и атмосферного реанализа ERA5.

Глава 5. Магнитостратиграфия опорных лёссово-почвенных разрезов Кульдара и Хонако-II

5.1. Магнитная минералогия изученных разрезов

Петромагнитные исследования показали, что магнитоминералогический состав изученных лёссов и палеопочв представлен магнетитом, маггемитом, гематитом и гётитом. Основной вклад в остаточную намагниченность вносит магнетит. Установлено, что размерность зерен магнитных минералов представлена в широком диапазоне (от сотых долей мкм до сотен мкм), их доменное состояние также разнообразное: в отложениях встречаются суперпарамагнитные, однодоменные, псевдооднодоменные и многодоменные зерна. Снимки магнитной вытяжки, полученные сканирующей электронной микроскопией, показывают, что крупные магнитные зерна в большей своей массе представлены обломками кристаллов и имеют различную морфологию от уплощенных до удлиненных.

Лёссово-почвенные отложения Южного Таджикистана характеризуются педогенной моделью увеличения магнитных свойств, выражающейся в новообразовании ультратонкого магнетита в ходе почвообразования. При этом магнитные характеристики отложений определяются совместным присутствием минералов детритового (эолового) и педогенного происхождения, различающихся размерами, доменными состояниями и коэрцитивностью.

5.2. Результаты палеомагнитного изучения

Анализ палеомагнитных данных обоих разрезов показал, что в пределах интервалов стабильной полярности Брюнес и Матуяма палеомагнитный сигнал хорошего качества, и характеристическая компонента остаточной намагниченности (ChRM) уверенно выделяется в интервале 15(30)–120 мТл и 350–580°C. Средние направления ChRM соответствуют ожидаемым направлениям геомагнитного поля, при этом систематического занижения палеомагнитного наклонения не обнаружено. Вместе с тем значения параметра разброса виртуальных геомагнитных полюсов значительно ниже ожидаемых для географической широты изученных разрезов [Tauxe, Kent, 2004], что свидетельствует о существенном усреднении палеомагнитной записи.

В разрезах Кульдара и Хонако-II детально изучен интервал с записью перехода Матуяма–Брюнес (М/Б). В разрезе Кульдара переход М/Б охватывает зону ~3 м в интервале глубин 75,0 – 77,9 м и включает в себя 7 смен полярности и аномальные/промежуточные направления (рис. 2). Бóльшая часть перехода приурочена к пачке L10, окончание перехода фиксируется в нижней части PC9. В переходной зоне качество палеомагнитного сигнала в среднем заметно ниже и в ряде случаев оценивается как плохое – это отражается в увеличении средних значений максимального углового отклонения (MAD) [Kirschvink, 1980]. Зоне перехода также соответствуют наиболее низкие значения $NRM_{(30\ мТл)}/\chi$ и $\Delta NRM/\Delta ARM_{(35\text{-}60\ мТл)}$, которые используются при изучении лёссовых отложений как параметр, отражающий характер изменения относительной напряженности геомагнитного поля во время формирования пород [Pan et al., 2021].

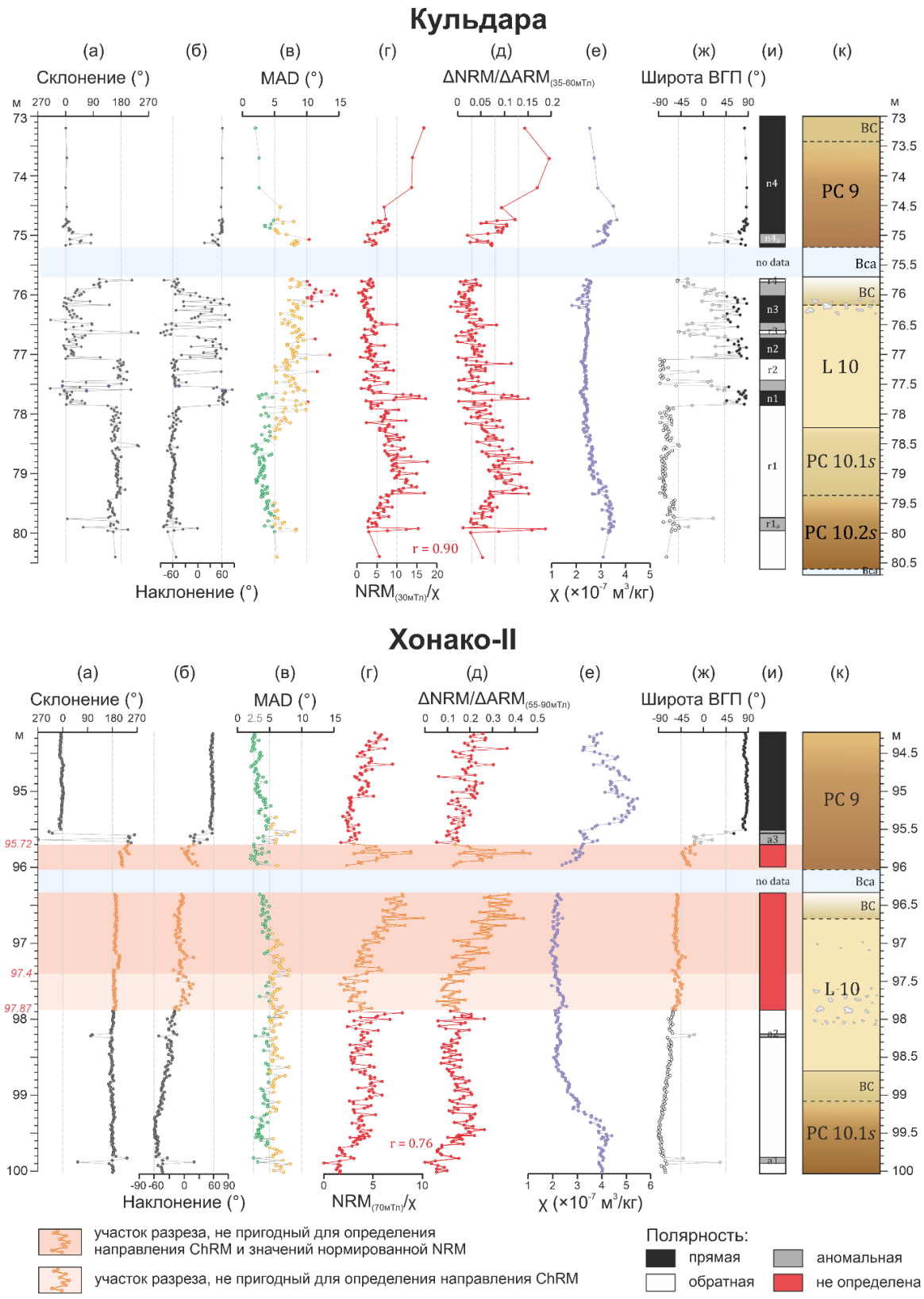

Рисунок 2. Палеомагнитные характеристики переходной зоны Матуяма–Брюнес в разрезах Кульдара и Хонако-II: *а, б* – склонение и наклонение среднего направления характеристической компоненты намагниченности (ChRM) для каждого стратиграфического уровня; *в* – MAD, среднее значение максимального углового отклонения; *г* – величина NRM после размагничивания переменным полем 30/70 мТл, нормированная на магнитную восприимчивость; *д* – отношение долей NRM и ARM в диапазоне определения ChRM (35–60/55–90 мТл); *е* – удельная магнитная восприимчивость (χ); *ж* – широта виртуального геомагнитного полюса (ВГП), рассчитанная из среднего направления ChRM; *и* – шкала магнитной полярности; *к* – литологическая колонка

В разрезе Хонако-II запись перехода полярности М/Б охватывает нижнюю часть PC9 и пачку лёсса под ним, занимая в разрезе зону мощностью 2,7 м в диапазоне глубин 95,52 – 98,22 м (рис. 2). Переход выражается (снизу вверх) в постепенной плавной смене величины наклонения через нулевые значения и в скачкообразном изменении склонения в нижней части PC9. Такой (в общих чертах, сглаженный) характер перехода М/Б сильно контрастирует с типом перехода, иллюстрирующим множественные скачки полярности, который был наблюден в разрезе Кульдара. Детальное изучение палеомагнитной записи и магнитных свойств отложений показало, что значительная часть перехода (95,72 – 97,87 м) вторично перемагничена вследствие удара молнии.

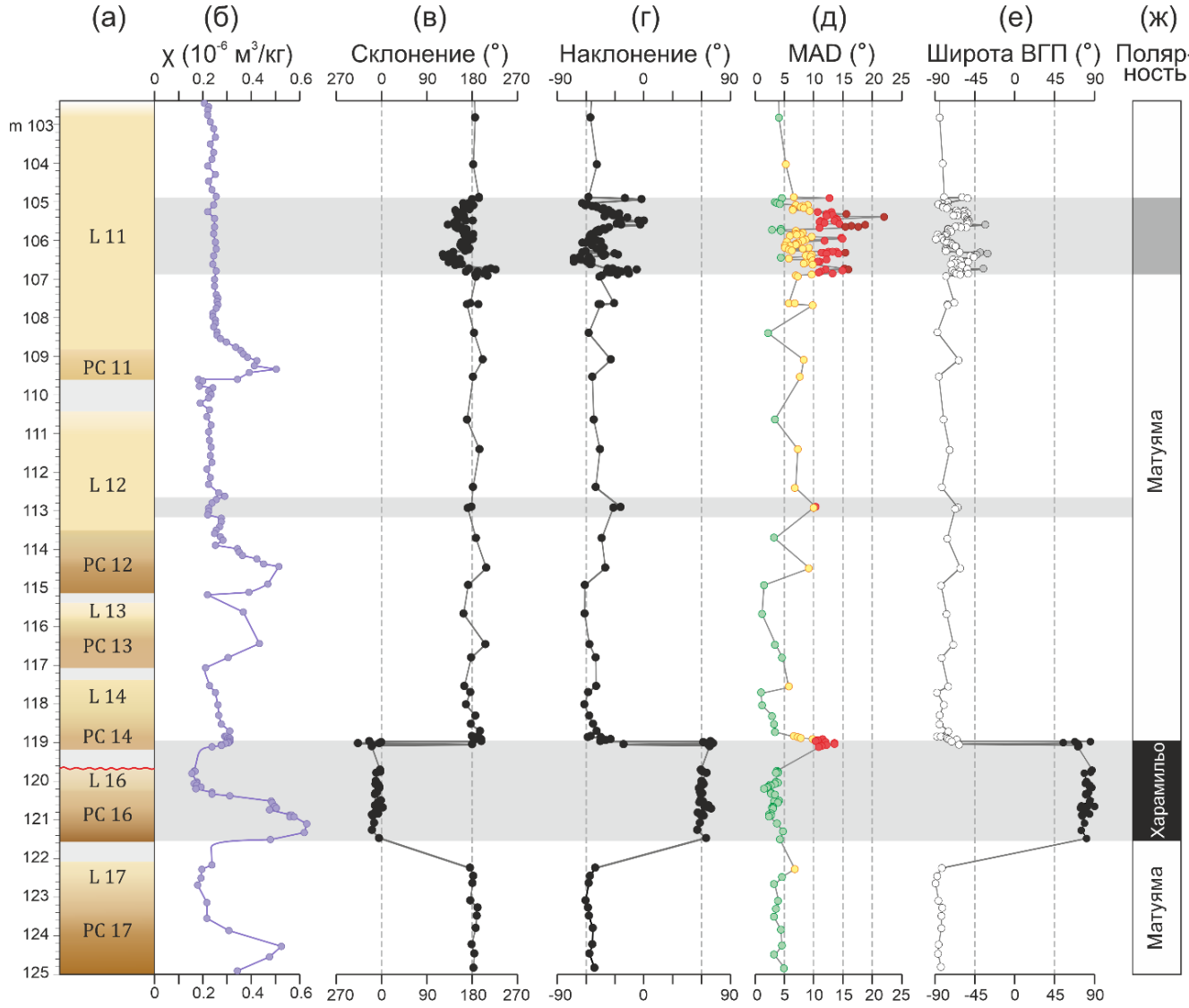

Рисунок 3. Результаты палеомагнитного изучения нижней части разреза Хонако-II: *а* – стратиграфическая колонка; *б* – кривая магнитной восприимчивости (χ); *в, г* – склонение и наклонение характеристической компоненты намагниченности, полученной осреднением для каждого уровня; *д* – среднее значение MAD для образцов с одного уровня; *е* – широта ВГП, рассчитанная по осредненной компоненте; *ж* – шкала магнитной полярности

Субхрон прямой полярности Харамильо занимает в разрезе Хонако-II интервал мощностью 2,55 м (глубины 118,97 – 121,52 м), соответствующий стратиграфическому интервалу PC14 – PC16. Запись верхней границы Харамильо–Матуяма (Х/М) обнаружена в нижней части PC14 и характеризуется скачкообразным изменением палеомагнитных направлений с тремя сменами

полярности в интервале мощностью 10 см (рис. 3). Вблизи этого интервала отмечается общее снижение средней интенсивности NRM и повышение значений MAD при выделении характеристической компоненты. Точное положение нижней границы субхрона – Матуяма–Харамильо (M/X) – получить затруднительно, так как она приходится на карбонатную кору мощностью 50 см в основании PC16 на глубинах 121,6 – 122,1 м (рис. 3).

В палеомагнитной записи разрезов также выделяются зоны нестабильной полярности, характеризующиеся снижением величины NRM, общим ухудшением качества записи, появлением аномальных направлений и высоким разбросом направлений в образцах с одного стратиграфического уровня. В разрезе Кульдара подзона аномальных направлений выявлена в PC10.2*s* на глубинах 79,76 – 79,98 м и имеет мощность 22 см (подзона $r1_a$ рис. 2). В разрезе Хонако-II выделены несколько таких зон: в нижней части PC10.1*s* на глубинах 99,83 – 99,91 м (подзона a1 на рис. 2); в средней части пачки L11 (105,00 – 106,75 м) (рис. 3); в нижней части пачки L12 (в блоке на глубине 112,85 м) (рис. 3). Отсутствие резких изменений магнитных свойств и ненарушенная магнитная текстура отложений в этих интервалах поддерживают предположение о геомагнитной природе аномалий.

5.3. Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты указывают на то, что первичная остаточная намагниченность лёссово-почвенных серий Таджикистана формируется в результате сочетания детритового, постдетритового и химического механизмов (DRM + pDRM + CRM). Отсутствие выраженного занижения наклонения и сглаживание палеовековых вариаций свидетельствуют о существенной роли постседиментационной фиксации намагниченности. Вторичная намагниченность отложений преимущественно связана с низкокоэрцитивными магнитными зернами и представлена вязкой остаточной намагниченностью, а в отдельных горизонтах разрезов с «аномальным» типом палеомагнитной записи выявлена изотермическая остаточная намагниченность, возникшая вследствие ударов молнии. Особенности формирования первичной и вторичной намагниченности необходимо учитывать при определении стратиграфического положения геомагнитных событий и оценке временного разрешения палеомагнитной записи.

Региональная корреляции Хонако-II с разрезами Тагиджар и Дараи Калон по кривым магнитной восприимчивости, подкрепленная палеомагнитными данными, позволила подтвердить высказанное А.Е. Додоновым предположение об отсутствии L15 и PC15 в разрезе Хонако-II, а также, по всей вероятности, верхней части пачки L16.

На основе высокодетальных исследований установлено положение границ трех последних геомагнитных инверсий: Матуяма–Брюнес, Харамильо–Матуяма (верхняя граница Харамильо) и Матуяма–Харамильо (нижняя граница Харамильо). Граница Матуяма–Брюнес в обоих опорных разрезах обнаружена в нижней части педокомплекса PC9, соответствующего морской изотопной стадии (МИС) 19. Верхняя граница субхрона Харамильо зафиксирована в нижней части педокомплекса PC14 (МИС 28b), а нижняя граница этого субхрона в разрезе Хонако-II — в основании PC16 (МИС 31). Установлено, что границы Матуяма–Брюнес и Харамильо–Матуяма расположены выше ранее принятых стратиграфических уровней [Пеньков, Гамов, 1980; Додонов, 2002]. Уточненное положение этих границ согласуется с их положением относительно глобальной изотопно-кислородной шкалы (рис. 4), что позволяет устранить существовавшие противоречия между магнитостратиграфическими и климатостратиграфическими построениями для лёссово-почвенных серий региона.

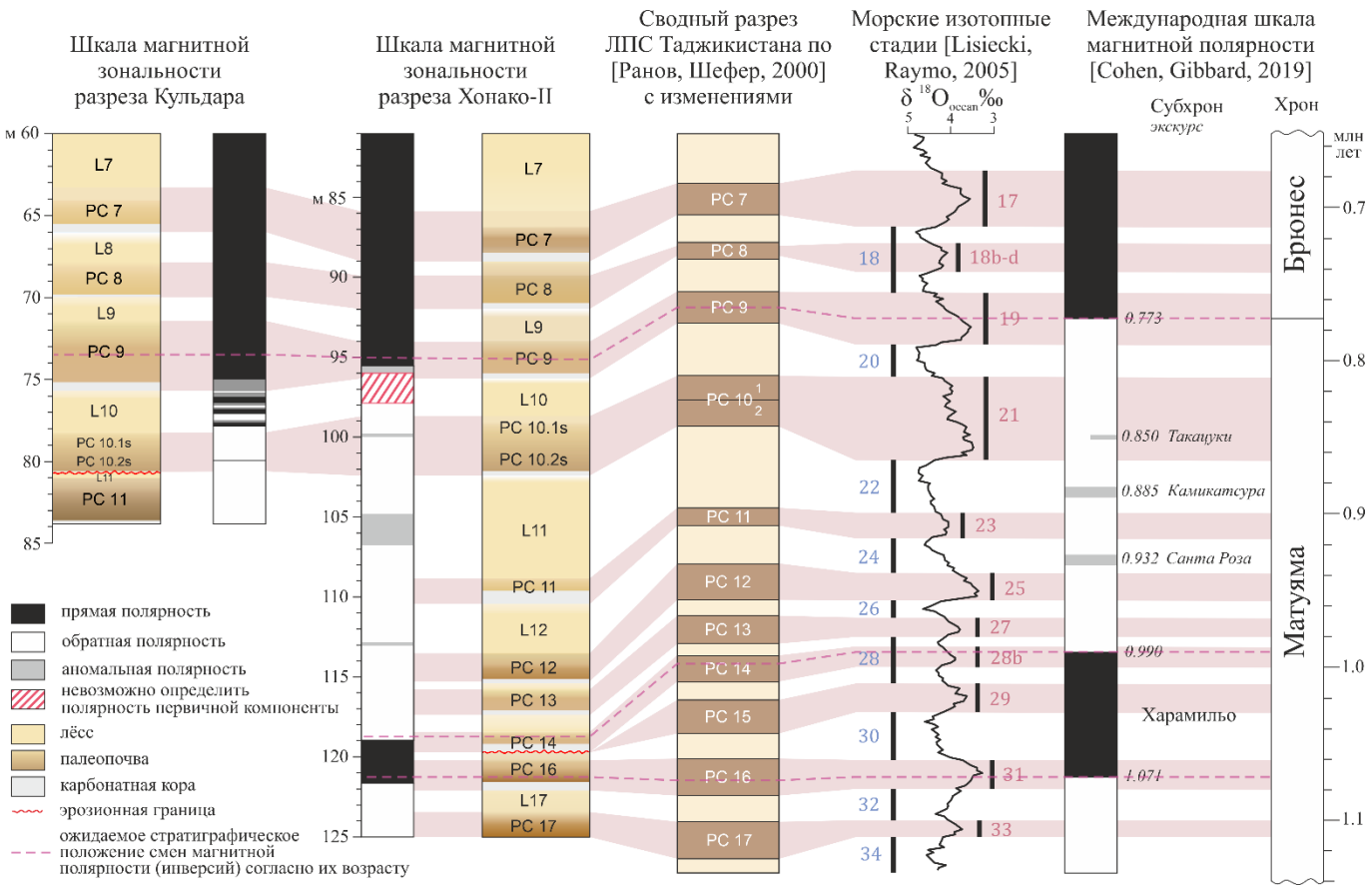

Рисунок 4. Корреляция шкал магнитной зональности и стратиграфических колонок разрезов Кульдара и Хонако-II со сводным разрезом лёссово-почвенных серий Таджикистана [Ранов, Шефер, 2000], изотопно-кислородной кривой LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005] и международной шкалой магнитной полярности [Cohen, Gibbard, 2019]

В ходе исследования установлено, что палеомагнитная запись лёссово-почвенных отложений позволяет выявлять интервалы геомагнитной нестабильности, но не обеспечивает полного восстановления последовательного изменения направлений геомагнитного поля во время инверсий и экскурсов. Для таких интервалов характерны снижение интенсивности естественной остаточной намагниченности, ухудшение качества выделения характеристической компоненты намагниченности и значительный разброс направлений между образцами-дублями внутри одного стратиграфического уровня. Наблюдаемые множественные скачки полярности в зонах перехода инверсий связаны с различной временной задержкой формирования литогенной и педогенной составляющих естественной остаточной намагниченности. Кроме того, можно ожидать [см., например, Spassov et al., 2003a], что фиксация сигнала в лёссах по преимущественно пост-детритовому механизму, будет происходить быстрее, чем в почвах, где при формировании намагниченности преобладает химический механизм. Если так, то степень сглаживания геомагнитного сигнала при палеомагнитной записи в лёссах будет меньше и, соответственно, вероятность и достоверность обнаружения в них экскурсов будет выше, чем в почвах.

Для интерпретации зон аномальной палеомагнитной записи было проведено сопоставление опубликованных записей геомагнитных экскурсов позднего этапа хрона Матуяма, полученных по вулканическим породам, морским и континентальным осадкам. Аномальная зона в пачке L11 разреза Хонако-II, накопление которой происходило в ледниковье МИС 22, интерпретирована как запись экскурса Камикатсура. В предположении постоянной скорости осадконакопления в пределах

L11, медианный возраст и продолжительность зафиксированного аномального события составляют 0,88 млн лет и ~9 тыс. лет, соответственно. Дополнительным подтверждением служит сходство стратиграфической позиции и характера аномальной записи с записью экскурса Камикатсура в лёссовом разрезе Баоцзи (Китай), где также наблюдаются частые флуктуации палеомагнитных направлений и снижение интенсивности остаточной намагниченности [Yang et al., 2004] (рис. 5).

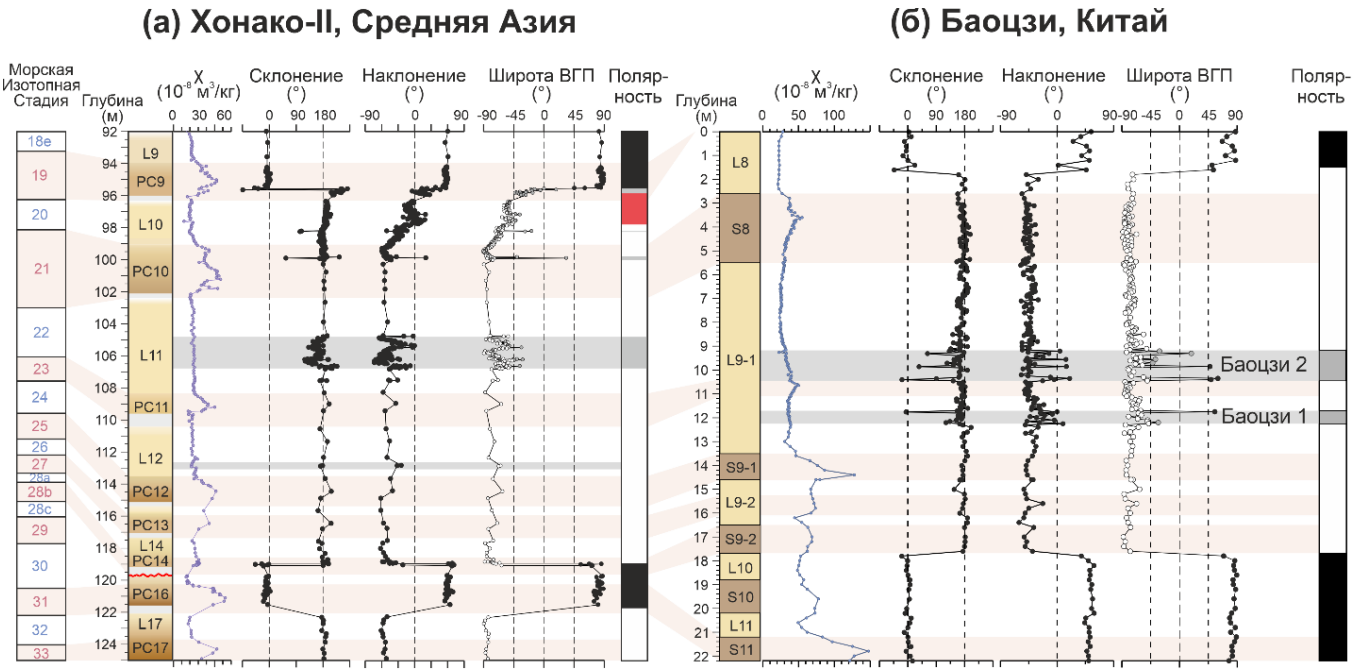

Рисунок 5. Сравнение палеомагнитных данных в разрезах лёссово-почвенных серий для стратиграфического интервала ниже инверсии геомагнитного поля Матуяма–Брюнес: *а* – разрез Хонако-II, Таджикистан, Средняя Азия [Kulakova, Kurbanov, Sosin, 2026]; *б* – разрез Баоцзи, южная часть Китайского Лёссового Плато [Yang et al., 2004]

В нижней части лёссовой пачки L12 (МИС 24) рекогносцировочным опробованием был выделен уровень с аномальным палеомагнитным поведением. Медианный возраст аномалии оценивается в ~0,93 млн лет, что позволяет коррелировать ее с экскурсом Санта Роза [Singer et al., 1999]. Аналогичные записи события Санта Роза на соответствующем стратиграфическом уровне известны в лёссовых разрезах Китая [Yang et al., 2004; Pan et al., 2002; Wang et al., 2010]. Подробная характеристика этого события требует сплошного отбора вокруг аномального блока и детальных исследований.

Аномальные зоны в PC10 разрезов Кульдара и Хонако-II могут соответствовать слабо задокументированному экскурсу Такацуки (~0,85 млн лет), известному для МИС 21 [Takasugi, Hyodo, 1995]. При этом в разрезе Хонако-II аномалия выявлена в нижней части PC10.1s, а в разрезе Кульдара – в верхней части PC10.2s. Более низкое стратиграфическое положение аномалии в разрезе Кульдара может объясняться большей глубиной фиксации палеомагнитного сигнала вследствие более интенсивного увлажнения отложений, обусловленного различиями в геоморфологическом положении разрезов. Однако природа аномальных направлений требует дополнительной проверки, поскольку нельзя исключить влияние лабораторного перемагничивания.

5.4. Возрастная модель разрезов

На основе литостратиграфического расчленения, корреляции вариаций магнитной восприимчивости с морской изотопно-кислородной шкалой LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005], а также

данных люминесцентного и космогенного датирования и магнитостратиграфических реперов построены возрастные модели трех изученных лёссово-почвенных разрезов. Для верхних частей разрезов использованы люминесцентные датировки, полученные в рамках проекта THOCA [Buylaert et al., 2024; Challier et al., 2024; Sørensen et al., 2026], а для более древних отложений Кульдары и Хонако-II — установленные палеомагнитные границы Матуяма–Брюнес и субхрона Харамильо [Kulakova, Kurbanov, 2023; Kulakova, Kurbanov, Sosin, 2026]. Дополнительными независимыми возрастными ограничениями служили космогенные датировки археологических артефактов из PC4, PC5 и PC6 [Sørensen et al., 2026]. В результате выделены 34 реперные возрастные точки для разреза Хонако-II, 25 – для разреза Кульдара и 15 – для разреза Оби-Мазар. Возраст промежуточных стратиграфических уровней определен линейной интерполяцией между реперными точками. В отдельных интервалах возрастные оценки дополнительно уточнены с использованием байесовского моделирования люминесцентных дат.

Глава 6. Динамика атмосферной пыли в Афгано-Таджикской депрессии за последние 1,1 млн лет по результатам исследований магнитной анизотропии лёссово-почвенных отложений Южного Таджикистана

6.1. Введение

Во введении к шестой главе рассматривается влияние крупных климатических перестроек плейстоцена, включая среднеплейстоценовый переход (MPT) и событие среднего Брюнеса (MBE), на атмосферный перенос минеральной пыли. Несмотря на установленное усиление пылевого потока в ледниковые эпохи, остается неясным, сопровождалось ли оно изменением преобладающих направлений ветров и источников пыли или происходило при сохранении прежних траекторий переноса. Особенно слабо изучена долговременная динамика атмосферной циркуляции на юге Центральной Азии: большинство исследований направлений пылепереноса охватывает не более двух последних ледниково-межледниковых циклов [Häggi et al., 2019; Мещерякова, Курбанов, Павлов, 2023; Jia et al., 2022; Li Yue et al., 2022a, 2022b], а более продолжительные реконструкции основаны преимущественно на косвенных показателях, таких как гранулометрический состав и магнитная восприимчивость отложений [Jia et al., 2018; Lu et al., 2020; Li Yue et al., 2024]. В связи с этим в главе поставлена задача реконструировать направления атмосферного переноса пыли в Афгано-Таджикской депрессии за последние 1,1 млн лет по данным анизотропии магнитной восприимчивости лёссово-почвенных отложений трех опорных разрезов с учетом возможных постседиментационных изменений их магнитной текстуры.

6.2. Методика исследования

Основным методом исследования являлось изучение анизотропии магнитной восприимчивости (AMS), позволяющее оценить преимущественную ориентировку магнитных частиц в осадке [Bradák et al., 2020]. Всего исследовано 4770 образцов из разрезов Хонако-II (2083 образца), Кульдара (2439 образцов) и Оби-Мазар (248 образцов). Для исключения образцов со слабо определенными главными осями магнитной анизотропии применялась статистическая фильтрация. Дополнительно изучалась частотнозависимая анизотропия магнитной восприимчивости (fdAMS), отражающая ориентировку тонкодисперсных суперпарамагнитных частиц. Интерпретация полученных магнитных текстур выполнялась по модели, где преимущественная ориентировка максимальных осей анизотропии kmax рассматривается как показатель оси переноса атмосферной пыли [Tarling, Hrouda, 1993; Bradák et al., 2020]. Определение направления движения частиц по оси определялось с учетом орографического и геоморфологического контекста, а также на основе

сопоставления с современным переносом пыли. Современный климат и наблюдения ветрового режима получены на основе анализа метеорологических наблюдений на станциях Ховалинг и Курган-Тюбе за 2011–2025 гг. и данных атмосферного реанализа ERA5 за 1940–2022 гг. (рис. 1, б).

6.3. Результаты исследования

6.3.1. Современный климат и наблюдения ветрового режима региона

Анализ современного ветрового режима для ячейки сетки, показанной на рис. 1б и соответствующей локации Ховалингского лёссового плато, на трех изобарических уровнях показал, что направления ветров определяются орографией и местным рельефом. На уровне давления 250 гПа (высоте около 10 км над уровнем моря) преобладает западный перенос воздушных масс, соответствующий планетарной циркуляции в умеренных широтах (рис. 6, а). На уровне давления 750 гПа (высота около 2,5 км) доминируют южные и юго-западные ветры (рис. 6, б), распределение воздушных потоков на этом уровне существенно модулируется орографией региона. Приземная циркуляция в значительной степени определяется местным рельефом и характеризуется реверсивным горно-долинным режимом (рис. 6, в).

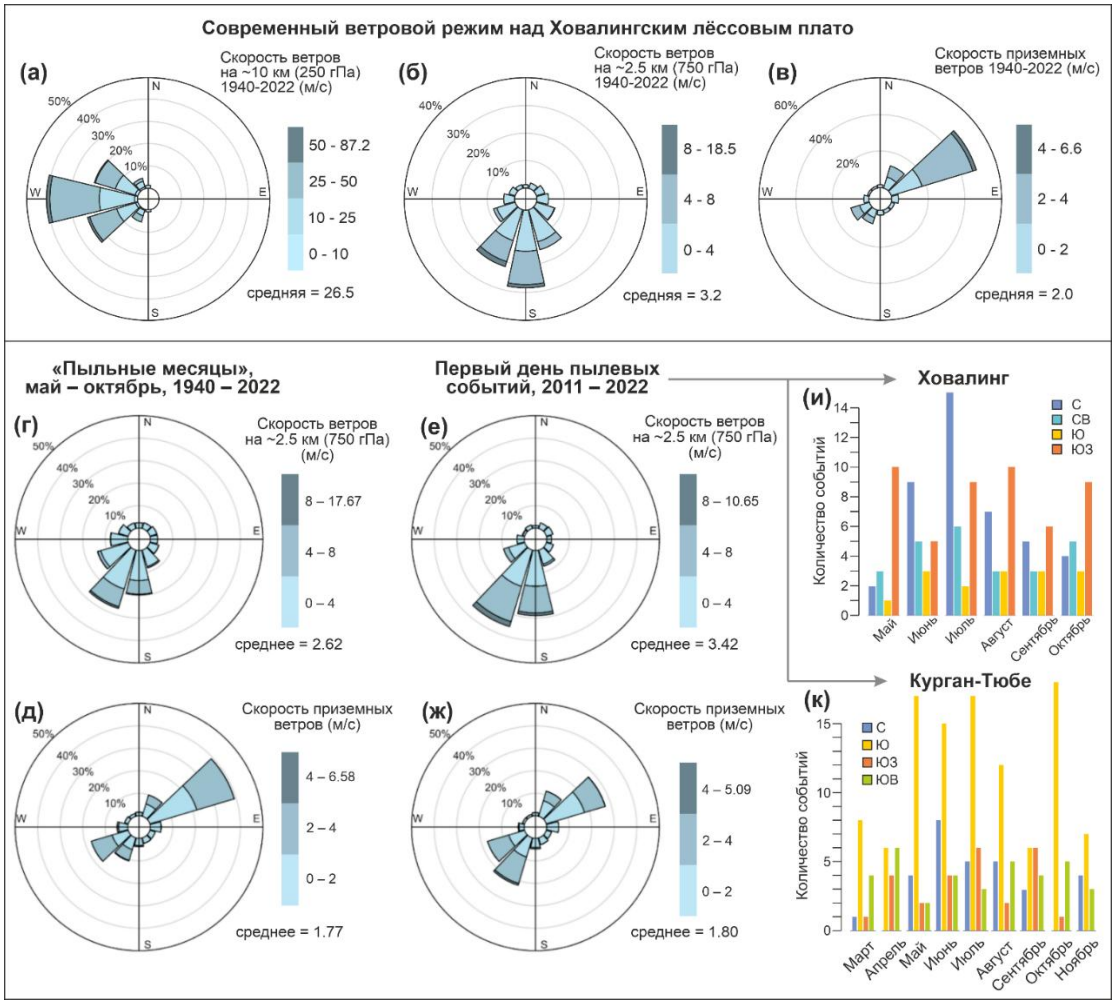

Рисунок 6. Ветровой режим над Ховалингским лёссовым плато, представленный повторяемостью (%) направлений и скорости ветра из модели ERA5 за 1940–2022 гг. [Hersbach et al., 2020]: *а* – ветры на высоте ~ 10 км над уровнем моря (250 гПа); *б* – ветры на высоте ~2,5 км над уровнем моря (750 гПа); *в* – приземные ветры (10 м над землей); *г, д* – скорость и направление ветра на высоте ~2,5 км (*г*) и у поверхности (*д*), рассчитанные за период 1940–2022 гг. для сезона пылевых событий (май–октябрь); *е, ж* – скорость и направление ветра на высоте ~2,5 км (*е*) и у поверхности (*ж*) в первый день пылевого события, выделенного по наблюдениям на метеостанции в Ховалинге, за период 2011–2022 гг. *и, к* – Направления ветра, зарегистрированные во время пылевых событий на метеостанциях Ховалинг (*и*) и Курган-Тюбе (*к*)

Сезонный анализ приземных ветров и ветров на высоте ~2,5 км показал, что наибольшие скорости ветра отмечаются в зимний период, а для летних месяцев появляется отчетливый кластер ветров юго-западного направления. Появление этих ветров, по всей видимости, связано с особым атмосферным процессом – вторжением воздушных масс, несущих пыль, называемых в Таджикистане «афганцем» (или пылевые плюмы [Li et al., 2019]).

Анализ погодных наблюдений с метеорологических станций в Ховалинге и Курган-Тюбе (локация показана на рис. 1, б) позволил установить, что пылевые события наиболее характерны для теплого и сухого периода года, преимущественно с мая по октябрь, с максимумом повторяемости в июле. Их начало связано с усилением южных и юго-западных ветров, которые преобладают на высоте около 2,5 км и наблюдаются у поверхности на фоне местной горно-долинной циркуляции (рис. 6, г–к).

6.3.2. Общая характеристика параметров анизотропии в лёссово-почвенных толщах

Результаты AMS-измерений показали, что большинство образцов из разрезов Хонако-II и Кульдара характеризуется преимущественно уплощенными эллипсоидами магнитной анизотропии с субгоризонтальным положением максимальных и средних осей (kmax и kint) и субвертикальным положением минимальных осей (kmin). Степень анизотропии Pj в целом невелика и преимущественно составляет 1–2% для лёссов и менее 1% для палеопочв. Установлено, что лёссовые горизонты обладают статистически значимо более выраженной анизотропией, чем палеопочвенные, что проявляется в повышенных значениях параметров Pj (степень анизотропии), F (плоскостная анизотропия) и L (линейная анизотропия). При этом для обоих разрезов наблюдается слабое увеличение степени анизотропии с глубиной залегания, вероятно связанное с постепенным уплотнением отложений.

6.3.3 – 6.3.5. Магнитная текстура отложений изученных разрезов

В разрезе Хонако-II для большинства стратиграфических подразделений установлена устойчивая субмеридиональная ориентировка максимальных осей эллипсоида AMS. Данная закономерность прослеживается на протяжении практически всей изученной последовательности, охватывающей временной интервал от 0,25 до 1,1 млн лет, и согласуется с опубликованными результатами исследования более молодых отложений [Мещерякова, Курбанов, Павлов, 2023]. Для большинства горизонтов характерны хорошо согласованные направления kmax и отсутствие выраженного отклонения kmin от вертикали. Сходство результатов, полученных по образцам из удаленных друг от друга траншей, свидетельствует о латеральной устойчивости ориентировки главных осей магнитной анизотропии.

Разрез Кульдара характеризуется меньшей степенью анизотропии и более значительным разбросом направлений максимальных осей. В нижней части разреза преобладают широтные и северо-западные – юго-восточные ориентировки kmax, тогда как в средней и верхней частях более отчетливо выражено северо-восточное – юго-западное направление. Отмеченные различия могут отражать изменение влияния локальной топографии на ветровой режим в процессе развития долины реки Оби-Мазар.

В отличие от разрезов Хонако-II и Кульдара, большинство исследованных горизонтов разреза Оби-Мазар характеризуется магнитными текстурами, существенно отличающимися от первичных осадочных: трехосными эллипсоидами анизотропии с выраженным отклонением минимальных осей от вертикали или даже их горизонтальным положением, аномальным распределением главных осей анизотропии или значительным разбросом направлений.

6.4. Обсуждение результатов

6.4.1. Первичные и вторичные магнитные текстуры в лёссово-почвенных отложениях

Для оценки пригодности магнитной текстуры к реконструкции палеоветров отдельно рассмотрено влияние постседиментационных процессов. Показано, что биотурбация приводит к разупорядочению главных осей магнитной анизотропии, причем этот эффект сильнее проявляется в разрезе Кульдара, что может быть связано с более благоприятными условиями для деятельности почвенной фауны в локации разреза [Chirakkal et al., 2025b]. При этом палеомагнитная запись биотурбированных горизонтов может оставаться ненарушенной, что свидетельствует о различии ансамблей магнитных частиц, ответственных за магнитную текстуру и остаточную намагниченность, а также косвенно подтверждает преимущественное формирование остаточной намагниченности по пост-детритовому механизму. Исследования fdAMS выявили локальные признаки переориентации магнитных наночастиц в отдельных палеопочвенных горизонтах разреза Кульдара, предположительно связанные с внутрипочвенной фильтрацией вод [Niezabitowska et al., 2024]. Однако вклад суперпарамагнитных частиц в общую низкочастотную AMS оказался незначительным, и существенного изменения общей магнитной текстуры вследствие педогенеза не установлено.

Наиболее выраженные признаки вторичного нарушения магнитной текстуры обнаружены в разрезе Оби-Мазар, подвергшемся крупному оползневому событию в 2015 г. Наблюдаемые нарушения согласуются с деформационными магнитными текстурами [например, Parés, 2015; Schöfisch et al., 2021; 2023] и вызваны, вероятно, проникающими деформациями от гравитационных процессов, способными изменять магнитную текстуру в слабо анизотропных образцах in situ [Geiser, Engelder, 1983].

Полученные результаты позволили выявить измененные магнитные текстуры и исключить горизонты с признаками вторичных нарушений из реконструкции направлений палеоветров. Реконструкция направлений эолового переноса пыли выполнена по первичным магнитным текстурам разрезов Хонако-II и Кульдара, существенно измененная магнитная текстура разреза Оби-Мазар в работе не рассматривается.

6.4.2. Интерпретация магнитных текстур разрезов Кульдара и Хонако-II и их связь с пылепереносящими ветрами в современности

Сопоставление ориентировок максимальных осей магнитной восприимчивости с современными метеорологическими данными показало, что магнитная текстура разреза Хонако-II преимущественно отражает направления региональных пылепереносящих ветров (рис. 7, а). Субмеридиональная ориентировка kmax согласуется с направлениями современных южных и юго-западных ветров на высоте около 2,5 км, особенно в периоды пылевых событий. Следовательно, магнитная текстура отложений в центральной части водоразделов способна фиксировать преимущественные направления переноса пыли в атмосфере, а влияние приземных воздушных потоков, направление которых определяется локальным рельефом, на магнитную текстуру незначительно.

По сравнению с разрезом Хонако-II отложения разреза Кульдара характеризуются меньшей степенью магнитной анизотропии и более значительным разбросом ориентировок максимальных осей kmax, что может свидетельствовать о большей изменчивости направлений пылепереносящих ветров. Эти различия, вероятно, обусловлены геоморфологической позицией разреза, в частности меньшей высотой разреза Кульдара (разница высот современных поверхностей 600 м) и его близостью к долине реки Оби-Мазар, что усиливает влияние горно-долинной циркуляции (рис. 7,

б). Более согласованные северо-восточные – юго-западные ориентировки kmax в верхней части разреза могут отражать постепенное расчленение рельефа и усиление топографического контроля над направлениями ветров [Schäfer, Ranov, Sosin, 1998]. Таким образом, геоморфологическое положение разрезов существенно влияет на характер регистрируемой магнитной текстуры и должно учитываться при реконструкции направлений эолового переноса. Лёссовые отложения на приподнятых участках плато особенно хорошо подходят для записи направленного сигнала региональных ветров, переносящих пыль.

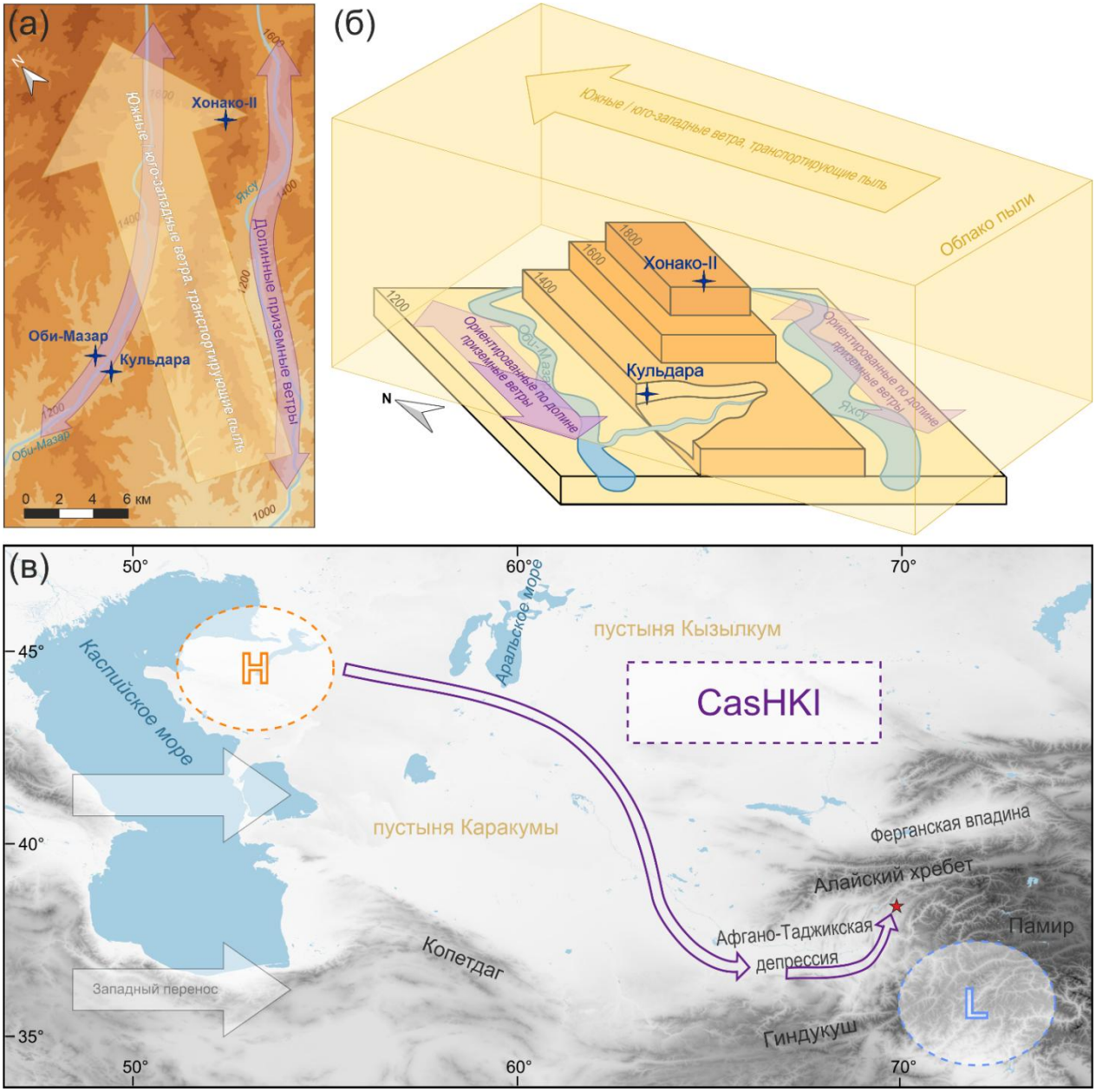

Рисунок 7. *а* – Местоположение изученных разрезов и основные направления ветров на различных высотах: приземные ветры (фиолетовый цвет), направления которых в значительной степени определяются местным рельефом; ветры, переносящие пыль (желтый цвет), на высоте около 2,5 км над уровнем моря (750 гПа), не зависящие от местной топографии. *б* – Концептуальная модель, иллюстрирующая динамику ветров, показанную на подрисунке (*а*). *в* – Схема современной атмосферной циркуляции, определяющей перенос минеральной пыли в Афгано-Таджикскую депрессию. H и L обозначают области повышенного и пониженного атмосферного давления, соответственно. Направления пылепереносящих ветров связаны с барическим градиентом между Каспийским регионом и Гиндукушем, который характеризуется Каспийско-Гиндукушским индексом (CasHKI) [Kaskaoutis et al., 2016]

6.4.3. Ветровой режим переноса пыли в Афгано-Таджикской депрессии на протяжении последних 1,1 млн лет

Полученные данные свидетельствуют об устойчивости преимущественных направлений атмосферного переноса минеральной пыли в Афгано-Таджикской депрессии на протяжении последних 1,1 млн лет, несмотря на крупные климатические перестройки плейстоцена, включая среднеплейстоценовый климатический переход и событие среднего Брюнеса. Наиболее вероятным объяснением является длительное сохранение регионального механизма переноса пыли, сходного с современным. В настоящее время пылевая активность на юге Центральной Азии в значительной степени связана с крупномасштабной западной атмосферной циркуляцией и преобразованием воздушных потоков в южные и юго-западные ветры под влиянием барического градиента между Каспийским морем и Гиндукушем, характеризуемым индексом CasHKI [Kaskaoutis et al., 2016; 2017], и окружающих горных систем (рис. 7, в).

Рассмотрены альтернативные механизмы атмосферной циркуляции, такие как Индийский летний муссон и Сибирско-Монгольский антициклон, влияние которых упоминалось в более ранних работах [Dodonov, Baiguzina, 1995; Dodonov et al., 2006]. Полученные данные AMS не дают оснований рассматривать эти системы как основной механизм переноса пыли, участвующей в формировании лёсса. Однако они не исключают влияния муссона на гидроклимат региона в отдельные межледниковые периоды, а также не исключают изменений интенсивности и сезонности проявления пылевых событий под влиянием этих механизмов.

Устойчивость реконструированных направлений ветров указывает на относительное постоянство географического положения основных областей поступления минеральной пыли, расположенных преимущественно к западу и юго-западу от района исследования. В качестве возможных непосредственных источников пыли, поступающей на Ховалингское лёссовое плато, рассматриваются пустыни Каракумы и Кызылкум [Kang et al., 2025a], а также более близкие области накопления тонкодисперсного материала в северном Афганистане [Li et al., 2019: Nobakht, Shahgedanova, White, 2021]. Следует отметить, что устойчивость направлений ветров не доказывает неизменности состава конкретных источников минеральной пыли, что важно в контексте исследования регионального изменения скалярных магнитных свойств отложений. Длительное сохранение регионального механизма переноса пыли, сходного с современным, также предполагает устойчивое положение крупных орографических барьеров Памира, Алая и Гиндукуша, контролирующих движение воздушных масс, за последние 1,1 млн лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы проведены комплексные палеомагнитные и петромагнитные исследования опорных лёссово-почвенных разрезов Южного Таджикистана, направленные на уточнение их магнитостратиграфии и хроностратиграфии, изучение особенностей регистрации геомагнитных событий в лёссовых отложениях и реконструкцию долговременной динамики атмосферного переноса минеральной пыли в Афгано-Таджикской депрессии. Полученные результаты позволили решить поставленные исследовательские задачи и существенно дополнить представления об истории формирования лёссово-почвенных серий региона на протяжении последних 1,1 млн лет.

В результате детальных палеомагнитных исследований разрезов Хонако-II и Кульдара уточнено положение границ трех последних геомагнитных инверсий и выявлена запись геомагнитного экскурса Камикатсура, произошедшего на позднем этапе эпохи Матуяма. На основе

полученных данных построена новая шкала магнитной полярности лёссово-почвенных серий Южного Таджикистана, обеспечивающая более надежную основу для региональной и межрегиональной корреляции четвертичных отложений.

Исследования анизотропии магнитной восприимчивости позволили оценить сохранность первичной эоловой магнитной текстуры и выявить влияние постседиментационных процессов на ориентировку магнитных частиц в отложениях. На основе анализа сохранившихся первичных магнитных текстур реконструированы преимущественные направления ветров, переносивших минеральную пыль в Афгано-Таджикской депрессии на протяжении последних 1,1 млн лет. Установлена устойчивость этих направлений на фоне крупных климатических перестроек плейстоцена, включая среднеплейстоценовый климатический переход и событие среднего Брюнеса. Сопоставление полученных результатов с современными метеорологическими наблюдениями позволило предложить наиболее вероятное объяснение устойчивости направлений эолового переноса, связанное с длительным преобладанием западной атмосферной циркуляции и сохранением орографического контроля над региональными воздушными потоками. Полученные результаты также указывают на долговременное постоянство географического положения основных источников минеральной пыли, при возможных изменениях состава поступавшего материала.

Рекомендации по использованию полученных результатов. Уточненная хроностратиграфия опорных разрезов позволяет надежно определять возраст археологических горизонтов и создает основу для дальнейшего исследования этих архивов в целях палеоклиматических и палеогеографических реконструкций.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Несмотря на завершенность настоящего исследования и решение поставленных задач, полученные результаты открывают возможности для дальнейшего развития работы. Наиболее перспективными представляются следующие направления:

1. Уточнение положения и характеристика палеомагнитной записи геомагнитного экскурса Санта Роза в разрезе Хонако-II. В ходе настоящего исследования выявлен интервал, предположительно содержащий запись данного события. Его детальное изучение может внести существенный вклад в решение проблемы идентификации и разграничения геомагнитных экскурсов поздних этапов эпохи Матуяма.
2. Получение детальной записи перехода геомагнитной инверсии Матуяма–Брюнес в разрезе Хонако-II. Перспективным представляется исследование переходного интервала на участке обнажения, не затронутом вторичным перемагничиванием вследствие удара молнии, с последующим сопоставлением полученных результатов с записью этого события в разрезе Кульдара. Особую значимость такого сравнения определяют установленные различия между разрезами в условиях увлажнения, интенсивности биотурбации и степени проявления педогенных процессов. Сопоставление палеомагнитных записей позволит оценить влияние этих факторов на задержку фиксации палеомагнитной записи в лёссово-почвенных отложениях.
3. Дальнейшее развитие палеоклиматических реконструкций Южного Таджикистана. В этом направлении представляют интерес две нерешенные задачи. Первая заключается в выяснении того, вызвано ли региональное усиление магнитных свойств отложений, накопившихся после события среднего Брюнеса, изменением климатических параметров среды (отразившись в интенсивности почвообразования), изменением состава пылеватого материала в источнике или имеется сочетание этих факторов. Вторая задача связана с разработкой количественных

реконструкций атмосферных осадков в прошлом на основе комплексного изучения петромагнитных и оптических свойств лёссово-почвенных отложений.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК:

1. **Кулакова Е.П.**, Анойкин А.А., Худжагелдиев Т.У., Сосин П.М., Токарева О.А., Караев А.Ч., Рыбалко А.Г., Курбанов Р.Н. Стратиграфия и геохронология стоянки раннего палеолита Кульдара (Таджикистан) // Геоморфология и палеогеография. — 2024. — № 2. — С. 86-107.

2. Anoikin A., Sosin P., Rybalko A., Khudjageldiev T., Sharipov A., Karayev A., **Kulakova E.**, Meshcheryakova O., Tokareva O., Kurbanov R. Lakhuti-IV – A new site of the early Palaeolithic in Central Asia (Tajikistan) // Archaeological Research in Asia. — 2023. — Vol. 35. — 100466.

3. Buylaert J.P., Challier A., **Kulakova E.P.**, Taratunina N.A., Thomsen K.J., Utkina A.O., Sosin P.M., Tokareva O.A., Anoikin A.A., Khujageldiev T.U., Karayev A.C., Ubaydulloev N.K., Murray A.S., Kurbanov R.N. A luminescence dating study of the upper part of the loess-palaeosol sequence at Kuldara, Khovaling Loess Plateau, Tajikistan // Quaternary Geochronology. — 2024. — Vol. 82. — 101545.

4. Chirakkal A., **Kulakova E.**, Steindal C.C., Birk J.J., Anoikin A., Kurbanov R., Sosin P., Shu P., Wright D.K. Geochemical records from loess sediments provide insights into early hominin influence on the landscape in the Khovaling region of Southern Tajikistan, Central Asia // Organic Geochemistry. — 2026. — Vol. 212. — 105088.

5. **Kulakova E.P.**, Kurbanov R.N. First paleomagnetic data on the Matuyama-Brunhes transition in the loess-paleosol series of Tajikistan // In: Kosterov A., Lyskova E., Mironova I., Apatenkov S., Baranov S. (eds) Problems of Geocosmos–2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. — Springer, Cham. — 2023. — P. 67-84.

6. **Kulakova E.P.**, Kurbanov R.N., Sosin P.M. New high-resolution magnetostratigraphic record of the last 1.2 Myr from loess-paleosol section Khonako-II in Southern Tajikistan, Central Asia // Quaternary Science Reviews. — 2026. — Vol. 371. — 109689.

7. Schneider R., **Kulakova E.**, Almqvist B., Niezabitowska D., Leeding R., Kurbanov R., Stevens Th. Stable dust-transporting winds in Central Asia over the last 1.2 million years // Quaternary Science Reviews. — 2026. — Vol. 376. — 109799.

8. Sørensen A., Anoikin A., Kolobova K., Khudjageldiev T., Sosin P., Khormali F., Taratunina N., **Kulakova E.**, Tokareva O., Meshcheryakova O., Chirakkal A., Challier A., Schneider R., Pavlov V., Karayev A., Sharipov A., Ashurmadov I., Rybalko A., Wright D., Murray A., Stevens T., Ujvari G., Birk J., Olsen J., Hansen T., Kurbanov R., Buylaert J.-P., Knudsen M.F. Absolute chronology of the Early Paleolithic Karatau Culture in Central Asia // Nature Communications. — 2026. — Vol. 17. — 8217.

9. Sørensen A.L., Hansen T.M., Nørgaard J., Buylaert J.P., Murray A.S., **Kulakova E.**, Kurbanov R., Knudsen M.F. CosmoChron: A versatile age-depth modeling approach using cosmogenic nuclides and direct age constraints // Quaternary Geochronology. — 2024. — Vol. 85. — 101618.