

## ОПЫТ РЕКОНСТРУКЦИЙ НАПРАВЛЕНИЙ ПАЛЕОВЕТРОВ В ПЛЕЙСТОЦЕНЕ ПО АНИЗОТРОПИИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ЛЁССОВО-ПОЧВЕННЫХ СЕРИЙ ТАДЖИКИСТАНА И ПРИАЗОВЬЯ

© 2023 г. О. А. Мещерякова<sup>1, 2, 3</sup>, Р. Н. Курбанов<sup>3, 4</sup>, В. Э. Павлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт археологии и этнографии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт Географии РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

\*E-mail: oliya@ifz.ru

Поступила в редакцию 14.12.2022 г.

После доработки 21.03.2023 г.

Принята к публикации 26.03.2023 г.

Для реконструкции направлений палеоветров на протяжении среднего и верхнего плейстоцена изучена магнитная текстура опорных лёссово-почвенных разрезов Хонако-II (Южный Таджикистан), Беглица и Чумбур-Коса (Приазовье). Палеопочвы и лёссы разреза Хонако-II представляют, в целом, перспективный объект для изучения палеоветров. Наши данные указывают на то, что во время накопления верхних 40.8 м разреза Хонако-II преобладали ветры либо ~ северо-западных, либо ~ северо-восточных направлений. При этом, если во время накопления нижней половины исследованной толщи (конец среднего плейстоцена) при смене эпох с теплой (педокомплекс 2) на холодную (лёсс 2) происходило “переключение” преобладающих ветров (их направление менялось с северо-западного на северо-восточное), то для времени накопления верхней половины толщи (поздний плейстоцен, педокомплекс 1 и лёсс 1), преобладания какого-либо из этих направлений не наблюдалось и заметный вклад в общее распределение вносили ветры промежуточных направлений. Последнее может рассматриваться как свидетельство меньшей контрастности розы ветров в более поздние эпохи, отвечавшие времени формирования пород верхней части разреза. Изучение магнитной текстуры горизонтов лёссов и палеопочв разрезов Приазовья показали ее нарушенность, что не позволяет использовать материал для реконструкции палеоветров. В ходе выполнения работ показано, что широко используемый при опробовании лёссово-почвенных отложений метод отбора образцов с помощью пластиковых контейнеров может привести к существенному искажению первичной магнитной текстуры.

*Ключевые слова:* лёссово-почвенные серии, Таджикистан, Приазовье, анизотропия магнитной восприимчивости, магнитная текстура, направления палеоветра.

DOI: 10.31857/S000233372305006X, EDN: VZMYBG

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день тема климатических изменений является широко обсуждаемой: ведутся горячие дискуссии о глобальном потеплении, весьма остро стоит вопрос о прогнозировании климата. Для построения климатических моделей, являющихся основным инструментом прогноза, необходимо иметь информацию о динамике изменения климата в геологическом прошлом: изучая прошлое, мы получаем ключ к настоящему и будущему. При этом, имеющиеся данные о динамике различных составляющих климатической системы (температура, осадки, направления

ветра и др.) более детально реконструированы для исторического периода и голоцена. Для более древних эпох эти данные становятся отрывочными. Эту информацию можно, в частности, получить при изучении лёссово-почвенных серий (ЛПС), представляющих собой уникальный палеогеографический архив, содержащий ценные сведения о климатических изменениях прошлого.

ЛПС в пределах Евразии распространены в виде сплошного покрова от берегов Атлантики до Китая (лёссовый пояс), а также покрывают значительные площади в Центральной Азии. Лёссы юга Восточно-Европейской равнины детально

исследованы в пределах Приазовья, где встречаются многочисленные обнажения на побережье Азовского моря. В Центральной Азии Южный Таджикистан является одним из наиболее важных районов распространения ЛПС в Евразии. Лёссово-почвенные отложения здесь характеризуются значительной мощностью и полнотой, что создает важные предпосылки для детального изучения палеоклиматических изменений, происшедших во время накопления этих отложений. Дополнительную ценность этим разрезам с точки зрения выполнения палеоклиматических реконструкций придает их географическое расположение: климатические изменения, происходящие на планете, особо контрастно должны отражаться во внутриконтинентальных регионах: в том числе в Центральной Азии.

Систематические исследования ЛПС Таджикистана были начаты в 80-х годах прошлого века. Результаты, полученные к началу текущего тысячелетия в рамках этих исследований, подробно отражены в монографии А.Е. Додонова [2002], статьях В.А. Ранова [2000] и работах А.А. Лазаренко [Лазаренко и др., 1977]. Несмотря на существенный вклад, внесенный этими исследователями в изучение ЛПС, ряд важных вопросов строения, генезиса и возраста ЛПС Таджикистана все еще остаются нерешенными. Более того, появляются и развиваются новые перспективные методы исследований, которых не было в арсенале исследователей XX в.

Одним из таких методов является исследование магнитной текстуры (МТ) пород, определяемой анизотропией магнитной восприимчивости (АМВ). Этот метод позволяет, в частности, реконструировать направления палеоветров, которые являются важным элементом климатической системы. Метод успешно применялся для различных лёссовых регионов мира: Китая [Liu et al., 1988], Сибири [Matasova et al., 2004], Аляски [Lagroix, Vanerjee, 2004b], Польши [Nawrocki et al., 2006], Украины и Венгрии [Bradak et al., 2018] и др. Однако до настоящего момента не было специальных исследований, посвященных изучению магнитной текстуры лёссово-почвенных отложений Таджикистана и Приазовья.

В настоящей работе мы приводим результаты исследований магнитной текстуры одного из опорных разрезов ЛПС Южного Таджикистана — Хонако-II и рассматриваем его значение для определения направлений палеоветров в этом регионе в позднем плейстоцене. Дополнительно нами выполнено исследование АМВ для стратотипических разрезов среднего и позднего плейстоцена ЛПС Восточного Приазовья (Русская

равнина, разрезы Беглица и Чумбур-коса). Опыт работ по этим объектам показывает, что далеко не во всех лёссово-почвенных разрезах магнитная анизотропия может быть использована для определения направлений палеоветров.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Хонако-II (38.359268° N, 70.046344° E) является одним из наиболее полных и детально исследованных разрезов ЛПС Южного Таджикистана. Объект располагается в 7 км к северо-востоку от поселка Ховалинг — центра одноименного административного района (рис. 1), в западной части крупного оползневого цирка. Хонако-II имеет мощность около 180 м и сложен осадочными неслоистыми недеформированными суглинисто-супесчанистыми породами светло-желтого или палевого цвета с высокой карбонатностью и пористостью. Разрез включает в себя до 24 педокомплексов (педокомплексов или ПК), формировавшихся на протяжении ~1.5 млн лет [Додонов, 1984]. Важной особенностью ЛПС плато Ховалинг в Южном Таджикистане является присутствие в них ряда стратиграфических уровней с культурными горизонтами, содержащими каменные орудия раннего и среднего палеолита [Ранов, 2000].

Нами изучена верхняя часть разреза Хонако-II (первые 40.8 м), которая включает два лёссовых горизонта (Л1 и Л2) и два педокомплекса (ПК1 и ПК2), состоящих из нескольких почвенных горизонтов. Хроностратиграфия ЛПС Таджикистана основана на корреляции магнитной восприимчивости горизонтов лёссов и палеопочв с изотопно-кислородной шкалой, представленной авторами работы [Lisiecki, Raymo, 2005], а также на люминесцентном датировании (термолюминесцентном и оптически-стимулированной люминесценции).

В ходе полевых работ для предварительного расчленения разреза Хонако-II нами была измерена магнитная восприимчивость с помощью полевого каппаметра КТ-5 (рис. 2). Измерения проводились непрерывно вдоль разреза с зачисткой вертикальных стенок, которые были подразделены на пикеты размером 80–150 см. В разрезе Хонако-II, как и в разрезах Китая, магнитная восприимчивость варьирует в диапазоне  $500–1500 \times 10^{-6}$  СИ, при этом ее значения в почвах в несколько раз выше, чем лёссов (рис. 2). Согласно работе [Додонов, 2002], ПК1 и ПК2 принято соотносить с межледниковыми эпохами МИС-5 (100–130 тыс. л. н.) и МИС-7 (180–243 тыс. л. н.). Отметим, однако, что имеются и другие точки зрения: некоторые исследователи (например, авторы работы [Поспе-

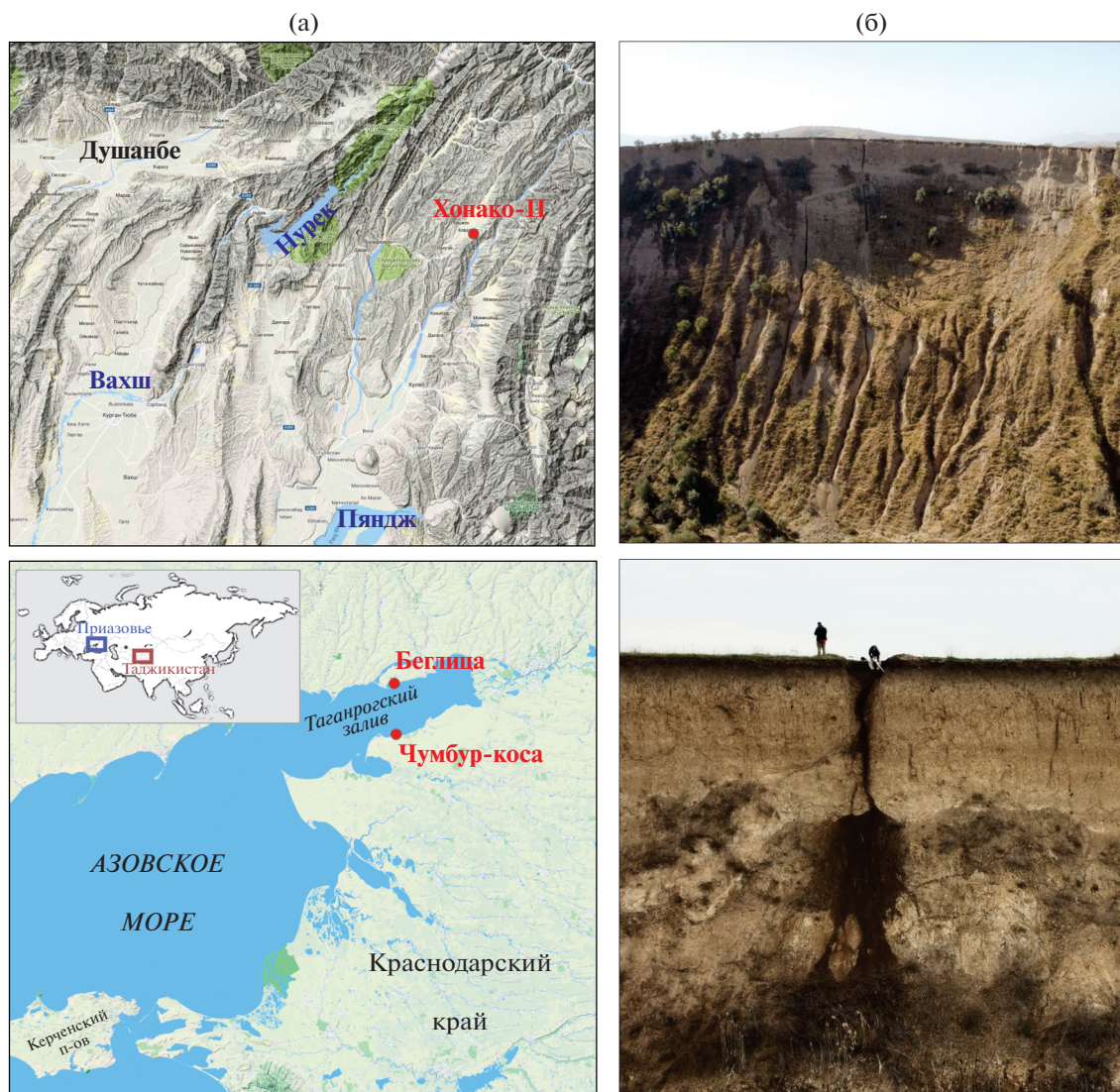


Рис. 1. Местоположение и общий вид лёссово-почвенного разреза Хонако-II (а) и разреза Беглиця (б).

лова и др., 2005]) коррелируют ПК1 с МИС 3 (53–71 тыс. л. н.).

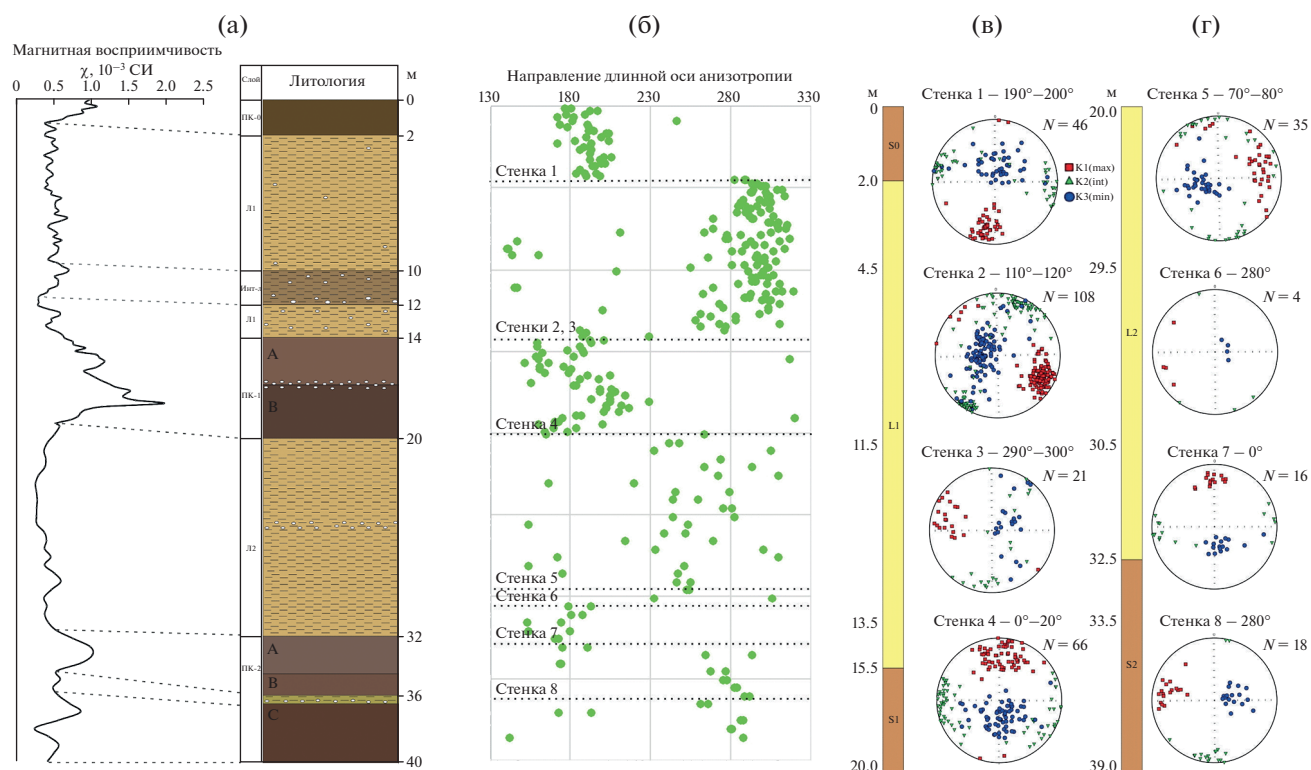
Согласно исследованию авторов работы [Поспелова и др., 2005] для близлежащего разреза Хонако-III основным носителем намагниченности в разрезе Хонако является магнетит, гематит присутствует в незначительных количествах. Магнитный минерал в почвах и лессах один и тот же, рост магнитной восприимчивости в почвах обусловлен увеличением концентрации магнетита. Нет оснований полагать, что магнитная минералогия образцов разреза Хонако-II существенно отличается от Хонако-III.

Отбор образцов из разреза Хонако-II осуществлялся из стенок заранее подготовленных нами траншей. Образцы отбирались из разноори-

ентированных стенок, при этом переход от одной стенки к другой был обусловлен выбором более свежей поверхности (не преобразованной процессами выветривания или склоновыми процессами) и производился на глубинах 4.5, 11.5, 13.5, 20, 29.5, 30.5, 33.5 м.

Для исследования магнитной текстуры ЛПС образцы отбирались двумя методами: (1) с использованием специальных немагнитных пластиковых контейнеров (производства ASC Scientific, объем 7 см<sup>3</sup>) и (2) путем распиловки отобранных вручную ориентированных блоков (штуфов). На сегодняшний день оба метода отбора широко используются при палео- и петромагнитных исследованиях ЛПС. Первый способ более производителен, однако, некоторые исследователи считают,





**Рис. 2.** (а) – Магнитная восприимчивость, измеренная полевым каппаметром; (б) – сопоставление направлений длинной оси анизотропии образцов, отобранных пластиковыми контейнерами, с литологической колонкой разреза Хонако-II; (в) – зависимость анизотропии магнитной восприимчивости образцов, отобранных пластиковыми контейнерами, от азимута экспозиции стенки отбора разреза Хонако-II.

что метод отбора образцов контейнерами может деформировать первичную осадочную магнитную текстуру, и, соответственно, предпочитают использовать значительно более трудоемкий метод отбора ориентированными блоками [Bradák et al., 2019].

При отборе первым методом немагнитные контейнеры размером  $2 \times 2 \times 2$  см вбивались силиконовым молотком в зачищенную поверхность стенок с использованием дополнительной деревянной прослойки между молотком и контейнером для равномерной нагрузки (вбивание, а не вдавливание производилось по причине очень сухого лессового материала). Интервал между уровнями отбора составлял 20 см на первых (сверху) 20 м разреза Хонако-II и 50 см на оставшихся 20.8 м. При этом на каждом опробуемом стратиграфическом уровне отбиралось по 2–3 ориентированных контейнера (образца). Ориентирование образцов выполнялось горным компасом Brunton Pocket Transit (производство Brunton Inc, США) по почти вертикальной поверхности грани контейнера, расположенной в направлении, противоположном направлению вбивания. Всего на верхнем интервале опробовано 100 стратиграфических уровней и

получено 240 ориентированных образцов, на нижнем интервале – опробовано 42 стратиграфических уровня и взято 84 ориентированных образца.

Для отбора вторым методом с интервалом 20 см отбирались ориентированные блоки размером  $10 \times 10 \times 20$  см, которые затем распиливались в лаборатории на кубики с ребром 2 см на специально оборудованном станке с алмазным диском. При этом для анализа использовалось от 4 до 5 образцов из одного (верхнего в блоке) стратиграфического уровня. Всего этим способом было опробовано 204 стратиграфических уровня и получено 878 индивидуальных ориентированных образцов.

Разрезы Беглица и Чумбур-коса расположены в Восточном Приазовье. Здесь, в береговых обрывах Азовского моря, вскрываются ЛПС юга Русской равнины, формировавшиеся на протяжении среднего и позднего плейстоцена. Лёссово-почвенный разрез Беглица является стратотипом позднеплейстоценовых ЛПС региона [Konstantinov et al., 2018]. Здесь выделяются две развитые палеопочвы МИС-5с и МИС-5е, толщи лёссов



МИС-4 и МИС-3, а также слабо развитая палеопочва МИС-3 [Velichko et al., 2017]. В разрезе Чумбур-коса вскрывается мощная толща ЛПС верхнего и среднего плейстоцена, где выделено 4 ПК, которые соотносятся с межледниковыми эпохами МИС-5, МИС-7, МИС-9 и МИС-11 [Chen et al., 2022]. Мощность данных разрезов составляет около 20 метров.

В разрезах Беглица и Чумбур-коса было отобрано соответственно 13 и 22 ориентированных блока размером  $10 \times 10 \times 15$  см, представляющих все лёссовые горизонты и педокомплексы, вскрытые в изученных обнажениях. Из блоков были выпилены ориентированные образцы кубической формы размером  $2 \times 2 \times 2$  см, соответственно 160 и 128 штук для разрезов Беглица и Чумбур-коса.

Измерение анизотропии магнитной восприимчивости образцов (АМВ) выполнено на каппабридже MFK-1 FA (AGICO, Чехия) при напряженности поля 200 А/м на частоте 976 Гц. Для анализа распределения направлений главных осей эллипсоида магнитной восприимчивости использовались равноплощадные стереограммы (с проекцией осей анизотропии на нижнюю полусферу) и розы-диаграммы. Количество секторов ( $k$ ) в последних выбиралось исходя из числа наблюдений ( $n$ ) по методу, предложенному в работе [Mann и др., 1942]:  $k = \sqrt{n}$ .

По результатам измерений АМВ с использованием специализированной программы Anisoft5 [Chadima et al., 2020] были определены направления главных осей и соответствующие им собственные значения ( $K_1, K_2, K_3, K_1 > K_2 > K_3$ ) эллипсоида магнитной восприимчивости. По этим значениям рассчитан ряд параметров, характеризующих форму тензора (эллипсоида) магнитной восприимчивости и, таким образом, магнитную текстуру отложений [Bradak et al., 2019]:

степень вытянутости эллипсоида магнитной восприимчивости  $L = K_1/K_2$ ;

степень сплюснутости эллипсоида магнитной восприимчивости  $F = K_2/K_3$ ;

скорректированная степень анизотропии магнитной восприимчивости

$$P_j = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]},$$

где  $\eta_1 = \ln K_1$ ,  $\eta_2 = \ln K_2$ ,  $\eta_3 = \ln K_3$ ,  $\eta_m = \ln ((K_1 + K_2 + K_3)/3)$ , и параметр формы  $T = \frac{2(\eta_2 - \eta_1 - \eta_3)}{\eta_1 - \eta_3}$ .

По значениям параметра  $T$  выделяются сплюснутая (*prolate*) ( $1 > T > 0$ ), вытянутая (*oblate*)

( $-1 < T < 0$ ) и трехосная нейтральная форма ( $T = 0$ ) эллипсоида анизотропии. Для характеристики формы эллипсоида мы также использовали диаграммы  $P_j - T$  [Jelinek, 1981] и  $F - L$  [Flinn, 1962; Nus, 2003].

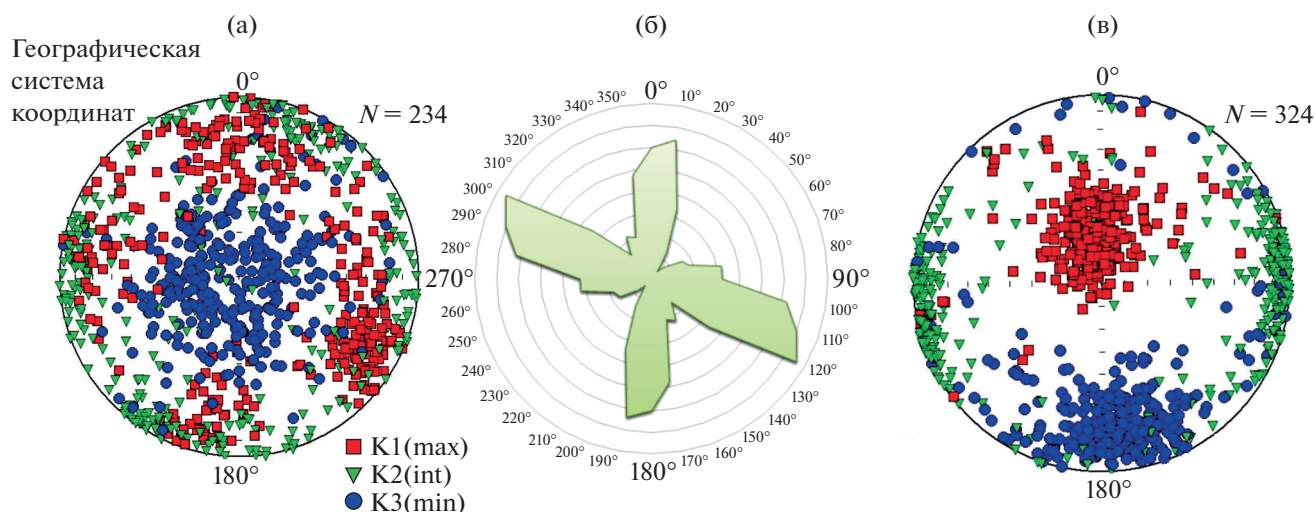
Для оценки значимости анизотропии магнитной восприимчивости образцов и точности определения направлений осей анизотропии применялись, соответственно, статистический параметр  $F12$  и угол доверия  $E12$  (отвечающий полуоси эллипса 95% доверия, лежащей в плоскости, содержащей максимальную и промежуточные оси анизотропии), рассчитанные согласно [Jelinek, 1977]. Анизотропными считались образцы со значениями  $F12 > 4$ ; в случае, если значения  $E12$  превосходили  $20^\circ$ , точность измерения направлений считалась недостаточной и соответствующие образцы не рассматривались [Zhu et al., 2004].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Результаты обработки коллекции образцов, отобранных с помощью пластиковых контейнеров

По результатам измерений коллекции, состоящей из 324 контейнеров (образцов) и представляющей верхние 40.8 м разреза Хонако-II, нами было получено распределение направлений осей эллипсоидов магнитной анизотропии, показанное на рис. 3а, 3б. На розе-диаграмме и на стереограмме ясно выделяются два преимущественных направления, к которым тяготеют длинные оси эллипсоидов: север-юг и северо-запад-запад – юго-восток-восток. При более детальном рассмотрении этого распределения (рис. 2в) оказывается, что каждое из выделенных преимущественных направлений соответствует определенным стратиграфическим интервалам, а именно: субмеридиональные направления выявляются на интервалах разреза 0–5, 14.5–20, ~30–33 м, а СЗЗ–ЮВВ направления – на интервалах 5–14.5, ~20–30; ~33–39 м.

Поскольку преимущественные направления осей эллипсоидов анизотропии часто интерпретируются как отражающие преобладающие направления палеоветров, например, [Lagroix, Banerjee, 2004], нами было высказано предположение, что обнаруженные особенности распределения главных осей также отражают направления палеоветров и их динамику в исследуемом регионе. Если так, то полученные данные могли бы означать, что на протяжении времени формирования разреза Хонако-II в регионе несколько раз происходила резкая смена преимущественных направлений ветров с меридиональных на запад-северо-западные – восток-юго-восточные и обратно.



**Рис. 3.** (а) – Сводная стереограмма разреза Хонако-II в географической системе координат; (б) – роза-диаграмма направлений максимальной оси для коллекции, отобранной с помощью пластиковых контейнеров разреза Хонако-II; (в) – стереограмма в системе координат образцов разреза Хонако-II, отобранных пластмассовыми контейнерами.

Из рис. 2б можно видеть, что в первом приближении меридиональные ветры соответствуют лёссовым интервалам разреза, т.е. холодным эпохам, а ЗСЗ-ВЮВ ветры – почвенным интервалам, т.е. теплым эпохам. В сочетании с явно наблюдаемой задержкой “переключения” преимущественных направлений ветров относительно границ лёссовых и почвенных интервалов (рис. 2б), эти наблюдения могли бы привести к далеко идущим климатическим интерпретациям. Однако при более детальном рассмотрении полученных данных, обнаруживается, что изменение направления преимущественных осей эллипсов анизотропии контролируется не стратиграфическим положением разреза и не литологией пород, а ориентацией стенок, из которых были отобраны образцы-контейнеры (рис. 2в).

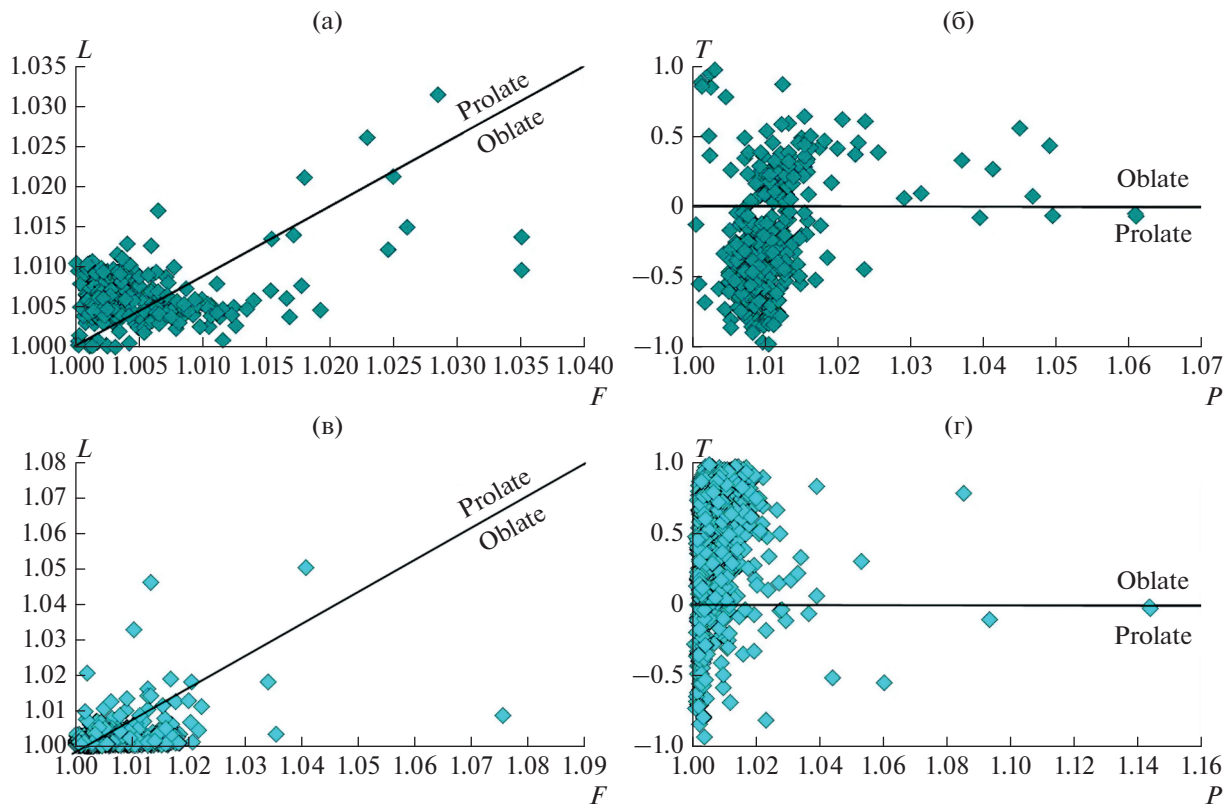
Практически во всех образцах стенки 1, которая ориентирована (“смотрит”) в направлении азимутов  $190^\circ$ – $200^\circ$ , длинные оси эллипсоидов анизотропии лежат в меридиональной плоскости. При этом плоскость сплющивания эллипсоидов обычно наклонена на юг (рис. 2в), как это видно из ориентаций малых осей эллипсоида (напомним, что на стереограмме показаны проекции осей анизотропии на нижнюю полусферу). Согласно работе [Nawrocki et al., 2006], эти данные могут рассматриваться как вполне определенное указание на то, что во время накопления рассматриваемого интервала разреза преобладали ветры, дующие в северном направлении.

В образцах из стенки 2 (108 образцов, ориентация  $110^\circ$ – $120^\circ$ ) происходит резкое изменение преимущественных направлений осей эллипсоида анизотропии. Для этих образцов характерна ВЮВ ориентация длинных осей и смещение минимальной оси в ЗСЗ направлении. Такое расположение осей эллипсоидов указывает на преобладание ветров, направленных на ЗСЗ.

В стенке 3 (21 образец, ориентация  $290^\circ$ – $300^\circ$ ) ориентация осей снова резко меняется: проекции длинных осей на нижнюю полусферу лежат в ЗСЗ части стереограммы, а соответствующие проекции минимальных осей преимущественно концентрируются в восточной ее части. Эти результаты указывают на преимущественно восточное направление ветров.

Переход к стенке 4 (66 образцов, ориентировка  $0^\circ$ – $20^\circ$ ) опять влечет за собой резкое изменение ориентации осей эллипсоида анизотропии. Проекция длинных осей теперь лежат в северной части стереограммы, а малые оси эллипсоида смещены к югу, что указывает на очередную резкую смену направления преобладающих ветров с восточного направления на южное.

Такие же резкие скачки “направлений ветров” происходят и далее при переходе от стенки к стенке безотносительно к изменению литологии пород. Таким образом, становится очевидным, что наблюдаемая в образцах-контейнерах магнитная текстура отражает не столько реальные свойства изучаемых пород, сколько направление, в котором происходило вбивание контейнера. На



**Рис. 4.** Диаграммы Флинна (слева) и  $Pj$ - $T$  (справа), характеризующие форму эллипсов анизотропии, определенных по результатам измерений образцов (а), (б) – отобранных с помощью пластиковых контейнеров; (в), (г) – с помощью ориентированных блоков.

рис. 3в показано распределение осей эллипсоидов анизотропии, определенных в системе координат образцов-контейнеров. Ось  $Z$  (расположенная перпендикулярно плоскости рисунка) здесь соответствует направлению вбивания (идущему от читателя), а ось  $X$  круто наклонена вниз (почти вертикальна). Видно, что в подавляющем большинстве случаев длинные оси здесь сконцентрированы в направлении вбивания  $Z$ , средние оси отклонены в сторону горизонтальной оси  $Y$  перпендикулярно направлению вбивания, а минимальные оси – в направлении  $X$ . Этот рисунок (рис. 3в) еще раз иллюстрирует, что направление измеренных осей анизотропии определяется направлением вбивания контейнеров.

Отметим, что форма значительного (большого) числа наблюдаемых эллипсоидов анизотропии ( $F < \approx L$ ), как об этом можно судить по рис. 4а, 4б, отличается от типичной формы, свойственной лёссово-почвенным отложениям ( $F \gg L$ ,  $T > 0$  [Bradak et al., 2019]). Это обстоятельство может рассматриваться как еще одно важное указание на аномальный характер эллипсоидов анизотропии, определенный нами в образцах-контейне-

рах. В работе [Lagroix, Banerjee, 2004a] отмечается, что такое соотношение параметров удлинения и сплюснутости может являться следствием сильной деформации пород.

Таким образом, результаты выполненных наблюдений определенно указывают на то, что отбор проб контейнерами может существенно деформировать первичную магнитную текстуру исследуемых осадочных отложений. Мы затрудняемся объяснить характер наблюдаемых изменений, но предполагаем, что это связано с механическим разрушением исходной структуры образца сухого осадка. Помимо этого отметим, что в других работах были обнаружены сходные тенденции в ориентации осей анизотропии в образцах после вдавливания/вбивания в них отборного устройства (напр., [Jordanova et al., 1996; Gravenor et al., 1984]). Значительные изменения магнитной текстуры осадков (но с другим характером распределения осей магнитной анизотропии) отмечались также и другими авторами [Corons et al., 1997].

Что бы ни было причиной наблюдаемому распределению осей магнитной анизотропии, ясно, что применение контейнеров для отбора образ-



цов в исследуемых лёссово-почвенных сериях может приводить к существенному, если не полному искажению первичной магнитной текстуры. Следовательно, при отборе образцов в исследуемых обнажениях необходимо использовать более консервативный, хотя и более трудоемкий второй способ отбора, требующий предварительного ручного отбора ориентированных блоков.

### Результаты обработки основной коллекции разреза Хонако-II

Поскольку, как было показано в предыдущем разделе, отбор образцов с помощью контейнеров существенно искажает их магнитную текстуру, рассматриваемый интервал разреза Хонако-II был заново опробован путем извлечения из него ориентированных блоков с последующей их распиловкой (см. описание второго метода в разделе “Объекты и методика исследований”).

Распределение осей эллипсов анизотропии, определенных для всех 878 полученных таким образом образцов, показано на рис. 5а. Очевидно, что оно разительно отличается от распределения, полученного по результатам измерения анизотропии образцов, отобранных с помощью контейнеров (рис. 3).

Результаты выполненных измерений показывают, что эллипсы анизотропии для подавляющего числа образцов имеют сплюснутую форму ( $F \gg L$ , рис. 4в, 4г), а значения  $P_j$  практически всегда  $\leq 1.04$ .

Также, используя исследование авторов работы [Liu et al., 1988] для классификации переотложенных и непереотложенных образцов, наши отложения не являются переотложенными: для подавляющего числа изученных нами образцов характерны значение параметра  $F$  меньше 1.32, положительный (низкий) коэффициент корреляции  $P-L$  и небольшие различия между численными величинами  $K_1$  и  $K_2$ . Таким образом, необходимые условия [Liu et al., 1988] для использования наших данных для определения направления палеоветров соблюдаются, и, после отсекаемого небольшого числа образцов с образцов с  $F < L$  и  $P_j > 1.04$ , мы можем переходить к следующему этапу фильтрации наших данных.

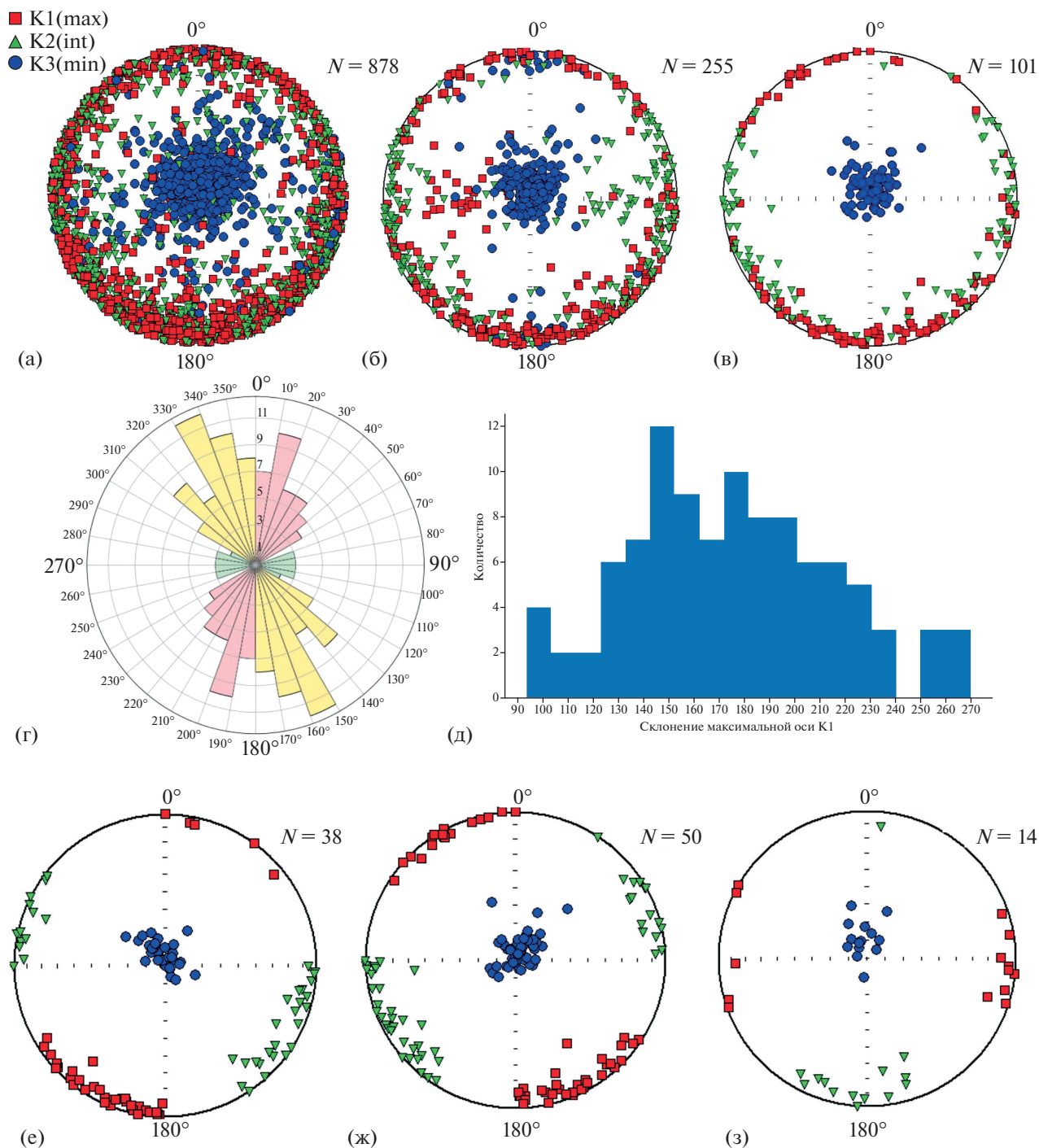
После фильтрации образцов по параметрам  $F_{12}$  и  $E_{12}$ , отсеявшей те из них, у которых либо анизотропия была статистически незначима, либо точность определения направления осей была слишком низкой (см. раздел “Объекты и методика исследований”), к дальнейшему рассмотрению осталось 255 образцов, представляющих 101 стратиграфический уровень. Распределение осей анизотропии для этих образцов показано на

рис. 5б. Отметим, что теперь распределение осей анизотропии стало значительно ближе к “нормальной” осадочной магнитной текстуре [Bradak et al., 2018], чем в случае образцов, отобранных с помощью контейнеров (рис. 3).

Средние направления осей анизотропии для каждого уровня, полученные путем осреднения данных по 2–3 образцам, представлены на рис. 5в. Как можно увидеть из этого рисунка, распределение направлений длинных осей анизотропии имеет неярко выраженный бимодальный характер: первая мода (кластер) отвечает юго-юго-западному – северо-северо-восточному направлению, вторая мода (кластер) – северо-северо-западному – юго-юго-восточному направлению. Существование двух мод иллюстрируют также рис. 5г, 5д, где то же самое распределение показано в виде линейной гистограммы и розы-диаграммы. Проведя границу по азимуту  $180^\circ$ , мы получаем возможность разделить соответствующие распределения и рассмотреть каждое в отдельности (рис. 5).

Важной особенностью этих кластеров является то, что соответствующие им малые оси анизотропии отклонены от вертикали в направлениях примерно перпендикулярных длинным осям анизотропии. Согласно исследованию магнитной текстуры лёссов Польши и западной Украины [Nawrocki et al., 2006] такое соотношение длинных и малых осей анизотропии может образовываться при сильных ветрах, когда длинные оси частиц, ответственных за магнитную анизотропию, выстраиваются перпендикулярно направлению воздушных потоков.

Мы применяем данный метод интерпретации вслед за авторами работы [Nawrocki et al., 2006] для лёссов Таджикистана, поскольку магнитная текстура лёссов определяется физическими условиями их формирования, а именно, взаимодействием гравитационных и термодинамических (ветровых) сил. Например, в экспериментальных работах [Tarling, Hroudá, 1993] отмечается, что при слабых течениях удлинённые зерна (и направления максимальной анизотропии) ориентируются вдоль направления ветра/течения, с наклонением минимальной оси навстречу ветру/течению. При сильных течениях длинные оси ориентируются перпендикулярно течению, при этом минимальные оси все также наклонены навстречу ветру. Поэтому эти свойства (как и следует ожидать) не зависят от региона следует, в частности из сравнения работ по лёссам Европы (Nawrocki et al., 2006) и Китая (Zhang et al., 2010).



**Рис. 5.** Распределение главных осей магнитной восприимчивости в системе координат образцов разреза Хонако-II (а) – без фильтрации; (б) – после фильтрации (см. текст) и (в) – после фильтрации и осреднения по уровням; (г) роза-диаграмма; (д) – гистограмма, иллюстрирующая распределение осей анизотропии; (е), (ж), (з) – распределения осей анизотропии, отвечающие кластерам 1, 2 и 3 соответственно.

Исходя из этого, принимая интерпретацию [Nawrocki et al., 2006], мы можем утверждать, что слои разреза, в которых длинные оси анизотропии попадают в первый кластер, формировались под влиянием сильных ветров, дующих в северо-

западном направлении. Слои же разреза, отвечающие второму кластеру, испытывали при своем образовании влияние сильных юго-западных (т.е., дующих в северо-восточном направлении) ветров.

После извлечения из общего распределения осей анизотропии тех из них, которые отвечают первому и второму кластерам (рис. 5е, 5ж), на стереограмме остаются оси (рис. 5з), которые можно объединить в отдельный, относительно слабо выраженный кластер с субширотными направлениями длинных осей анизотропии. Ниже мы будем называть его кластер 3. Подобно первым двум кластерам, малые оси анизотропии, соответствующие кластеру 3, смещены на стереограмме в перпендикулярном направлении относительно длинных осей анизотропии, что мы интерпретируем, как и для первых двух кластеров, существованием сильных ветров при формировании соответствующих интервалов разреза. Этому кластеру отвечают ветры северного направления.

Рассмотрим теперь стратиграфическое (хронологическое) распределение магнитных текстур, относящихся к разным кластерам (ветрам разных направлений). Первое, что бросается в глаза (рис. 6) – это отсутствие однозначной приуроченности ветров тех или иных направлений к теплым или холодным эпохам (лессовым или почвенным горизонтам). Например, во время накопления педокомплекса ПК1 также, как и во время накопления лессового горизонта Л1, дули ветры и северо-западного, и северо-восточного, и северного направлений. При этом соотношения длительностей периодов, отвечающих этим ветрам, для времени накопления педокомплекса ПК1 и лёсса Л1 существенно не отличаются.

С другой стороны, при образовании лёсса Л2, согласно нашей интерпретации, преобладали ветры северо-западного направления (кластер 2), ветры северо-восточного направления (кластер 1) были относительно менее частыми, а какие-либо указания на присутствие ветров северного направления (кластер 3) отсутствуют.

Во время накопления второго педокомплекса единственное указание на наличие таких ветров мы находим в лессовом прослое, при этом, в противоположность горизонту Л-1, в ПК2 мы видим преобладание северо-северо-восточных ветров, при подчиненном значении северо-северо-западных.

Таким образом, наблюдается явное отличие характера распределения ветров выделенных направлений на протяжении периодов, отвечавших формированию нижней (Л-2 и ПК-2) и верхней (Л-1 и ПК-1) частей разреза. В первом случае, в конце среднего плейстоцена, при переходе от теплого климата (МИС 7) к холодному (МИС 6) сменяется преобладающее направление ветров от северо-восточного к северо-западному. Это, по-

видимому, связано с изменением доминирующих центров атмосферы в регионе, когда в межледниковье МИС7 господствовали ветры с направлением вдоль вытянутых в ЮВ–СЗ направлении горных хребтов, в то время как в ледниковую эпоху МИС6 начинают доминировать ветры с покрытых мощными ледниками горных массивов Памира и Гиндукуша.

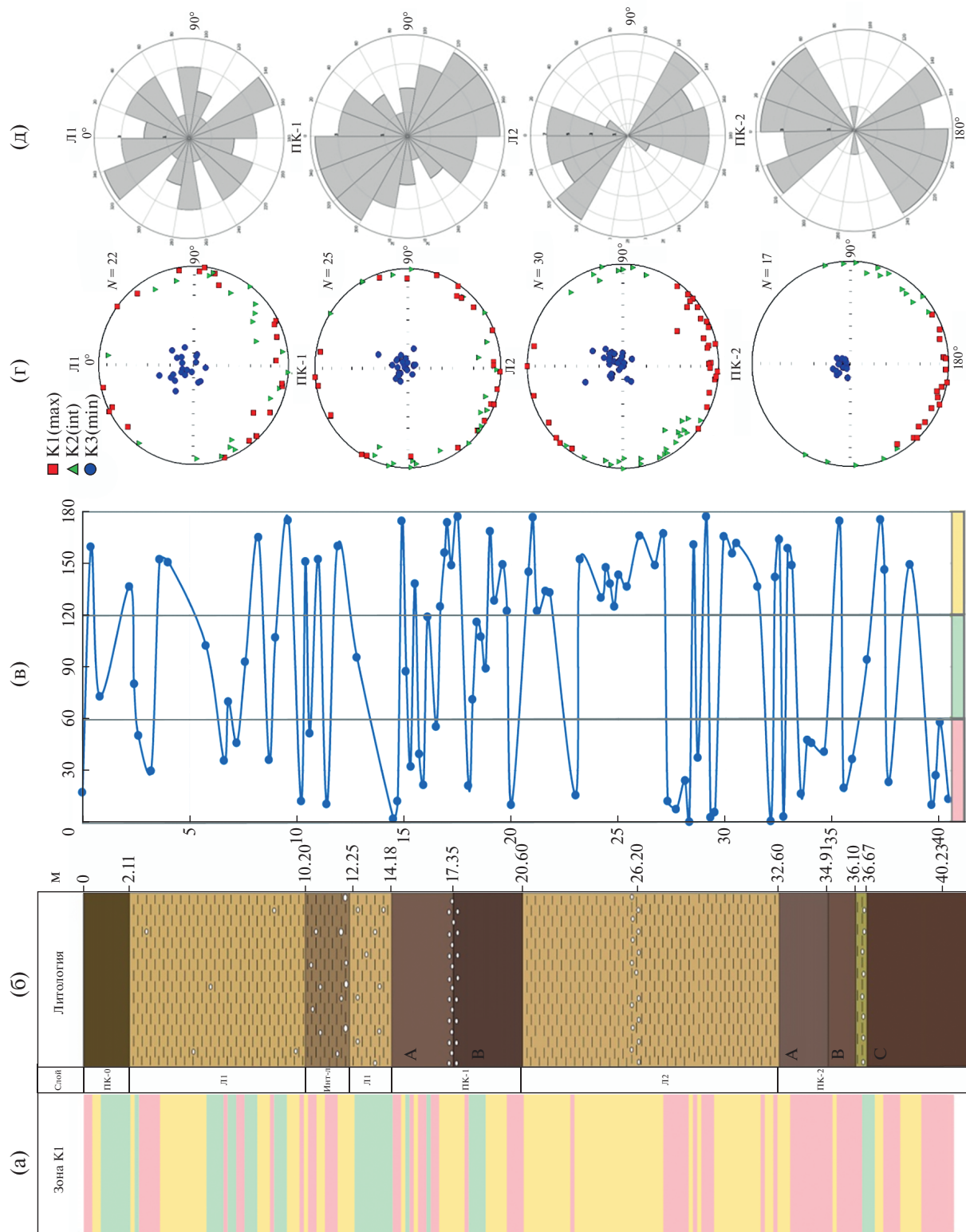
Опубликованные материалы по ледниковой истории региона указывают на то, что в МИС6 горные хребты Средней Азии имели максимальные площади оледенений [Abramovski et al., 2006]. Во втором случае явного преобладания северо-западных или северо-восточных направлений не наблюдается, однако заметную роль начинают играть ветры промежуточного северного направления. Предположительно, мы интерпретируем это наблюдение как указание на увеличение контрастности климата в позднем плейстоцене и существование климатической системы с резкими сменами доминирующих направлений ветра. При этом динамичная картина направлений палеоветров отличает как теплую эпоху МИС5 (ПК1), так и ледниковый этап МИС4-2 (Лёсс 1). Это может быть связано с уменьшением влияния оледенения Памира и Гиндукуша, так как в это время реконструируется максимальная для последних 2 млн лет аридизация климата и минимальные ледниковый покров в горах [Додонов, 2002].

Доли образцов, отсеянных при селекции по параметрам  $F_{12}$  и  $E_{12}$ , заметно различаются для верхней (Л-1, ПК-1) и нижней (Л-2, ПК-2) частей разреза и составляют 78 и 67% соответственно. Это можно было бы связать с увеличением степени “полной” (т.е. учитывающей значение всех трех собственных значений эллипсоида анизотропии) анизотропии  $P_j$  (рис. 6), обусловленной, по всей вероятности, (см., напр., [Zhu et al., 2004; Bradak et al., 2018]) уплотнением пород при захоронении за счет нагрузки вышележащего материала.

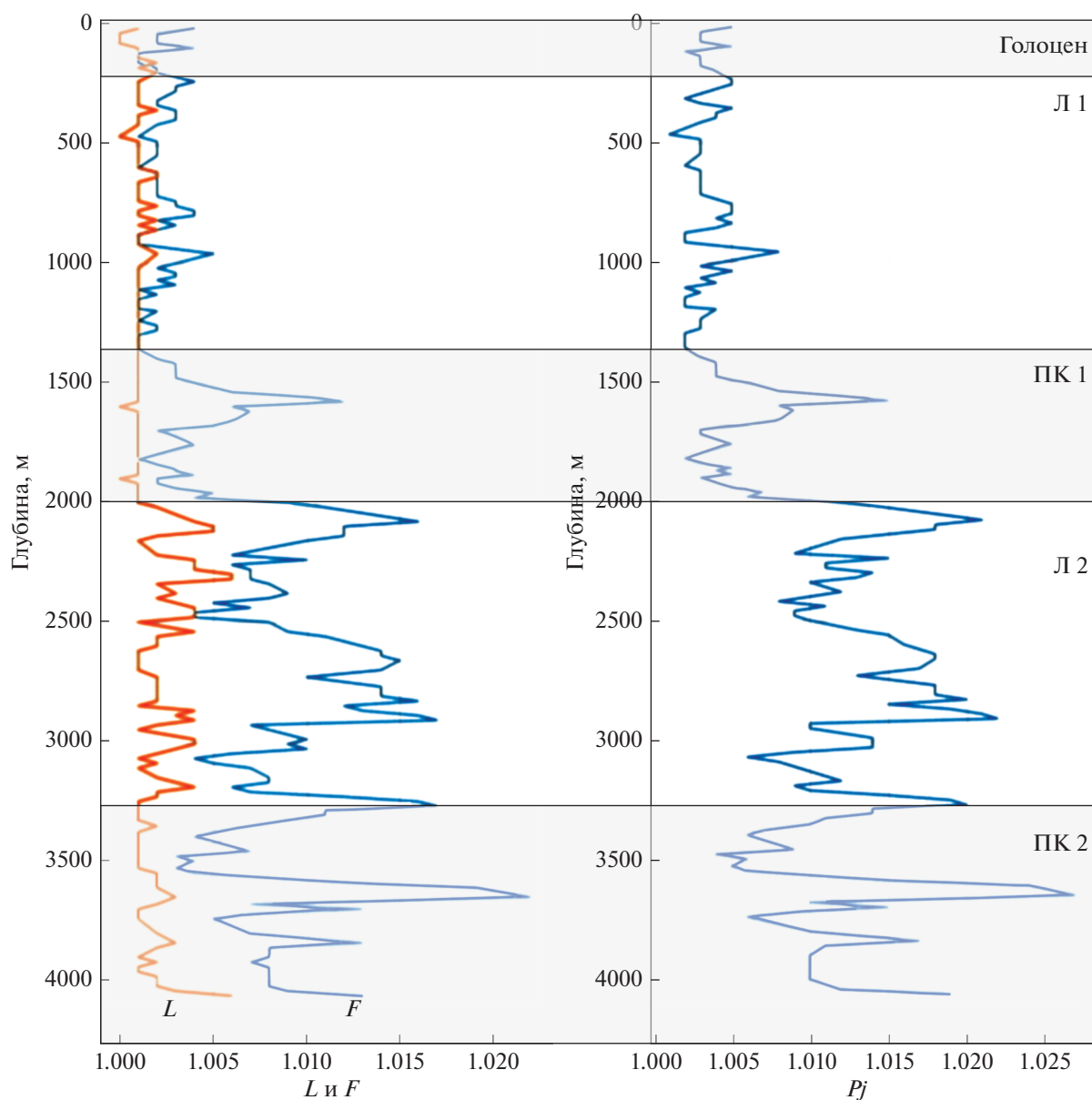
Однако изменение величины  $P_j$  с глубиной (рис. 7б) отражает в первую очередь относительное уменьшение минимального собственного значения эллипса анизотропии  $K_3$ . Это следует из рассмотрения рис. 7а, где видно, что уплощение  $F$  изменяется с глубиной значительно сильнее, чем удлинение  $L$ . Но параметры  $F_{12}$  и  $E_{12}$  не зависят от  $K_3$  [Jelinek, 1981], следовательно, уменьшение доли отфильтрованных образцов с глубиной не должно быть связано с увеличением степени “полной” анизотропии  $P_j$ .

Нам представляется, что увеличение доли анизотропных образцов в горизонтах ПК-2 и Л-2, ло-





**Рис. 6.** Распределение направлений длинных осей анизотропии вдоль разреза: (а) – условный цветовой индекс кластера (розовый – кластер 1, желтый – кластер 2, зеленый – кластер 3); (б) – литологическая колонка; (в) – склонения длинных осей (K1dec); (г) и (д) – стереограммы и розы-диаграммы, иллюстрирующие распределение направлений длинных осей анизотропии по литологическим горизонтам Л1, ПК1, Л2, ПК2.



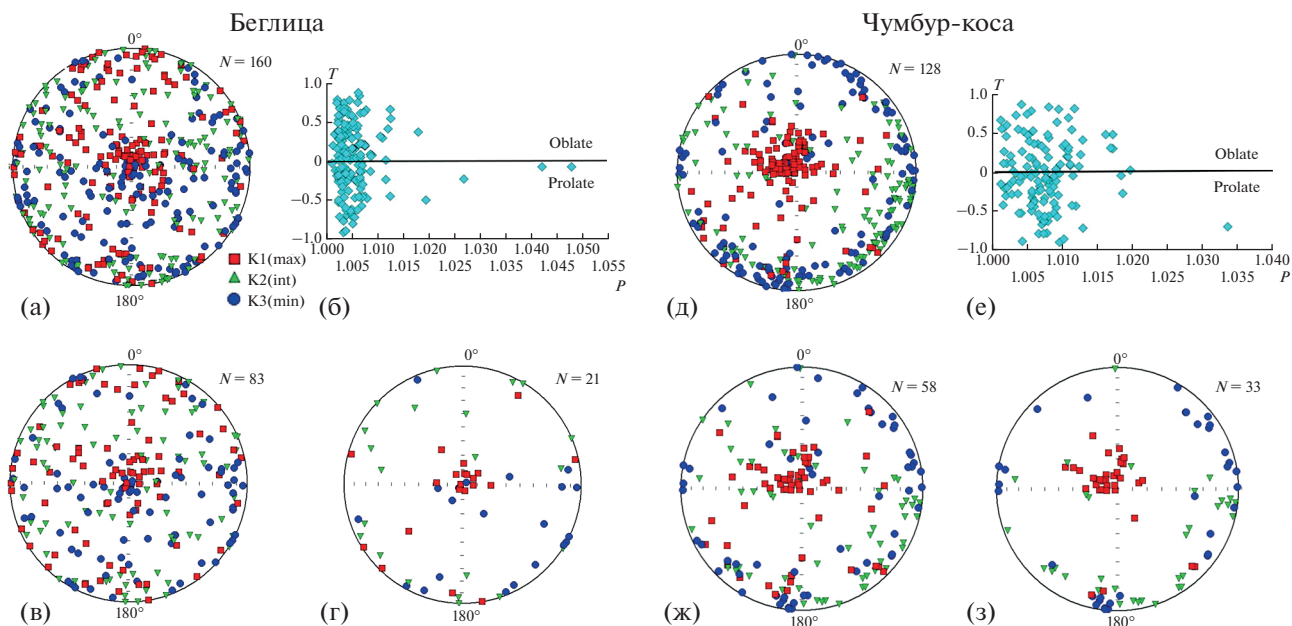
**Рис. 7.** Распределение параметров  $L$ ,  $F$ ,  $P$  анизотропии магнитной восприимчивости вдоль изученного интервала разреза Хонако-П.

гично объяснить большим преобладанием сильных ветров в конце среднего плейстоцена и большей стабильностью климатической системы в регионе, когда длительное время могли доминировать ветра одних направлений. Если так, то увеличение контрастности в направлениях ветров, отмеченное выше для позднего плейстоцена, вероятно, сопровождалось и уменьшением их силы.

#### Результаты исследования коллекций образцов из разрезов Приазовья

Оси анизотропии, определенные в образцах из разрезов Беглица и Чумбур-коса (рис. 8), распре-

делены квазихаотично, со значительным преобладанием в центре стереограммы проекций длинных осей, что не типично для осадочных пород, где, как правило (если текстура породы не нарушена), по вертикали ориентированы малые оси анизотропии [Bradak, 2019]. Для измеренных эллипсоидов в равной степени характерны как сплюснутая, так и удлиненная формы, что опять-таки не свойственно осадочным породам с неизменной магнитной текстурой [Lagroix, Vanerjee, 2002b] – в последних обычно существенно преобладают образцы со сплюснутой формой эллипсоидов анизотропии.



**Рис. 8.** (а) – Распределение главных осей эллипсоидов магнитной восприимчивости образцов из разреза Беглица; (б) – диаграмма  $T-Pj$ , характеризующая распределение форм эллипсов анизотропии; распределение главных осей анизотропии образцов, у которых (в)  $F < L$  и  $Pj > 1.04$ ; (г)  $F > L$ ,  $Pj > 1.04$ ,  $F12 > 4$  и  $E12 < 20^\circ$ ; (д)–(е) – аналогично для разреза Чумбур-коса.

Нами была принята попытка отфильтровать данные по описанной выше методике (сначала отбирались образцы с  $F > L$  и  $Pj > 1.04$ , затем отсеивались те из них, у которых  $F12 > 4$  и  $E12 < 20^\circ$ ). Однако и после фильтрации (рис. 8в, 8г, 8ж, 8з) распределение осей анизотропии заметно отличается от такового, характерного для первичной магнитной текстуры недеформированных осадочных пород. Таким образом, полученные данные указывают на то, что магнитная текстура лёссово-почвенных отложений опорных разрезов Беглица и Чумбур-коса, вероятно, деформирована и является вторичной, а отобранные образцы не пригодны для реконструкции палеоветров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований показано, что широко используемый при изучении лёссово-почвенных серий метод отбора образцов с помощью пластиковых контейнеров может приводить к существенному изменению первичной магнитной текстуры пород вплоть до полного ее замещения вторичной текстурой, созданной в процессе отбора проб. Опыт нашей работы указывает на то, что для изучения магнитной текстуры ЛПС предпочтительнее использовать альтернативный метод, состоящий в ручном отборе ориентированных блоков и последующей распиловке их на отдельные образцы.

При изучении верхних 40.8 м опорного разреза Хонако-П, опробованных с использованием ориентированных блоков, нами получены следующие результаты:

1. Распределение осей магнитной анизотропии в отобранных после фильтрации образцах характеризуется наличием двух преимущественных мод, отвечающих двум кластерам направлений длинных осей анизотропии. Первый кластер отвечает юго-юго-западному – северо-северо-восточному направлению, второй – северо-северо-западному – юго-юго-восточному направлению. Оставшиеся направления мы условно объединяем в кластер 3 – ему соответствуют субширотно-ориентированные длинные оси анизотропии.

2. Важной особенностью выделенных кластеров является то, что соответствующие им малые оси анизотропии отклонены от вертикали в направлениях перпендикулярных длинным осям анизотропии. Согласно работе [Nawrocki et al., 2006] такое соотношение длинных и малых осей анизотропии может образовываться при сильных ветрах, когда длинные оси частиц, ответственных за магнитную анизотропию, выстраиваются перпендикулярно направлению воздушных потоков. В этом случае кластерам 1, 2 и 3 отвечает соответственно, преобладание ветров ~северо-западного, ~северо-восточного и северного направлений.



3. Рассмотрение распределения магнитных текстур вдоль разреза указывает на возможную зависимость преобладающих направлений ветров от ледниковой динамики горных систем Памира и Гиндукуша для нижней части разреза (ПК2 и лёсс 2) и независимость — для верхней части (ПК1 и лёсс 1). Во время накопления педокомплекса 2 преобладали ветры ~северо-западного направления, во время накопления лёссового горизонта 2 преобладали ветры ~северо-восточного направления.

4. Отсутствие преобладания ветров, отвечающих первому или второму кластеру во время накопления верхней части разреза, а также заметный вклад в общее распределение промежуточных ветров кластера 3, указывает на меньшую контрастность климата в это время по сравнению с предшествующими эпохами. Относительно большая доля образцов со слабой анизотропией в верхней части разреза, вероятно, указывает на большую частоту временных интервалов с относительно слабыми ветрами.

5. Изучение опорных лёссово-почвенных разрезов Приазовья указывает на их непригодность для реконструкции направлений палеоветров по параметрам магнитной текстуры, что может быть связано с незначительными скоростями осадконакопления этих разрезов, широким развитием в них почвенных процессов и деятельностью почвенной фауны, приведшими к разрушению первичной магнитной текстуры.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-18-00649 (исследования в Таджикистане) и 22-17-00265 (работы в Приазовье).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Додонов А.Е.* Четвертичный период Средней Азии. Стратиграфия, корреляция, палеогеография М.: Геос. 2002. 247 с.
- Додонов А.Е., Ранов В.А.* Антропоген Средней Азии: стратиграфия, корреляция, палеолит // Четвертичная геология и геоморфология. 1984. С. 67–81.
- Лазаренко А.А., Пахомов М.М., Пеньков А.В.* О возможности климатостратиграфического расчленения лёссовой формации Средней Азии. Поздний кайнозой Северной Евразии. М.: Гин АН СССР. 1977. С. 70–32.
- Поспелова Г.А., Лаухин С.А., Ранов В.А., Власов В.К., Волгина В.А., Куликов О.А., Пилипенко О.В., Шаронова З.В.* Новые данные о хроностратиграфии верхней региональной погребенной почвы лёссового разреза Хонак-3, Таджикистан (археологические, палеомагнитные и магнитные свидетельства) // Археология, этнография и антропология Евразии. 2005. № 1(21). С. 21.
- Ранов В.А.* Лессово-почвенная формация в Южном Таджикистане и лессовый палеолит // Археологические работы в Таджикистане. 2000. № 2000. С. 21–49.
- Abramowski U., Bergau A., Seebach D., Zech R., Glaser B., Sosin P., Kubik P.W., Zech W.* Pleistocene glaciations of Central Asia: results from  $^{10}\text{Be}$  surface exposure ages of erratic boulders from the Pamir (Tajikistan), and the Alay-Turkestan range (Kyrgyzstan) // Quaternary Science Reviews. 2006. V. 25(9–10). P. 1080–1096.
- Braddák B., Újvári G., Seto Y., Hyodo M., Végh T.* A conceptual magnetic fabric development model for the Paks loess in Hungary // Aeolian Research. 2018. V. 30. P. 20–31.
- Braddák B., Kovács J., Magyari Á.* The origin and significance of some ‘irregular’ loess magnetic fabric found in the Paks succession (Hungary) // Geophysical J. International. 2019. V. 217. № 3. P. 1742–1754.
- Chadima M., Hroudá F., Jelínek V.* Anisoft5. AGICO: Brno, Czech Republic. 2020.
- Chen J., Stevens T., Yang T., Qiang M., Matishov G., Konstantinov E., Kurbanov R., Zeng B., Shi P.* Revisiting Late Pleistocene Loess–Paleosol Sequences in the Azov Sea Region of Russia: Chronostratigraphy and Paleoenvironmental Record // Frontiers in Earth Science. 2022. V. 9. № 808157.
- Copons R., Parés J.M., Dinarès-Turell J., Bordonau J.* Sampling induced AMS in soft sediments: A case study in Holocene (glaciolacustrine rhythmite) from Lake Barrancs (central Pyrenees, Spain) // Physics and Chemistry of the Earth. 1997. V. 22. № 1–2. P. 137–141.
- Flinn D.* On folding during three-dimensional progressive deformation // Quarterly Journal of the Geological Society. 1962. V. 118. № 1–4. P. 385–428.
- Gravenor C.P., Symons D.T.A., Coyle D.A.* Errors in the anisotropy of magnetic susceptibility and magnetic remanence of unconsolidated sediments produced by sampling methods // Geophysical Research Letters. 1984. V. 11. № 9. P. 836–839.
- Hus J.J.* The magnetic fabric of some loess/paleosol deposits // Phys. Chem. Earth. 2003. V. 28. P. 689–699. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00128-1)
- Jelínek V.* Characterization of the magnetic fabric of rocks // Tectonophysics. 1981. V. 79. № 3–4. P. T63–T67.
- Jelínek V.* The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility of rocks and its application // Czech Republic: Geofyzika. 1977. V. 29. P. 1–87.
- Jordanova N., Jordanova D., Karloukovski V.* Magnetic fabric of Bulgarian loess sediments derived by using various sampling techniques // Studia Geophysica et Geodaetica. 1996. V. 40. № 1. P. 36–49.
- Konstantinov, E.A., Velichko, A.A., Kurbanov, R.N., Zakharov, A.L.* Middle to Late Pleistocene topography evolution of the North-Eastern Azov region // Quaternary International, 2018. V. 465. P. 72–84.
- Lagroix F., Banerjee S. K.* Cryptic post-depositional reworking in aeolian sediments revealed by the anisotropy of magnetic susceptibility // Earth and Planetary Science Letters. 2004a. V. 224. № 3–4. P. 453–459.
- Lagroix, F., Banerjee, S.K.* The regional and temporal significance of primary aeolian magnetic fabrics preserved in Alaskan loess // Earth Planet Sci. Lett. 2004b. V. 225.

P. 379–395.

<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.07.003>

*Lisiecki L.E., Raymo M.E.* A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records // *Paleoceanography*. 2005. V. 20. № 1.

*Liu X., Xu T., Liu T.* The Chinese loess in Xifeng, II. A study of anisotropy of magnetic susceptibility of loess from Xifeng // *Geophysical J. International*. 1988. V. 92. № 2. P. 349–353.

*Mann H.B., Wald A.* On the choice of the number of class intervals in the application of the chi square test // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1942. V. 13. № 3. P. 306–317.

*Matasova G.G., Kazansky A.Y.* Magnetic properties and magnetic fabrics of Pleistocene loess/palaeosol deposits along west-central Siberian transect and their palaeoclimatic implications // *Geological Society, London, Special Publications*. 2004. V. 238. № 1. P. 145–173.

*Nawrocki J., Polechon'ska O., Boguckij A., Lanczont M.* Palaeowind directions recorded in the youngest loess in Poland and western Ukraine as derived from anisotropy of

magnetic susceptibility measurements // *Boreas*. 2006. V. 35. № 2. P. 266–271.

*Tarling D., Hrouda F.* Magnetic anisotropy of rocks. Springer Science & Business Media / Hrouda F. (ed.). 1993.

*Velichko A.A., Borisova O.K., Kononov Y.M., Konstantinov E.A., Kurbanov R.N., Morozova T.D., Panin P.G., Semenov V.V., Tesakov A.S., Timireva S.N., Titov V.V., Frolov P.D.* Reconstruction of Late Pleistocene events in the periglacial area in the southern part of the East European Plain // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475(2). P. 895–899.

*Zhang R., Kravchinsky V.A., Zhu R., Yue L.* Paleomonsoon route reconstruction along a W–E transect in the Chinese Loess Plateau using the anisotropy of magnetic susceptibility: Summer monsoon model // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 299. № 3–4. P. 436–446.

*Zhu R., Liu Q., Jackson M.J.* Paleoenvironmental significance of the magnetic fabrics in Chinese loess-paleosols since the last interglacial (<130 ka) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 221. № 1–4. P. 55–69.

## Reconstructions of Paleowind Directions in the Pleistocene: Evidence from the Anisotropy of Magnetic Susceptibility of the Loess–Paleosol Series of Tajikistan and the Azov Region

O. A. Meshcheryakova<sup>a, b, c, \*</sup>, R. N. Kurbanov<sup>c, d</sup>, and V. E. Pavlov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>c</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

<sup>d</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia*

\*e-mail: oliya@ifz.ru

**Abstract**—The magnetic fabric of the reference Khonako-II (south Tajikistan), Beglitsa, and Chumbur-Kosa (Azov region) loess-paleosol sections was studied to reconstruct the paleowind directions during the Middle and Upper Pleistocene. The paleosols and loesses of the Khonako-II section represent a promising object for study of paleowinds. Our data indicate a prevailing ~ northward or ~northeastward wind directions during accumulation of the upper 40.8 m of the section. Thereby, a change from warm (pedocomplex 2) to cold (loess 2) epochs during the accumulation of the lower half of the studied sequence (end of the Middle Pleistocene) was accompanied by “switching” the predominant winds (from northwestern to northeastern ones), whereas accumulation of the upper part of the sequence was mainly controlled by winds of intermediate directions. The latter can be considered as evidence for the lesser contrast of wind rose during later epochs that were responsible for the formation of the upper part of the sequence. The study revealed that the magnetic fabric of loess and paleosol horizons of the Azov region sequences was deformed and cannot be used for paleowind reconstruction. It was demonstrated that sampling using plastic container technique widely applied in studying loess–paleosol deposits could lead to the significant deformation of primary magnetic fabric.

**Keywords:** loess–paleosol series, Tajikistan, Azov region, anisotropy of magnetic susceptibility, magnetic fabric, paleowind direction