ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 12, с. 1425–1435

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.48

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ЮГЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ

© 2020 г. А. О. Алексеев[a], *, Г. В. Митенко[a], П. А. Шарый[a]

[a] *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, 2, Московская область, Пущино, 142290 Россия*

**e-mail: alekseev@issp.psn.ru*

Поступила в редакцию 21.04.2020 г.
После доработки 04.06.2020 г.
Принята к публикации 30.06.2020 г.

Информация об эволюционных изменениях почвенного покрова в прошлом важна как ретроспективная основа для долгосрочных прогнозов развития почв в условиях меняющегося климата, а также с точки зрения понимания современных проблем опустынивания и деградации земель на юге Восточно-Европейской равнины. Основная задача настоящего исследования состояла в количественной оценке сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны в данном регионе, обусловленного глобальными климатическими вариациями на протяжении позднего голоцена. Для проведения количественных реконструкций палеоосадков, палеотемпературы и аридности климата использованы свойства около ста палеопочв археологических памятников, широко представленных в регионе. Для получения региональных калибровок детально проанализированы зависимости магнитных свойств современных почв юга Восточно-Европейской равнины от климатических данных. Использованы образцы 35 профилей почв в пределах трансекты, отобранной по маршруту Пущино–Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста, протяженностью более 1500 км, включающей различные природно-климатические зоны. Градиенты средних годовых осадков ~500 мм/год и температур ~3°С позволили получить достоверную калибровку климатических параметров с современными почвенными свойствами. Выявлены ограничения для проведения климатических реконструкций по магнитным свойствам почв в интервалах среднегодовых осадков <600 мм/год. Картографическая реконструкция изменения индекса аридности (IDM) с использованием методов ГИС моделирования на основе палеопочвенных данных демонстрирует, что за последние 5000 лет на территории Волго-Донского междуречья происходили неоднократные изменения климатической ситуации, вызывавшие миграции границ почвенно-географических зон с амплитудой до 200–300 км.

Ключевые слова: глобальные изменения климата, палеопочвы, магнитная восприимчивость почв, индекс аридности, палеореконструкции

DOI: 10.31857/S0032180X20120023

ВВЕДЕНИЕ

В течение четвертичного времени на Восточно-Европейской равнине неоднократно происходили климатические изменения, при этом климат в некоторые периоды существенно отличался от доиндустриального голоцена [8]. Хотя прошлые интервалы потепления были вызваны иными причинами, чем прогнозируемые антропогенные изменения, такие этапы могут дать представление о возможных климатических воздействиях и реакциях степных экосистем и почвенного покрова. Следует учесть, что при изучении палеопочв четвертичного периода рассматриваются временные масштабы от тысячелетий до сотен тысяч лет, которые часто не охватываются при моделировании динамики климата. В связи с этим количественные реконструкции прошлых условий окружающей среды представляют фундаментальный интерес для палеопочвоведения и палеогеографии. Почвенный покров является важным индикатором и памятью происходивших климатических изменений. В настоящее время разработаны различные методические подходы и инструментальные средства, позволяющие измерить и расшифровать палеопочвенные записи. Последние годы развитие палеопочвоведения идет по пути перехода из области качественного анализа к количественному подходу, к палеореконструкциям в различные исторические и геологические эпохи [5, 27, 36–38].

На современном этапе палеопочвенных работ востребована информация о значимых трендах

развития почв. Особенно это важно для степной зоны юго-востока Восточно-Европейской равнины, где чередующиеся на протяжении голоцена климатические изменения вызывали эволюционные преобразования почвенного покрова. Настоящая проблема актуальна и с точки зрения понимания современных вопросов опустынивания и деградации земель этого региона [11]. Информация об эволюционных изменениях почвенного покрова в прошлом важна как ретроспективная основа для долгосрочных прогнозов развития почв в условиях меняющегося климата. Для степной зоны юга Восточно-Европейской равнины характерна меридиональная почвенно-географическая зональность: западную часть занимает сухая степь с черноземами и каштановыми почвами, а восточную – полупустыня со светло-каштановыми и бурыми полупустынными почвами. Это определяется приуроченностью к пограничной зоне двух крупных факторов динамики климата: сибирского антициклона и атлантического циклона, взаимодействие и взаимовлияние которых неоднократно приводило к динамичным изменения климатических условий в регионе [8, 19].

Начиная с 80-х годов XX в., проводятся исследования голоценовых палеопочв археологических памятников, погребенных под курганными насыпями разных временных интервалов, охватывающих средний и поздний голоцен на юго-востоке Восточно-Европейской равнины. Основы этих работ заложены сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пущино) И.В. Ивановым, В.А. Демкиным и др. [10, 12, 13, 16]. На сегодняшний день благодаря изучению разновозрастных археологических памятников достигнуты заметные успехи в решении генетико-эволюционных проблем степного почвообразования. Проводятся реконструкции условий природной среды различных этапов голоцена, территориально охватывающие регион степного пояса Восточно-Европейской равнины, включая Центрально-черноземные области [1, 18, 20, 28, 29], Северный Кавказ [2], Поволжье [14, 21].

Исследование магнитных свойств и магнитной минералогии почв широко используется в палеопочвенных работах для реконструкции количества атмосферных осадков в разные исторические и геологические эпохи. Формирование повышенной по сравнению с породой магнитной восприимчивости почв объясняется новообразованием магнитных минералов железа, которое рассматривается как специфический результат почвообразовательного процесса [4, 6, 31]. Наблюдаемое магнитное “усиление” связывают с зависящим от климата формированием и накоплением в почвах магнетита и маггемита. На сегодняшний день предложены модели накопления магнитных минералов в почвах при изменении климатических параметров [4, 33–35]. Однако знание о связях наблюдаемого увеличения содержания магнитных минералов с характеристиками климата до сих пор остается неполным и дискуссионным.

Ранее применение широкого набора современных инструментальных минералогических и магнитных методов совместно с микробиологическими исследованиями позволило приблизиться к пониманию процессов оксидогенеза железа и магнитной минералогии при степном почвообразовании [3, 4, 21, 32]. Цикл преобразования оксидов железа в степной зоне при изменяющихся климатических условиях представляется следующим образом. Периодическое увлажнение–иссушение при близкой к нейтральной реакции среды (pH 7–8) способствует формированию магнетита в присутствии органического вещества и имеющегося источника железа. Формирование почвенного магнетита требует изначального присутствия катионов Fe^{2+}, которые в сухих и окисленных степных почвах могут появляться в микрозонах. Здесь в периоды временного повышения влажности, благодаря железоредукторам, происходит восстановление железа с последующим медленным окислением. И наоборот, если уровень осадков возрастает до момента, когда происходит смена щелочной среды на нейтральную или слабокислую, магнетит может не формироваться или начинает растворяться. В погребенных почвах археологических памятников с помощью магнитных методов фиксируется состояние оксидов железа в почве, которое является равновесным для условий почвообразования на момент сооружения насыпи данного хроноинтервала. Содержание почвенного биогенного магнетита может быть использовано как “магнитная запись” о предшествующих условиях окружающей среды степей, что позволяет получать количественные характеристики климата [4, 5, 21, 33, 35]. Задача настоящего исследования состояла в количественной оценке сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны, обусловленного климатическими вариациями на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины. Для проведения количественных реконструкций палеоосадков, палеотемпературы и аридности климата использовали свойства около ста палеопочв археологических памятников, широко представленных в регионе. Для получения региональных калибровок детально проанализировали зависимости магнитных свойств современных почв от климатических данных для региона, охватывающего территории Воронежской, Волгоградской и Астраханской, Ростовской областей, Республики Калмыкия и Ставропольского края.

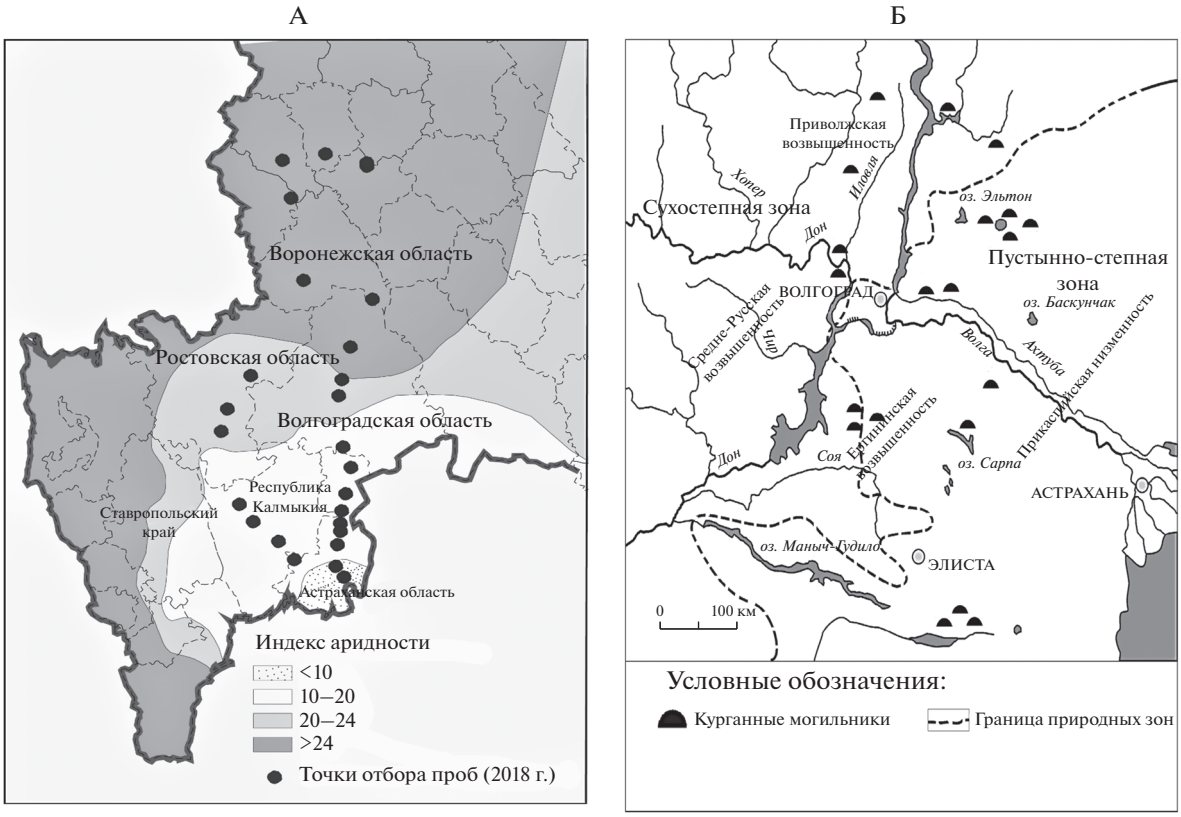

Рис. 1. Карта-схема района исследований почв степной зоны Восточно-Европейской равнины: А – климатическая трансекта 2018 г. Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста–Воронеж, Б – курганные группы с хронорядами палеопочв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Типичным подходом при изучении палеопочв и использовании петрофизических, минералогических и геохимических показателей почв для количественной реконструкции палеоклиматических условий древних эпох является определение эмпирических зависимостей свойств современных почв с климатическими параметрами. Для получения региональных калибровок зависимости магнитных свойств почв от климатических данных для территории степей Восточно-Европейской равнины использовали образцы из профилей почв, отобранные в ходе проведенных в 2018 г. маршрутных исследований в пределах трансекты отобранной по маршруту Пущино–Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста протяженностью более 1500 км, включающей различные природно-климатические зоны (рис. 1, А). Отбор почв по профилю до почвообразующей породы проводили почвенным буром. Отбирали средний образец из трех скважин на расстоянии не более 5 м друг от друга с шагом по глубине 10 см. Среднегодовое количество атмосферных осадков в пределах трансекты изменяется в интервале от 200 до 700 мм/год, среднегодовая температура от +8 до +11°С [19]. Такой градиент осадков и температуры позволил получить достоверную эмпирическую связь климатических параметров с современными почвенными свойствами.

Изучение магнитных свойств почв включало данные о магнитной восприимчивости (χ) почв и пород. Измерения проводили с использованием Kappameter KT-5 (полевые исследования) и Kappabridge KLY-2 (лабораторные исследования).

Климатические параметры анализировали с использованием данных “Климатических справочников СССР”, охватывающих исследуемую территорию [19], базы данных Отдела климатических исследований (факультет естественных наук Университета Восточной Англии) Climatic Research Unit (CRU) [25] http://www.cru.uea.ac.uk/ и базы данных WorldClim [26], доступной на сайте http://www.worldclim.org/. Непосредственно данные метеостанций не могут дать ответа на вопрос о том, сухой климат или влажный: для этого нужно сравнить годовое количество осадков P с годовой потенциальной эвапотранспирацией E_0 [39], называемой также испаряемостью [7]. Последняя описывает теоретическое суммарное испарение увлажненной поверхности и обычно не измеряется метеостанциями, но может быть рассчитана. Эмпирическая методика расчета E_0 описана в [39],

в ней для расчета используются среднемесячные температуры. Этот подход оценивают, как один из лучших при использовании только температур [30]. Связь E_0 с температурой месяцев нелинейна: E_0 быстро увеличивается с ростом температуры. Реальная эвапотранспирация E представляет собой испарение (суммарное), которое может быть измерено [7]. Отношение $KU = P/E_0$ называют коэффициентом увлажнения [7]. Считают, что в тундре и тайге $KU > 1$, в лесостепи 0.6–1, в степи 0.3–0.6, в полупустыне 0.12–0.3, в пустыне $KU < 0.12$ [17]. Помимо KU, используют также индекс аридности Де Мартона [22, 23] $IDM = P/(T + 10)$, где T – среднегодовая температура. В почвоведении отмечено, что среднегодовая температура T является усредненным результатом смены сезонов, но при разных температурах сезонов T может быть одинаковой [15]. Для юга европейской части России в качестве одного из климатических параметров использовали сумму активных температур больше 10°C.

При палеоклиматических реконструкциях опирались на данные магнитных свойств палеопочв (около 100 профилей) для более чем 20 курганных групп на территории Нижнего Поволжья и Прикаспийской низменности (рис. 1, Б). Обобщали результаты реконструкций условий почвообразования степной зоны, базирующиеся на исследовании магнитных свойств почв хронорядов, включающих современные фоновые и погребенные под курганными насыпями почвы эпох бронзы (конец IV–II тыс. до н. э.), раннего железа (V в. до н. э.–IV в. н. э.) и средневековья (XII–XIV вв. н. э.). Наиболее представительные педохроноряды охватывают почвы, погребенные ~5100, ~4900, ~4000, ~3600~1900, ~1750, ~700 л. н., и современную почву [4, 21].

Моделирование пространственного распределение индекса аридности IDM (по Де Мортону) для анализа сдвига границ сухостепной и пустынно-степной зоны на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины в разные периоды позднего голоцена, базирующееся на палеопочвенных палеоклиматических реконструкциях, проводили с помощью приложения пространственного анализа геоинформационной системы QGIS. Положение границ сухостепной и пустынно-степной зоны (IDM = 20) рассчитывали методом обратных взвешенных расстояний (IDW).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Цикл преобразования оксидов железа в степной зоне при изменяющихся климатических условиях позволяет предположить, что для каждого характерного значения атмосферных осадков в пределах 200–600 мм/год достигается равновесное содержание магнитного материала, в первую очередь магнетита. Длительные засушливые периоды с увеличением скорости окисления и уменьшением влажности способствуют формированию наиболее окисленных форм железа: гематита и гетита. При этом высокая скорость окисления, большое содержание органического вещества и низкие значения pH (4–6) способствуют формированию гетита. Высокая температура, уменьшение влажности и щелочные значения pH приводят к формированию гематита. Таким образом, наблюдаемое “магнитное усиление” в гумусовых горизонтах степных почв связывается с зависящей от климата аккумуляцией мелких частиц магнетита Fe_3O_4 и маггемита γ-Fe_2O_3 [4].

Следует заметить, что на сегодняшний день используют разные показатели минералогии оксидов железа в почвах, связанные с климатическими вариациями. Во-первых, это содержание магнетита, определяемое экспрессными измерениями магнитной восприимчивости почв. Этот параметр имеет ограничения использования при реконструкциях в пределах среднегодовых осадков до 1000 мм/год [31–34]. Кроме того, для климатических реконструкций предлагается использовать отношение содержания гетита к гематиту в почвах [24], позволяющее существенно расширить диапазон реконструируемых атмосферных осадков (100–3000 мм/год). Однако в последнем методе для проведения детального изучения магнитной минералогии применяются дорогостоящие криогенные магнетометры. Точное определение соотношения гетит/гематит в почвах другими минералогическими методами затруднено.

Для использования “магнетитового” параметра анализа сдвига границ сухостепной и пустынно-степной зоны на протяжении позднего голоцена детально изучали связи магнитной восприимчивости почв с климатическими характеристиками для юга Восточно-Европейской равнины.

Основным источником данных для расчета характеристик климата была глобальная база данных WorldClim [26]. В ней хранятся данные об осадках, минимальной, средней и максимальной температуре каждого месяца, усредненные за 50 лет (1950–2000 гг., что близко к климатическим нормам, т. е. средним за 1961–1990 гг.), представленные с высоким разрешением 900 м. Они получены интерполяцией данных метеостанций по широте, долготе и высоте. Кроме того, WorldClim содержит 19 “биоклиматических” переменных: среднегодовые данные о температуре и осадках, вариабельность температуры, коэффициент вариации количества осадков. Все описанные характеристики климата рассчитывали по данным WorldClim в проекции Ламберта с разрешением 1 км.

С целью получения региональных калибровок связи магнитных свойств почв с климатическими параметрами использовали образцы профилей

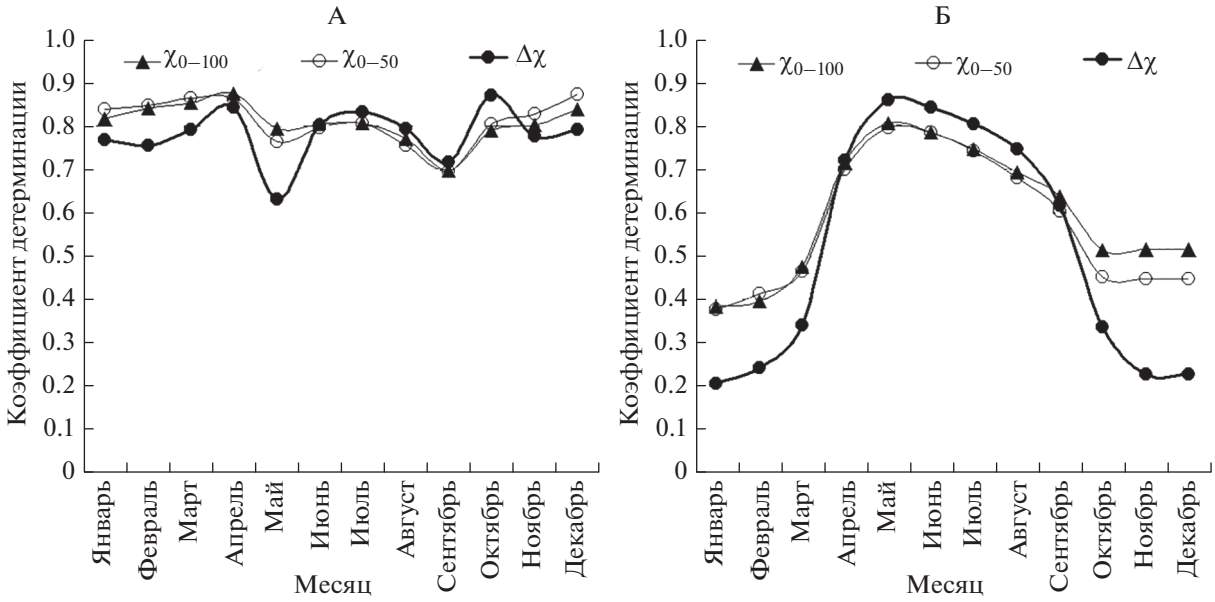

Рис. 2. Связь показателей $\Delta\chi_{0-100}$, $\Delta\chi_{0-50}$ и $\Delta\chi$ удельной магнитной восприимчивости почв с данными о среднемесячном количестве осадков (А) и температуре (Б). Все связи с количеством осадков положительны, с температурами – отрицательны.

почв, отобранных в ходе проведенных в 2018 г. маршрутных экспедиционных исследованиях в пределах трансекты, охватывающей полупустыню, степь и лесостепь (рис. 1, А). Сформирована выборка для 24 точек, в каждой из которых рассчитали три показателя, характеризующие прирост магнитной восприимчивости в почвенном профиле: $\Delta\chi_{0-100}$ – средний взвешенный прирост относительно материнской породой до глубины 1 м, $\Delta\chi_{0-50}$ – средний взвешенный прирост до глубины 0.5 м и прирост $\Delta\chi$ за счет почвообразования, определенный как разность значений χ верхнего слоя почв (0–20 см) и почвообразующей породы. Величины $\Delta\chi_{0-100}$ и $\Delta\chi_{0-50}$ определяются как средневзвешенная для почвенного профиля разность между χ генетических горизонтов или слоев почвы и χ породы:

$$\Delta\chi_{0-100} = \Sigma h_i (\chi_i - \chi_{\text{мп}}) / \Sigma h_i ,$$

где h_i – мощность горизонта i, $\chi_{\text{мп}}$ – магнитная восприимчивость материнской породы, χ_i – магнитная восприимчивость горизонта i.

Показатель средневзвешенного прироста обычно используется для сравнительного анализа близких по генезису и магнитной восприимчивости (χ) почв, он позволяет более полно отразить особенности χ почвенного профиля.

Для оценки связи $\Delta\chi_{0-100}$, $\Delta\chi_{0-50}$ и $\Delta\chi$ с осадками и температурой учтем, что эти связи существенно нелинейны (обычно немонотонны) и удовлетворительно описываются многочленом второй степени, коэффициент детерминации с которым (в полиномиальной регрессии) использовали для оценки тесноты связи. Знак связи оценивали по линейной парной связи. Связи $\Delta\chi_{0-100}$, $\Delta\chi_{0-50}$ и $\Delta\chi$ с осадками и температурами месяцев показаны на рис. 2. Полученные результаты свидетельствуют, что в теплый период (апрель–октябрь) связь $\Delta\chi_{0-100}$, $\Delta\chi_{0-50}$ и $\Delta\chi$ с температурой усиливается, а связь с осадками слабо зависит от времени года. В целом связи с количеством осадков более тесные, чем с температурой. Все три показателя прироста магнитной восприимчивости демонстрируют близкие распределения, поэтому в дальнейшем остановимся на описании результатов для $\Delta\chi$. Кроме того, этот параметр ранее использовали при проведении реконструкций климата по магнитным свойствам палеопочв археологических памятников региона [4, 21].

Считается, что магнитное “усиление”, описываемое приростом магнитной восприимчивости ($\Delta\chi$), связано, главным образом, со среднегодовыми осадками, что используется для оценки палеоклимата по магнитным свойствам палеопочв [4, 21, 31–33]. В то же время отмечается, что магнитное усиление не может быть связано только с осадками P, поскольку, например, при коэффициенте увлажнения $P/E_0 \geq 1$ магнитное усиление исчезает. В областях с низкой эвапотранспирацией эффект увеличения магнитной восприимчивости при росте количества осадков “обнуляется”, при этом следует учитывать, что потенциальная эвапотранспирация E_0 существенно зависит от температуры [35].

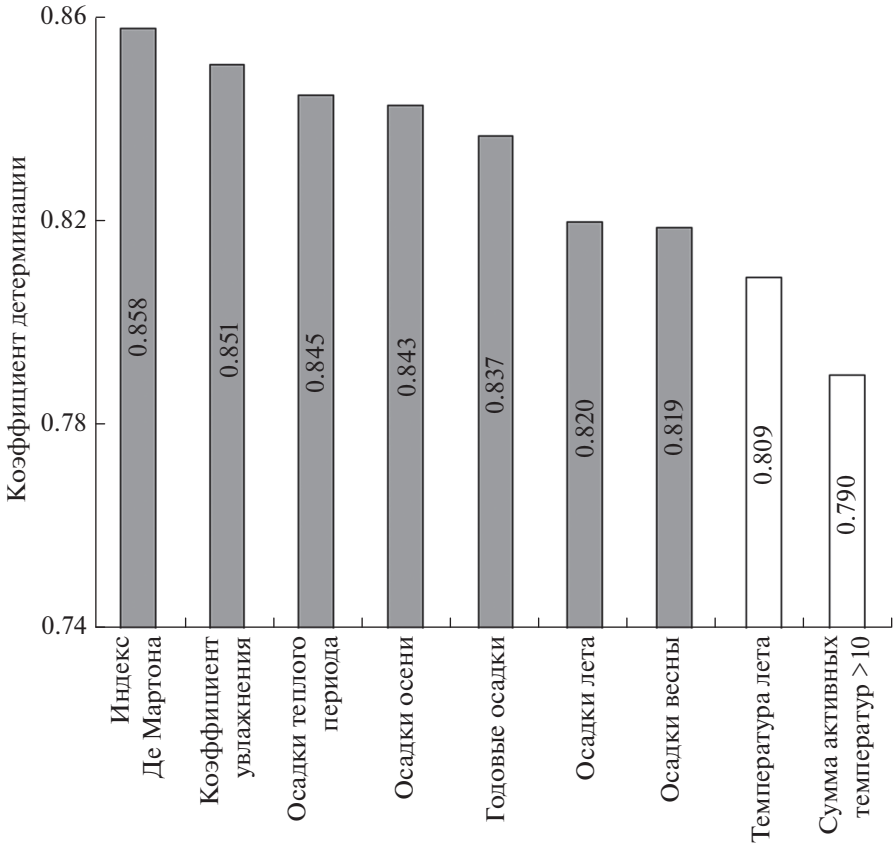

Рис. 3. Связи прироста магнитной восприимчивости ($\Delta\chi$) с характеристиками климата. Серые столбики означают положительную линейную связь, белые – отрицательную. Цифрами указан коэффициент детерминации R^2.

Коэффициенты детерминации R^2 парных связей прироста $\Delta\chi$ с климатическими факторами образуют спектр тесноты связей, который мы для наглядности упорядочили по убыванию R^2. Из-за нелинейности большинства связей оценивали связь $\Delta\chi$ с каждым климатическим фактором в полиномиальной квадратичной регрессии, как при построении кривых (рис. 2). Поскольку прирост магнитной восприимчивости ($\Delta\chi$) в целом убывает или возрастает с изменением климатических параметров, знак связи оценен с помощью простой линейной регрессии. Мы исключаем из рассмотрения связи $\Delta\chi$ с осадками и температурами отдельных месяцев, ограничиваясь осадками и температурой времен года, а также теплого (апрель–октябрь) и холодного периодов. Основные результаты для нелинейных связей прироста магнитной восприимчивости ($\Delta\chi$) с характеристиками климата показана на рис. 3.

Наиболее тесная парная связь прироста магнитной восприимчивости ($\Delta\chi$) наблюдается не со среднегодовым количеством осадков, которое находится на шестом месте в списке коэффициентов детерминации (рис. 3), а с индексом аридности Де Мартона (IDM) и коэффициентом увлажнения KU, концептуально близкими друг к другу. Полученные результаты согласуется с физической теорией Оргейра с соавт. [35], согласно которой величина KU, наряду с осадками и потенциальной эвапотранспирацией, играет важную роль в формировании магнитного “усиления” почв. Особенно резко меняются магнитные свойства почв в небольшом диапазоне значения KU = 0.5–1.0. В нашем случае это отвечает значению KU ~ 0.6 (разделяющему степь и лесостепь), выше которого прирост магнитной восприимчивости ($\Delta\chi$) уменьшается с ростом KU, как и с увеличением количества осадков >600 мм/год (рис. 4). В полупустыне, при KU < 0.2, происходит ослабление или даже исчезновение прироста магнитной восприимчивости, выражающееся в малости или даже отрицательности прироста $\Delta\chi$ (рис. 4, А). Этому отвечает малая сумма годовых осадков, меньше 250 мм/год (рис. 4, Б). При количестве среднегодовых осадков >600 мм/год или при коэффициенте увлажнения >0.6 (в лесостепи при KU от 0.6 до 0.9) магнитное усиление также имеет тренд уменьшения, но не исчезает. Как уже отмечалось, оно исчезает при KU ≥ 1 (MAP > > 1000 мм/год) [33–35].

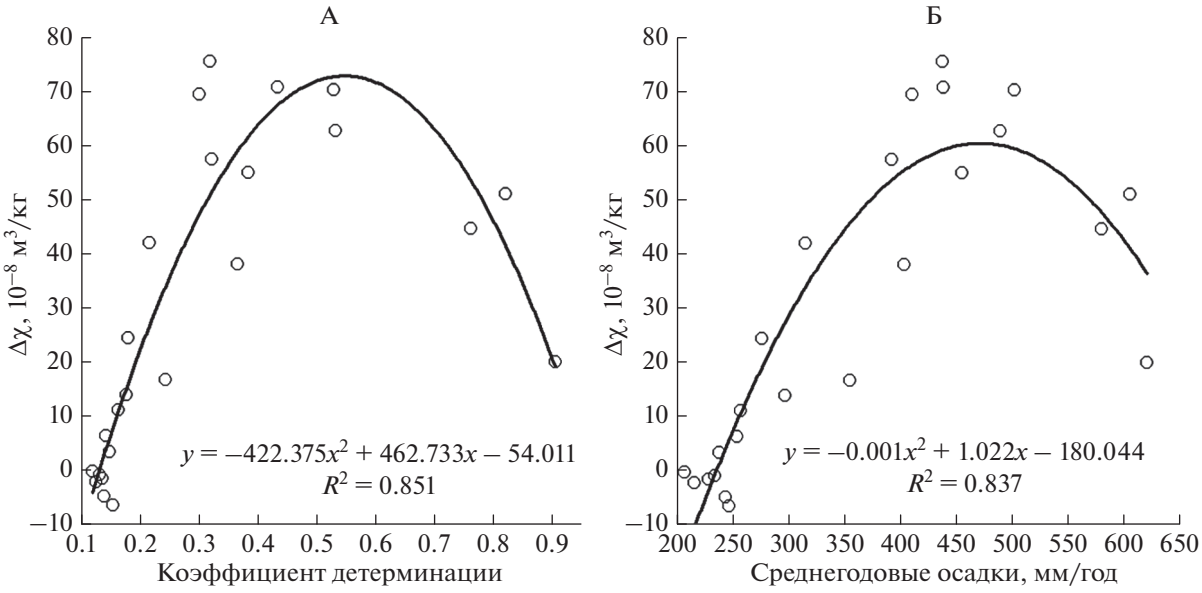

Рис. 4. Зависимость характеризующего магнитное усиление прироста магнитной восприимчивости (Δχ) от коэффициента увлажнения (А) и от среднегодового количества осадков (Б).

Отметим, что нелинейная связь Δχ с индексом аридности Де Мартона (IDM) оказывается более тесной, чем с коэффициентом увлажнения. Следует подчеркнуть, что гидротермический показатель IDM – наиболее подходящий с точки зрения возможных палеоклиматических реконструкций, позволяющих количественно проследить тренд аридизации климата. По индексу аридности засушливые регионы мира подразделяются на три зоны: аридную, семиаридную и сухую субгумидную. В аридной зоне индекс IDM изменяется в пределах 0–10, почвы бурые пустынные, зональная растительность солянково-полынная, годовое количество осадков 100–200 мм. В семиаридной зоне индекс аридности IDM изменяется в пределах 10–20, почвы светло-каштановые, зональная растительность злаково-полынная, среднее годовое количество осадков 200–400 мм. В сухой субгумидной зоне (сухие степи) IDM составляет 20–25, почвы каштановые и южные черноземы, зональная растительность бедно разнотравная ксерофильно-злаковая, количество осадков 400–600 мм [9, 23].

Полученные результаты указывают на то, что не только количество палеоосадков, но и температура могли бы быть оценены по данным о приросте магнитной восприимчивости (Δχ). Однако это касается не среднегодовой температуры, а суммы активных температур >10°C или температуры теплого периода, так как в холодный период связь Δχ с температурой становится существенно менее тесной (рис. 2).

Наблюдаемая связь прироста (Δχ) с коэффициентом увлажнения KU (IDM), а также со среднегодовым количеством осадков MAP не только нелинейная, но и немонотонная. Следовательно, данному значению (Δχ), например 50 × 10^{-8} м^3/кг, отвечают два значения коэффициента увлажнения KU (~0.32 – степь и ~0.8 – лесостепь) и осадков MAP (~370 и ~580 мм/год). Для детализации полученных зависимостей планируется дальнейшее исследование магнитных свойств почв лесостепи (KU 0.6–1). Учитывая выявленные на сегодняшний день ограничения, в дальнейших калибровках для полеореконструкции индекса аридизации IDM использовали выборку точек для степной зоны с каштановыми и бурыми пустынными почвами, соответственно, ограничиваясь интервалом среднегодовых атмосферных осадков (MAP) <600 мм/год. Отметим, что в случае больших MAP или KU (в северных участках изучаемой территории) палеореконструкция становится неоднозначной. При исключении этих участков зависимость монотонна, и решение для предсказанных значений однозначно. Кроме того, именно в зоне с каштановыми и бурыми пустынными почвами сосредоточены все исследуемые палеопочвенные объекты, используемые в палеореконструкциях. Для расширения выборки кроме образцов почв, отобранных в 2018 г., для исследования зависимости ("калибровки") индекса аридизации IDM с магнитными свойствами почв включили данные прироста магнитной восприимчивости для современных степных почв климатической трансекты 1999 г. от Заволжья до Северного Кавказа [3, 4, 22]. Статистическая обработка данных, включающих результаты магнитных свойств 35 почвенных профилей почв степной зоны, для

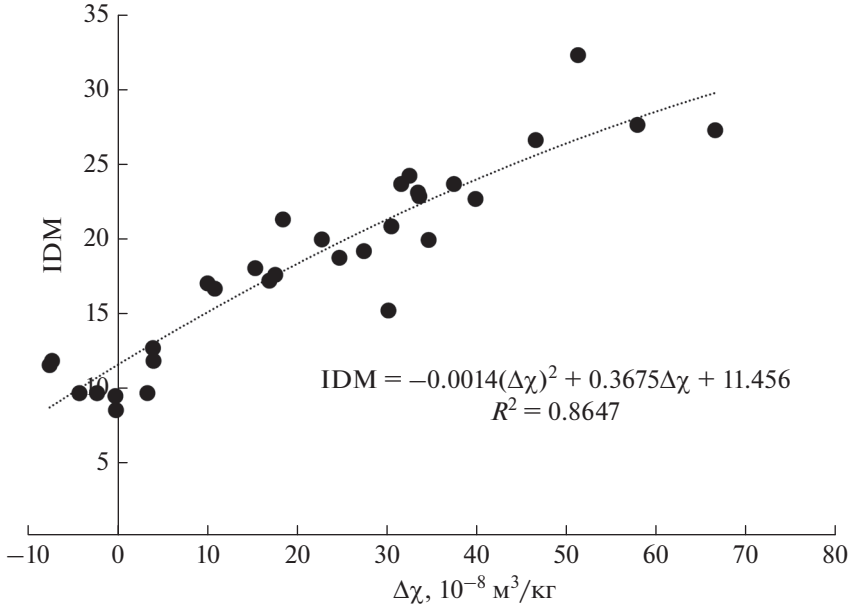

Рис. 5. Связь прироста магнитной восприимчивости в почвенном профиле современных почв степной зоны с индексом аридности Де Мартона (IDM).

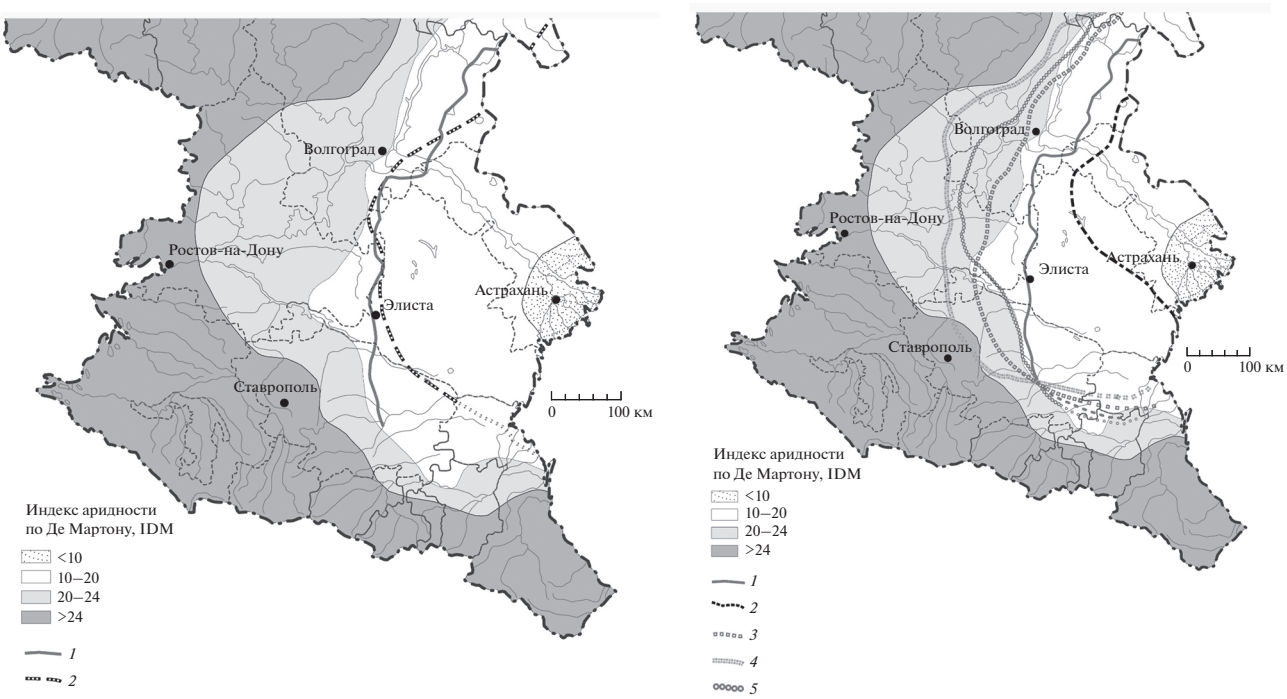

Рис. 6. Результаты ГИС моделирования сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны (IDM = 20) на юге Восточно-Европейской равнины в разные хроноинтервалы голоцена по палеопочвенным данным: А – сравнение границы индекса аридности по магнитным свойствам почв и метеоданным (*1* – настоящее время, по климатическим справочникам, 1966; *2* – настоящее время, по данным магнитной восприимчивости). Б – реконструкции положения границы IDM = 20 в разные интервалы позднего голоцена: *1* – настоящее время, по климатическим справочникам, 1966; *2* – 600–700 л. н.; *3* – 600–1800 л. н.; *4* – 3700–4000 л. н.; *5* – 5100–4000 л. н.

получения эмпирических климатических зависимостей продемонстрировала надежную связь прироста магнитной восприимчивости ($\Delta\chi$) в почвенном профиле с индексом аридности IDM (коэффициент корреляции $R^2 = 0.86$) (рис. 5). На основании установленной зависимости по данным магнитных измерений палеопочв возможно определение индекса аридности (IDM) в прошлые исторические и геологические эпохи. Полученный инструмент применяли ко всем накопленным на сегодняшний день данным о магнитных свойствах для более 100 погребенных почв археологических памятников региона (рис. 1, Б) и проводили реконструкцию гидротермического показателя индекс аридности (IDM) для количественной оценки сдвигов границ климатических зон на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины (рис. 6). Картографическая реконструкция изменения индекса аридности (IDM) и положения границ сухостепной и пустынно-степной зоны (IDM = 20) с использованием методов ГИС моделирования на основе палеопочвенных данных демонстрирует, что за последние 5000 лет на территории Волго-Донского междуречья происходили неоднократные изменения климатической ситуации, вызывавшие миграции границ почвенно-географических зон. Полученные результаты демонстрируют существенные сдвиги, выявлена динамика с амплитудой до 200–300 км. Резкое увеличение атмосферной увлажненности отмечается в “средневековый климатический оптимум” (хроноинтервал 600–700 л. н.), что привело к существенному сдвигу границы сухостепных ландшафтов в ареалы пустынно-степных. Раннежелезный век (хроноинтервал 1600–1800 л. н.) характеризовался климатическими условиями, близкими к современным. Максимум аридизации, охватывающий регион, приходился на рубеж III–II тыс. до н. э. (хроноинтервал 3700–4000 л. н.). Наблюдался засушливый климат со смещением природных рубежей к северу относительно современных условий, происходило развитие пустынно-степных ландшафтов на месте сухостепных. В конце III тыс. до н. э. (хроноинтервал 5100–4000 л. н.) аридизация ослабла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью климатических зависимостей изменений магнитной восприимчивости в профиле современных почв степей юга Восточно-Европейской равнины в пределах трансекты, отобранной по маршруту Пущино–Воронеж–Волгоград–Астрахань–Элиста, продемонстрирована возможность определения количественных показателей состояния климатических условий: количества атмосферных осадков, индекса аридности (IDM), коэффициента увлажненности (KU) в прошлые эпохи. В погребенных почвах археологических памятников с помощью магнитных методов определяли состояние магнитного материала в почве на момент погребения, которое является равновесным с условиями почвообразования для данного хроноинтервала. Содержание почвенного магнетита используется как “магнитная запись” о предшествующих условиях окружающей среды степей и позволяет получать количественные реконструкции климата, а также количественно оценить сдвиг природных границы на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины обусловленного климатическими вариациями. Следует учесть выявленные ограничения для проведения климатических реконструкций и возможность использования предлагаемого инструмента только в определенных интервалах среднегодовых атмосферных осадков (MAP), не превышающих 600 мм/год.

Картографическая реконструкция изменения индекса аридности (IDM) с использованием методов ГИС моделирования на основе палеопочвенных данных для более чем 100 погребенных почв археологических памятников региона демонстрирует, что за последние 5000 лет на территории Волго-Донского междуречья происходили неоднократные изменения климатической ситуации, вызывавшие миграции границ почвенно-географических зон с амплитудой до 200–300 км. На основании полученных данных возможно детализировать палеоэкологическую периодизацию позднего голоцена для степной и лесостепной зон Восточной Европы. Результаты исследования палеопочв голоцена и палеоклиматические параметры могут быть использованы для создания сценариев будущих изменений семиаридных степных экосистем юга России, связанных с глобальными изменениями климата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ гранты 19-29-05178 и 18-04-00800 (экспедиционные исследования).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александровский А.Л.* Эволюция почв Восточно-Европейской равнины в голоцене. М.: Наука, 1983. 150 с.
2. *Александровский А.Л., Александровская Е.И.* Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.
3. *Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Махер Б.А.* Магнитные свойства и минералогия соединений железа степных почв // Почвоведение. 2003. № 1. С. 62–74.

4. *Алексеев А.О., Алексеева Т.В.* Оксидогенез железа в почвах степной зоны. М.: ГЕОС, 2012. 204 с.
5. *Алексеев А.О., Калинин П.И., Алексеева Т.В.* Почвенные индикаторы параметров палеоэкологических условий на юге восточно-европейской равнины в четвертичное время // Почвоведение. 2019. № 4. С. 389–399. https://doi.org/10.1134/S0032180X19040026
6. *Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В.* Магнетизм почв. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 1995. 219 с.
7. *Будыко М.И.* Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1956. 256 с.
8. *Величко А.А.* Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет. М.: ГЕОС, 1999. 260 с.
9. *Виноградов Б.В.* Опустынивание – проблема степной зоны России. Степной бюллетень // Степной бюллетень. 1999. № 3–4. С. 55–58.
10. *Геннадиев А.Н., Иванов И.В.* Эволюция почв и палеопочвоведение: проблемы, концепции, методы изучения // Почвоведение. 1989. № 10. С. 34–43.
11. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: Изд-во МБА, 2019. Т. 2. 476 с.
12. *Демкин В.А., Рысков Я.Г., Алексеев А.О., Олейник С.А., Губин С.В.* Палеопедологическое изучение памятников степной зоны // Известия АН. Сер. географическая. 1989. № 6. С. 40–51.
13. *Демкин В.А.* Почвоведение и археология. Пущино, 1997. 213 с.
14. *Демкин В.А., Ельцов М.В., Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Демкина Т.С., Борисов А.В.* Развитие почв Нижнего Поволжья за историческое время // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1486–1497.
15. *Димо В.Н.* Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
16. *Иванов И.В.* Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 143 с.
17. *Исаченко А.Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
18. *Сычева С.А., Чичагова О.А.* Ритмичность почвообразования на среднерусской возвышенности в голоцене // Почвоведение. 1999. № 8. С. 970–979.
19. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. Вып. 13. 356 с.
20. *Чендев Ю.Г., Иванов И.В., Песочина Л.С.* Тренды естественной эволюции почв черноземов Восточно-европейской равнины // Почвоведение. 2010. № 7. С. 779–787.
21. *Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin. V.* Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe based on mineralogical and magnetic properties of buried palaesols // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. V. 249. P. 103–127.
22. *De Martonne E.* Aréisme et indice d'aridità // Compt. Rend. Acad. Sci. 1926. V. 182. P. 1395–1398.
23. Encyclopedia of Earth Sciences // Encyclopedia of Climatology. V. XI / Eds J.E. Oliver, R.W. Fairbridge. N.Y.: van Nostrand Reinold, 1987. 103 p.
24. *Hyland E., Sheldon N.D., Van der Voo R., Badgley C., Abrajevitch A.* A new paleoprecipitation proxy based on soil magnetic properties: implications for expanding paleoclimate reconstructions // Geol. Soc. Am. Bull. 2015. V. 127. P. 975-981. https://doi.org/10.1130/B31207.1
25. *Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.*, Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Int. J. Climatol. 2014. V. 34. P. 623–642.
26. *Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatol. 2005. V. 25. № 15. P. 1965–1978.
27. *Gallagher T.M., Sheldon N.D.* A new paleothermometer for forest paleosols and its implications for Cenozoic climate // Geology. 2013. V. 41. P. 647–650.
28. *Lisetskii F.N., Goleusov P.V., Chepelev O.A.* The development of Chernozems in the Dniester-Prut interfluve in the Holocene // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. № 5. P. 491–504.
29. *Lisetskii F.N., Stolba V.F., Pichura V.I.* Late-Holocene paleoenvironments of thouthern Crimea: soil, Soil-climate relationship and human impact // The Holocene. 2017. V. 27. № 12. P. 1859–1875.
30. *Lutz J.A., van Wagtendonk J.W., Franklin J.F.* Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park // J. Biogeography. 2010. V. 37. P. 936–950.
31. *Maher B.A., Alekseev A.O., Alekseeva T.V.* Climate dependence of soil magnetism across the Russian steppe: significance for use of soil magnetism as a palaeoclimatic proxy // Quater. Sci. Rev.2002. V. 21. P. 1571–1576.
32. *Maher B.A., Alekseev A., Alekseeva T.* Magnetic mineralogy of soils across the Russian steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2003. V. 201. № 3–4. P. 321–341.
33. *Maher B., Possolo A.* Statistical models for use of palaeosol magnetic properties as proxies of palaeorainfall // Global and Planetary Change. 2013. V. 12. P. 280–287
34. *Maxbauer D.P., Feinberg J.M., Fox D.L.* Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: a review of magnetic methods and challenges // Earth Science Rev. 2016. V. 155. P. 28–48.
35. *Orgeira M.J., Egli R., Compagnucci R.H.* A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils // The Earth's Magnetic Interior. IAGA Special Sopron Book Series. Springer, 2011. V. 1. P. 361–397.
36. *Retallack G.J.* Soils of the Past: An introduction to paleopedology. Malden, USA, Blackwell Science. 2001. 404 p.
37. *Sheldon N.D., Tabor N.J.* Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols // Earth-Sci. Rev. 2009. V. 95. P. 1–52.
38. *Tabor N.J., Myers T.S.* Paleosols as indicators of paleoenvironment and paleoclimate // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2015. V. 43. P. 333–361.
39. *Thornthwaite C.W.* An approach toward a rational classification of climate // Geograph. Rev. 1948. V. 38. P. 55–94.

Quantitative Estimates of Paleoenvironmental Changes in the Late Holocene in the South of the East European Plain as Recorded in the Magnetic Properties of Soils

A. O. Alekseev[1], *, G. V. Mitenko[1], and P. A. Shary[1]

[1]*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

**e-mail: alekseev@issp.psn.ru*

Abstract—One of the tasks of the present study was to quantify the shift of the boundary between the steppe and desert-steppe zones during the late Holocene in the south of the East European Plain under the impact of global climate variations. Information about the evolution of soil cover in the past is essential as a retrospective basis for long-term forecasts of soil development in a changing climate, as well as for understanding the current problems of desertification and land degradation in this region. The properties of about 100 paleosols of archaeological sites widely represented in the region were used for quantitative reconstruction of paleoprecipitation, paleotemperature, and aridity of the climate. To obtain regional calibrations, the dependences of the magnetic properties of modern soils on climatic parameters in the south of the East European Plain were analyzed in detail. Samples of 35 soil profiles along the 1500-km-long Voronezh–Volgograd–Astrakhan–Elista–Voronezh transect were used. This transect crosses several natural climatic zones with variations in the annual precipitation of about 500 mm/year and in the annual temperatures of about 3°C, which allowed us to obtain reliable relationships between the climatic parameters and the properties of modern soils. Limitations for paleoclimate reconstructions based on the magnetic properties of soils in the range of mean annual precipitation <600 mm/year were identified. Cartographic reconstruction of changes in the De Martonne aridity index (IDM) using GIS modeling methods and paleosol data indicates that the Volga–Don interfluve has undergone repeated changes in the climatic situation over the past 5000 years resulting in the shifts of the boundaries between soil-geographical zones to distances of up to 200–300 km.

Keywords: climate change, aridity index, paleosols, magnetic susceptibility, paleoreconstruction