

ГЕНЕЗИС
И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.48

ПОЧВЕННЫЕ ИНДИКАТОРЫ ПАРАМЕТРОВ
ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
НА ЮГЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ
В ЧЕТВЕРТИЧНОЕ ВРЕМЯ

© 2019 г. А. О. Алексеев¹, *, П. И. Калинин¹, Т. В. Алексеева¹

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
Россия, 142290, Московская область, Пушкино, ул. Институтская, 2

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

Поступила в редакцию 26.04.2018 г.

После доработки 26.05.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

Климатические условия являются важным фактором, влияющим на минералогический и химический составы почв и палеопочв, что приводит к формированию палеопочвенных архивов, отражающих значимые этапы эволюции биосферных систем в четвертичное время. В степной зоне юга Восточно-Европейской равнины сосредоточены два типа “временных капсул” четвертичного времени, хранящих информацию о палеоэкосистемах и палеоклиматах. Во-первых, это лёссово-почвенные комплексы (Приазовье и Северный Кавказ), фиксирующие последовательность развития педосферы в интервале плейстоцена до ~800 тыс. л. н. Во-вторых, это голоценовые палеопочвы археологических памятников, погребенные под курганными насыпями на различных временных интервалах, охватывающих средний и поздний голоцен. Полнота и достоверность палеогеографических реконструкций определяются выбранными объектами исследования. Для проведения количественных реконструкций параметров состояния окружающей среды использованы независимые методы, отражающие состояние твердой фазы почв (магнитный, минералогический, геохимический метод, изотопная геохимия). Детальные минералогические исследования палеопочв, а также анализ органо-минеральных комплексов, дополненные изучением вариаций биофильных и литофильных элементов, существенно увеличивают достоверность почвенных индикаторов для получения информации о палеоклиматических условиях. Полученные комплексные почвенные параметры палеоэкологических условий для хронологических почв голоцена и по ключевым разрезам лёссово-почвенной серии Приазовья позволили оценить параметры состояния окружающей среды (палеотемпературу, палеоосадки, аридность климата).

Ключевые слова: глобальные изменения климата, эволюция почв, палеопедосфера, биогеохимия, геохимия, почвенная минералогия, магнитные характеристики

DOI: 10.1134/S0032180X19040026

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия характеризуются пристальным вниманием к глобальным изменениям, происходящим на Земле, и связанным с ними прогнозам последствий для человечества и биосферы в целом. Климатические изменения существенно воздействуют на среду обитания растительных сообществ и, как следствие, затрагиваются почвообразовательные процессы, процессы выветривания, биологический круговорот элементов, эмиссию и сток парниковых газов. В этой связи приоритетными и актуальными является продолжение целенаправленных исследований роли климатического фактора почвообразования. Почвы и почвенный покров являются регулятором климата его индикатором и памятью происшедших изменений.

Удивительная и отличительная особенность биосферы — сохранение детальных палеопочвенных архивов (тысячи и миллионы лет) прошлых изменений климата, окружающей среды и жизни на Земле. Палеопочвы являются надежным носителем информации о палеоклимате и палеоэкологии в целом. Человеческий интеллект и инструментальные средства и подходы к настоящему времени позволяют обнаружить, измерить и расшифровать эти природные записи. Поэтому в последние годы ведутся детальные разработки методических и теоретических основ изучения палеопочв и эволюции природной среды в различные исторические и геологические эпохи, развитие палеопочвоведения идет по пути перехода из области качественного

анализа к количественному подходу, к палеоре-конструкциям. Климатические изменения являются основным фактором, влияющим на минералогический и химический составы палеопочв, что делает их незаменимым архивом значимых этапов эволюции биосферных систем в четвертичное время. В степной зоне юга Восточно-Европейской равнины сосредоточены два типа “временных капсул” четвертичного времени, хранящих информацию о палеоэкосистемах и палеоклиматах. Во-первых, это лёссово-почвенные комплексы (Приазовье и Северный Кавказ), фиксирующие последовательность развития педосферы в интервале плейстоцена до ~800 тыс. л. н. Различия в тепло- и влагообеспеченности определяли особенности процессов почвообразования, соотношение интенсивности процессов почвообразования и седиментации. Наиболее полно последовательность типов эпох почвообразования запечатлена в строении лёссово-почвенно-криогенных формаций, где обнаружены и изучены особенности почвообразования и седиментации не менее, чем семи природно-климатических макроциклов (палеомагнитная эпоха Брюнес). Внутри макроциклов выделены три главных типа эпох почвообразования: межледниковый, интерстадиальный и пленигляциальный (фазиальный) [2–4]. И это голоценовые палеопочвы археологических памятников, погребенные под курганными насыпями разных временных интервалов, охватывающих средний и поздний голоцен. Палеопочвенные исследования на территории Нижнего Поволжья активно проводятся, начиная с 80-х годов XX в. Основы этих работ заложены сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пушино) [5–10, 12, 16, 17].

На сегодняшний день благодаря изучению разновозрастных археологических памятников в области палеопочвоведения достигнуты весьма заметные успехи в решении генетико-эволюционных проблем степного почвообразования. Экспонирование грунтовой толщи при сооружении курганов дало возможность установить скорость степного педогенеза с известным нуль-моментом, причем для различных элементов микрорельефа (прикурганных ровиков, курганных насыпей) [5–9]. Основное внимание при почвенно-археологических исследованиях уделяется вопросам пространственно-временной изменчивости почвенных свойств и процессов и эволюции почв за последние 5000–6000 лет. Таким образом, в настоящее время проблему палеопочвенного изучения памятников археологии как памятников природы отличает фундаментальная степень разработанности в методическом, теоретическом и хроногеографическом аспектах. Следует отметить, что это приоритетная заслуга, прежде всего, российской почвенно-генетической школы. Специфика зарубежных работ обусловлена иными

археологическими объектами исследований (стоянки и поселения палеолита и мезолита плейстоценового и раннеголоценового возрастом 8–10 тыс. лет и более, центры древних цивилизаций Ближнего Востока и Средиземноморья и др.) и они ориентированы, главным образом, на решение георхеологических проблем.

К настоящему времени обобщены результаты комплексного изучения широкого спектра свойств голоценовых палеопочв археологических памятников (курганов) ряда ключевых объектов степей юго-востока Восточно-Европейской равнины (юг Приволжской возвышенности; Северные и Южные Ергени – курганные группы на территории Ростовской области, Республики Калмыкия и Ставропольского края; Заволжья и южного Приаралья и др.). Базируясь на исследованиях большого набора почв, погребенных под разновозрастными насыпями археологических памятников степей юго-востока Восточно-Европейской равнины, к настоящему времени сформированы представления о климатических изменениях коснувшихся этого региона. Реконструкция показала, что в конце IV–первой четверти III тыс. до н. э. климатические условия были аридные современных. На рубеже III–II тыс. до н. э. отмечается наименьшая среднегодовая норма атмосферных осадков. На I в. н. э. приходился микроплювиал, который во II–III вв. н. э. сменился очередным засушливым периодом. В эпоху развитого средневековья (XII–XIV вв. н. э.) имел место климатический оптимум с максимумом увлажненности за последние 5000 лет. Сопоставление полученных результатов для палеопочв степей европейской части России с климатическими записями для регионов Ближнего Востока, свидетельствует о синхронизации глобальных планетарных климатических колебаний [1, 7, 8, 10, 17].

Важным этапом в палеопочвенных исследованиях явилось привлечение инструментальных минералогических и геохимических методов, а также комплекса магнитных методов. Ранее нашим научным коллективом продемонстрирована связь содержания магнитных минералов с биоклиматическими условиями почвообразования. Показана ведущая роль диссимилиаторных железоредукторов в образовании супердисперсного биогенного магнетита в степных почвах и в формировании профиля магнитной восприимчивости и намагниченности почв [1, 16, 24]. Исследование магнитных свойств и магнитной минералогии степных почв показало прямую зависимость природы величины магнитной восприимчивости материала почвенного профиля относительно почвообразующей породы от среднегодового количества осадков. Это позволило количественно рассчитать величины атмосферных осадков на изучаемой территории в прошлые исторические

эпохи [1, 17]. Таким образом, был реализован новый подход для реконструкции количества атмосферных осадков в разные исторические и геологические эпохи по результатам изучения магнитной минералогии палеопочв степей в голоцене и плейстоцене. Анализ данных для различных регионов планеты и математическое моделирование данных, проведенное в последние годы Махер с соавт. [25, 26], продемонстрировали, что наибольшая статистическая зависимость между магнитными свойствами почв и среднегодовым количеством осадков фиксируется в степной зоне Восточно-Европейской равнины и для территории лёссового плато Китая в интервале осадков 300–700 мм/год. Это в очередной раз подтвердило правомочность этого подхода к количественным реконструкциям палеоклимата для степной зоны юга Восточно-Европейской равнины.

Перспективными методами в палеоклиматических реконструкциях являются исследования минералогических и геохимических параметров твердофазных продуктов палеопочв и четвертичных отложений [11, 12, 30]. В настоящей публикации предпринята попытка демонстрации возможностей различных инструментальных методов для комплексной реконструкции динамики климатических параметров условий почвообразования в четвертичное время.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Голоценовые палеопочвы археологических памятников использовали в качестве модели для апробации и тестирования геохимических, минералогических и изотопных параметров, используемых при реконструкциях климата в дальнейшем для степной зоны Восточно-Европейской равнины в четвертичное время.

В качестве примера и одного из тестовых объектов выбрали палеопочвы второй половины голоцена – курганную группы “Авиловский”. Курганный могильник расположен на краю первой надпойменной террасы правобережья р. Иловля в 1 км к западу от с. Авилов (Волгоградская область). В современном почвенном покрове здесь доминируют каштановые и светло-каштановые солонцеватые почвы. Район исследования относится к зоне сухих степей, он расположен в Волгоградской области (Иловлинский район) и приурочен к южной части Приволжской возвышенности. Хроноряд почв включал 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.). Таким образом, изучен представительный педохроноряд, включающий почвы, погребенные ~5100, ~4900, ~4000, ~1900, ~1750, ~700 л. н. и современную почву. Этот педохроноряд и аналогичные палеопочвенные

объекты детально описаны в предшествующих публикациях [1, 8, 17].

Почвообразующие породы представлены породами лёссовидными суглинками (QIII) и мелкозернистыми песками аллювиального происхождения. Среди палеопочв преобладают каштановые (солонцеватые почвы в различной степени засоленные).

Объектами исследования, фиксирующими последовательность развития педосферы в интервале плейстоцена, были опорные разрез. Семибалки-2, Чумбур-Коса, Беглица и др., содержащие горизонты лёссов и ископаемых почв. Объекты исследования расположены на территории Азово-Кубанской низменности на побережье Таганрогского залива. Большую часть территории занимают лёссовые аккумулятивно-эрозионные равнины [15]. Северо-Восточное Приазовье из-за полноты и открытости разрезов четвертичных отложений является одним из наиболее значимых в палеогеографическом отношении районов юга Восточно-Европейской равнины. Береговые обнажения Таганрогского залива позволяют непрерывно проследить строение лёссово-почвенных комплексов на протяжении многих километров. В разрез. Семибалки-2 представлены три региональных комплекса ископаемых почв: воронский, инжавинский, каменский – и четыре горизонта лёссов: коростылевский, борисоглебский, валдайский. В ходе экспедиционных исследований 2014 г. совместно с лабораторией эволюционной географии Института географии РАН, возглавляемой А.А. Величко, отобрали образцы из опорного разрез. Чумбур-Коса (восточное побережье Таганрогского залива). В разрезе вскрыта толща плейстоценовых отложений общей мощностью 15,9 м, в которой представлены следующие палеопочвы: мезинский почвенный комплекс (~135–117 тыс. л. н.); каменная почва (~200–250 тыс. л. н.); инжавинская почва (~380–410 тыс. л. н.); воронская почва (500–600 тыс. л. н.). Привязку горизонтов палеопочв проводили в соответствии с хростратиграфической схемой плейстоцена, разработанной лабораторией эволюционной географии Института географии РАН [3, 4].

Химический состав образцов изучали методом рентгенфлуоресцентного анализа (Spectroscan МАКС-GV) по методике измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах. Среднюю пробу измельчали до пудры и помещали в специальную кювету. Стандартная навеска не менее 200 мг. Количественные калибровки производили с помощью комплекта государственных стандартных образцов состава почв. Измерения показателя магнитной восприимчивости проводили в лабораторных условиях на приборе Carrabridge KLY-2. Минеральный состав валовых образцов, илистой (<2 мкм) и крупной (>2 мкм)

фракций изучали методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометрах ДРОН-3 и Bruker-Phaser ($\text{CuK}\alpha$ -излучение). Рентгеновская диагностика глинистых минералов базировалась на результатах следующих тестов: Mg^{2+} -форма в воздушно-сухом состоянии; Mg^{2+} -форма, насыщенная этиленгликолем в течение 24 ч; Mg^{2+} -форма, прокаленная до Mg 350°C в течение 2 ч; Mg^{2+} -форма, прокаленная до 550°C в течение 2 ч, и ряд других стандартных тестов. Структурные особенности захороненного органического вещества изучали методом твердофазной ЯМР-спектроскопии на ядрах ^{13}C (Bruker Avance NMR 400 MHz). Изотопный состав углерода органического вещества почв исследовали методом масс-спектрометрии с использованием аналитического EA-CF-IRMS комплекса, состоящего из элементного анализатора Flash 1112, изотопного масс-спектрометра Delta V Advantage и интерфейса ConFlo III. Навески проб для анализа взвешивали на весах Mettler Toledo XP26, масса навесок 20–30 мг. Для обеспечения метрологического контроля использовали международный стандарт МАГАТЭ USGS40. Определение изотопного состава углерода каждой пробы выполняли в двукратной аналитической повторяемости.

Для проведения количественных реконструкций параметров состояния окружающей среды (палеотемпературы, палеоосадков, аридности климата) использовали различные методы и подходы.

Магнитные свойства степных почв связаны с биоклиматическими условиями. Для палеоэкологических реконструкций в качестве оптимального показателя и наиболее легко получаемого технически использована величина прироста магнитной восприимчивости в почвенном профиле относительно материнской породы [1]. Среднегодовая норма атмосферных осадков (MAP_MS) на основании данных магнитной восприимчивости (MS) современных почв степной зоны европейской части России определяется следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \text{MAP_MS, (мм/год)} &= \\ &= 86.4 \ln(\chi_B - \chi_C) + 90.1, \quad (R^2 = 0.93) \quad [1, 16], \end{aligned}$$

где $(\chi_B - \chi_C)$ – прирост магнитной восприимчивости в результате почвообразования, В и С почвенные горизонты соответственно.

Для территории лёссового плато Китая ранее были получены аналогичные эмпирические зависимости [26].

Геохимический подход базируется на эмпирических зависимостях коэффициентов выветривания, связывающих изменения валового химического состава почвенной массы и ее элементов с

климатическими факторами (палеоосадки – MAP, палеотемпературы – MAT).

Геохимический коэффициент выветривания, выбранный для использования по результатам предшествующих исследований [27]: $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] 100$ – отражает соотношение первичных и вторичных минералов в валовом образце, используется для получения информации о интенсивности выветривания и используется для климатических реконструкций палеоосадков (MAP). Невыветрелые породы характеризуются значениями CIA ~50 ед., тогда как сильновыветрелые имеют CIA до 100 единиц, в почвах этот коэффициент отражает в первую очередь степень преобразования вторичных глинистых минералов илистой фракции;

PWI (палеопочвенный индекс выветривания) предложен и используется как показатель палеотемператур [22]: $\text{PWI} = [4.20\text{Na} + 1.66\text{Mg} + 5.54\text{K} + 2.05\text{Ca}] 100$;

Rb/Sr – коэффициент предложен на основе разницы в устойчивости различных минералов к выветриванию, а именно слюд и калиевых полевых шпатов, с которыми в ассоциации находится Rb, и карбонатов, с которыми ассоциирует Sr [20];

Ba/Sr – характеризует гидротермические условия осадконакопления, в частности, процесс выщелачивания [30, 31]. Ba находится в ассоциации с калиевым полевым шпатом и выносится из почв слабее Sr, который ассоциирует с карбонатами.

Подробный анализ использования предложенных показателей и ряда других, а также обоснование этого подхода представлены в ряде публикаций последних лет [12, 21, 27, 30, 31].

Калибровки, полученные на основании анализа современных почв различных климатических зон в основном для территории Северной Америки, выявили следующие зависимости для среднегодовых атмосферных осадков (MAP, мм/год) и среднегодовых температур (MAT, °C):

$$\text{MAP_CHEM} = 221.1e^{0.0179(\text{CIA-K})} \quad [30],$$

$$\text{MAT} = -2.74 \ln(\text{PWI}) + 21.39 \quad [20].$$

Также для количественных реконструкций MAP нами используется выявленная зависимость уровня атмосферных осадков и изменение концентрации Rb в гумусовых горизонтах погребенных почв сухостепной зоны России (MAP_YRb) [12].

Методы изотопной геохимии позволяют получать информацию о климатическом режиме территории, реконструировать некоторые параметры климатических систем [19, 22, 28, 33, 34]. Сумму среднегодовых атмосферных осадков (MAP) можно оценить, используя эмпирическую зависимость: C4-растений–атмосферные осадки, полученную в наших предшествующих исследова-

ниях [14]. Кроме того, поскольку гумус наследует изотопный состав растительности, то по значениям $\Delta^{13}\text{C}$ гумуса можно выяснить, какие растения преобладали в составе растительности в то или иное время. С4-растения более конкурентоспособны в аридных условиях, что позволяет оценить степень аридности по доле С4-растений в экосистемах. Чем тяжелее изотопный состав углерода, тем больше присутствовало в составе растительности С4-растений, тем ариднее был климат. Очень важным для палеорекоkonструкций является время отклика изотопного состава углерода гумуса на изменение растительности. Оно составляет всего несколько десятков лет. Таким образом, изучая изотопный состав органического вещества погребенных под археологическими памятниками почв, мы имеем возможность реконструировать природные условия времени непосредственно предшествующего его сооружения. При подобных исследованиях могут быть зафиксированы даже краткосрочные изменения природной среды.

Некоторыми авторами рассматривается возможность проведения реконструкций среднегодовой температуры по изотопному составу углерода гумуса [28], позволяющего оценить температуру середины лета. Эта эмпирическая зависимость успешно использовалась при реконструкции климата семиаридных территорий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Голоценовый хронологический ряд палеопочв. Исследование профильного распределения магнитной восприимчивости изученных почв демонстрирует, что максимальные изменения в исследуемом хронологическом интервале затрагивают гор. А1, В1, В2. Максимальные значения магнитной восприимчивости (χ) до $(80-85) \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ характерны для верхних горизонтов почв средневековья (XIII в. н. э., ~700 л. н.) и сарматского периода (I в. н. э., ~1900 л. н.), в то время как для почвы катакомбной культуры (рубеж III–II тыс. до н. э., ~4000 л. н.) они составляют лишь $(25-28) \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. В современной каштановой почве значения χ достигают $(55-60) \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, для почвообразующих лёссовидных суглинков величина χ составила $(15-20) \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. В дальнейшем при описании полученных результатов будем оперировать возрастом погребения в абсолютных значениях (л. н.), полученных на основании археологических датировок. По ранее полученным зависимостям величины прироста магнитной восприимчивости от количества атмосферных осадков [1, 24] рассчитан уровень атмосферной увлажненности на исследуемой территории, который составил 330–420 мм/год. При этом наименьшее количество осадков характерно для почвы, погребенной 4000 л. н. (около 330 мм/год). Максимальная сте-

пень увлажненности отмечается для почв, погребенных 5100, 1900 л. н., и почв средневековья (400–420 мм/год). Полученные климатические параметры использовали для интерпретации процессов преобразования минеральной массы почв и органического вещества почв в связи с вариациями климатических условий в позднем голоцене (рис. 1). Климатические колебания нашли отражение в изменении минералогического состава палеопочв (рис. 1Б). В ходе изучения илистой фракции гор. А1 и В1 разновозрастных палеопочв выявлены следующие особенности. В профилях изученных почв смектитовая фаза представлена смешанослойным иллит-смектитом, его содержание убывает к гор. А1, где составляет от 30 до 51%, тогда как содержание гидрослюды возрастает в том же направлении и изменяется в пределах от 35 до 50%. Для почв, имеющих признаки солонцеватости, максимальное содержание смектитовой фазы отмечается в солонцеватых гор. В1 почв, погребенных 5100, 4900, 700 л. н. и современной почве, достигая 67%. Стоит отметить, что максимально процессы преобразования минеральной массы почв затрагивают два верхние горизонта (верхние 30 см профиля). Здесь, помимо описанных выше процессов преобразования, отмечается разрушение хлоритовой фазы. Данное явление не характерно для почв, формирующихся в условиях наиболее аридного климата – 4000 и 1750 л. н. Для них наблюдается сохранение хлоритов в пределах всего профиля, включая гор. А1.

Указанные изменения также фиксируются в геохимических коэффициентах в связи с их чувствительностью к процессам преобразования минералогического состава степных почв. Значения CIA для валовых образцов почв изменяются в пределах от 25 до 70, Rb/Sr – от 0.20 до 0.62, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ от 0.26 до 1.41. Во всех случаях максимальные величины индексов отмечаются для гор. А1 почв влажных климатических эпох, погребенных 5100, 1900, 700 л. н., и современной каштановой почвы. Для них значения CIA варьируют от 55 до 65, Rb/Sr – от 0.51 до 0.62. Минимальные значения характерны для почв аридных условий формирования (погребенных 4000 и 1750 л. н.), CIA – от 44 до 50, Rb/Sr – от 0.37 до 0.48.

В случае илистой фракции возможно применение геохимических индексов – Rb/Sr и Ba/Sr. При изучении коэффициента Ba/Sr, характеризующего гидротермические условия, в частности процесс выщелачивания, повышенные значения наблюдаются как для гор. А1, так и гор. В1 почв и изменяются в пределах от 2.57 до 7.34. Максимумы, как и в случае коэффициента Rb/Sr, характерны для гор. А1 почв, формировавшихся под влиянием гумидных условий (от 6.71 до 7.34). Значения коэффициента Rb/Sr для изученных почв находятся в интервале от 0.31 до 1.97. При

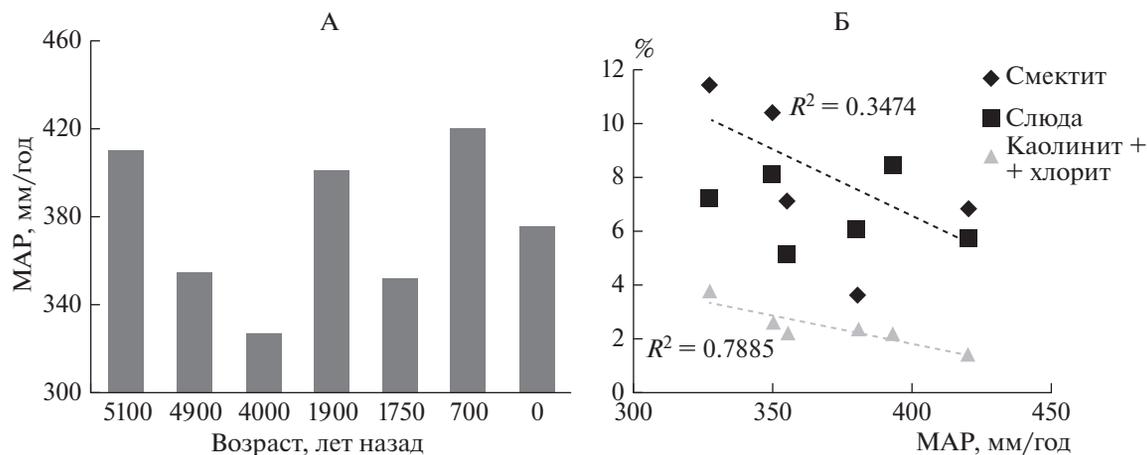


Рис. 1. Реконструкции изменения среднегодовых атмосферных осадков по магнитным палеопочвенным данным хроноряда АВИЛОВ (А); связь глинистой минералогии палеопочв с климатическими факторами (Б).

этом максимальные значения отмечаются для гор. А1 почв влажных климатических эпох (погребенных 5100, 1900 л. н. и современной почвы) и составляют 1.50–1.97. Минимальные значения характерны для почв, погребенных 4000 и 1750 л. н., –0.98–1.09. Для почвообразующей породы значение Rb/Sr составляет от 0.46 до 0.74.

Мы считаем, что Rb накапливается в верхних горизонтах почв при выветривании глинистых минералов, в частности смектита. В результате в гумусовом горизонте остаются более устойчивые к выветриванию гидрослюда, такие как иллит, в которые в виде изоморфной примеси входит Rb. При этом биологические факторы, так же как и испарительная концентрация, не играют существенной роли в его накоплении. Этот показатель может рассматриваться по аналогии с иллит-смектитовыми характеристиками, предложенными для почв автоморфного ряда, сформировавшихся на лёссах и лёссовидных отложениях.

Проведена отработка методики расшифровки информации, сохраняющейся в органо-минеральных комплексах палеопочв. Выполнено изучение органического вещества в валовых образцах и в составе илистой фракции фоновых почв и палеопочв голоценового хроноряда методом твердофазной ^{13}C ЯМР-спектроскопии. Содержание органического углерода в гор. А1 изученных почв составляет 0.59–2.01%. По профилю оно изменяется в широких пределах от 0.29 до 1.65%. Изучение органического вещества почв показало, что содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в валовом образце современной почвы составляет 2.01%, азота – 0.17%; в илистой фракции $\text{C}_{\text{орг}} = 2.89\%$, N = 0.37%. Для валовых образцов палеопочв характерно уменьшение содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ от 1.14 до 0.59%, N от 0.08 до 0.05%. Илстые фракции всех изученных почв существенно обогащены $\text{C}_{\text{орг}}$ и N по сравнению с

валовыми образцами. Изучение состава и характеристик органического вещества показало, что потери $\text{C}_{\text{орг}}$ и N валовых образцов почв коррелируют со временем, прошедшим с момента погребения почвы, распределение $\text{C}_{\text{орг}}$ в составе илистой фракции определяется степенью атмосферной увлажненностью.

Метод ^{13}C ЯМР-спектроскопии позволяет получать уникальную информацию о доминирующих типах углерод–углеродных связях и их пространственном расположении. На сегодняшний день имеется полная классификация химических сдвигов ядер атомов углерода по типам связей, позволяющая идентифицировать основные структурные фрагменты многокомпонентных смесей органических молекул [32]. ^{13}C ЯМР-спектры валового образца гор. А1 современной почвы и его илистой фракции имеют сходные характеристики: преобладают О-алкилы – 35%. Содержание алифатических структур составляет около 25–27%, ароматических 17–19% и карбоксильных групп 11–14%. Органическое вещество в составе илистой фракции погребенных почв, сформировавшихся в условиях гумидного климата (погребенных 5100, 700 л. н.), характеризуется близким составом, но здесь по сравнению с илистой фракцией современной почвы несколько сокращается содержание алкилов, а количество ароматических структур и карбоксильных групп возрастает. ^{13}C ЯМР-спектр илистой фракции почвы аридного типа (погребенной 4000 л. н.) резко отличен. Для этого образца характерно низкое содержание ароматических структур (13%) и преобладание алифатических (30%).

Анализ параметров ЯМР спектров органо-минеральных комплексов илстых фракций погребенных и современных почв продемонстрировал наличие прямых корреляций качественных ха-

рактических органического вещества палеопочв с вариациями климатических условий голоцена (рис. 2). Следует подчеркнуть, что значимость получаемых зависимостей для илистой фракции существенно больше по сравнению с валовым образцом. Органическое вещество палеопочв максимально сохраняется в форме стабилизированных органо-минеральных комплексов.

Изменения изотопного состава органического вещества в илистой фракции палеопочв изученного хроноряда отражают динамику климатических условий степей в голоцене и позволяют определить различие в соотношении групп C3/C4-растений в связи с изменением климата. Таким образом, демонстрируется возможность использования изотопного состава углерода органо-минеральных комплексов (илистой фракции палеопочв) для палеореконструкций (рис. 3).

Кроме того, для изученного хроноряда почв проведена апробация возможности количественной оценки палеотемператур для голоценовых палеопочв на основе геохимических индексов (PWI) [20]. Полученные результаты коррелируют с записями палеотемператур для голоцена по ледникам Гренландии [18]. Таким образом, данный инструмент позволит в дальнейшем рассчитывать гидротермический показатель (индекс аридности) и детально оценить сдвиги границ климатических зон на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины.

Лёссово-почвенные комплексы Приазовья. В качестве примера приведем детальные климатические реконструкции для разр. Семибалки-2 с использованием параметров состояния твердой фазы палеопочв (рис. 4).

Средние значения показателя удельной магнитной восприимчивости в лёссах составляет порядка $32 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, в почвенных горизонтах χ порядка $62 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Это говорит о том, что условия почвообразования способствовали формированию ферритмагнитных минералов. Максимальные значения χ фиксируются в Воронской почве $\sim 77 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ и уменьшаются в почвенных горизонтах вверх по разрезу $\sim 72 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ в Инжавинской, $\sim 51 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ в Каменской почве.

Реконструированный по магнитным данным среднегодовой уровень атмосферных осадков, существовавший на протяжении формирования лёссово-почвенного комплекса Семибалки-2 составлял в эпохи оледенений в среднем 290 мм/год. В более теплые и влажные периоды межледниковий, во время которых формировались почвенные комплексы, среднегодовой уровень атмосферных осадков увеличивался в среднем до 580 мм/год. Максимальные значения фиксируются в Мучкапское межледниковье (580 мм/год) и последовательно снижаются в Лихвинское (560 мм/год) и

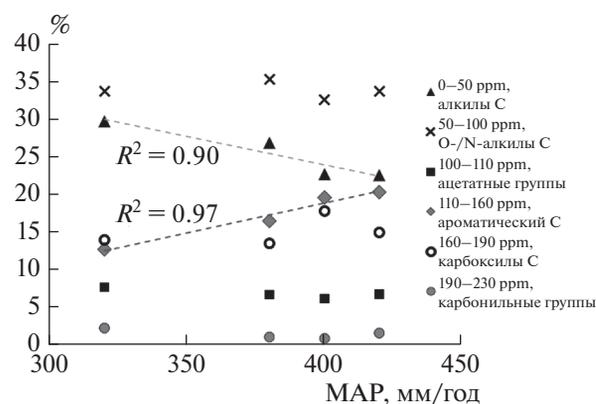


Рис. 2. Изменение качественных характеристик органического вещества илистой фракции палеопочв в зависимости от климатических факторов.

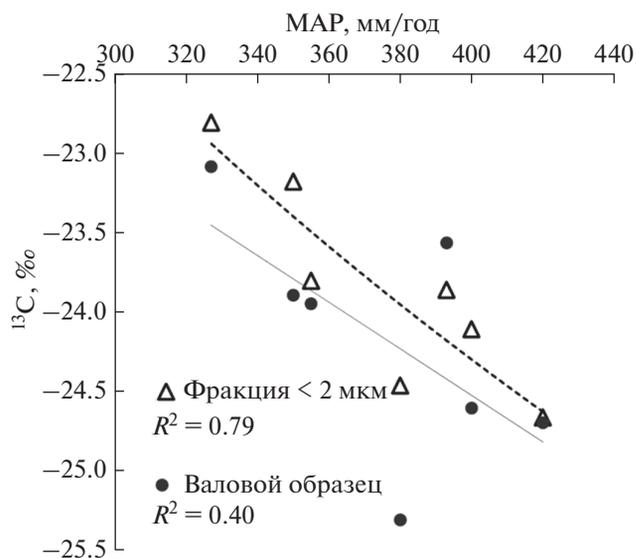


Рис. 3. Изменение изотопного состава углерода органического вещества почв в зависимости от климатических факторов.

Каменское (530 мм/год). Если рассматривать процентное отклонение этих показателей от современной голоценовой почвы, отмечается уменьшение уровня атмосферной увлажненности до 40% в ледниковые периоды и увеличение до 5% в межледниковые эпохи.

По показателю CIA породы, слагающие разр. Семибалки-2, являются слабовыветрелыми [35]. Среднее значение CIA в лёссовых горизонтах составляет 51, в почвенных комплексах 64. Показателем CIA порядка 70 характеризуются отложения, находящиеся на глубине 8.45–8.75 м. Эти слои соответствуют Воронскому педокомплексу, сформированному в Мучкапское межледниковье. Для этих отложений отмечается по-

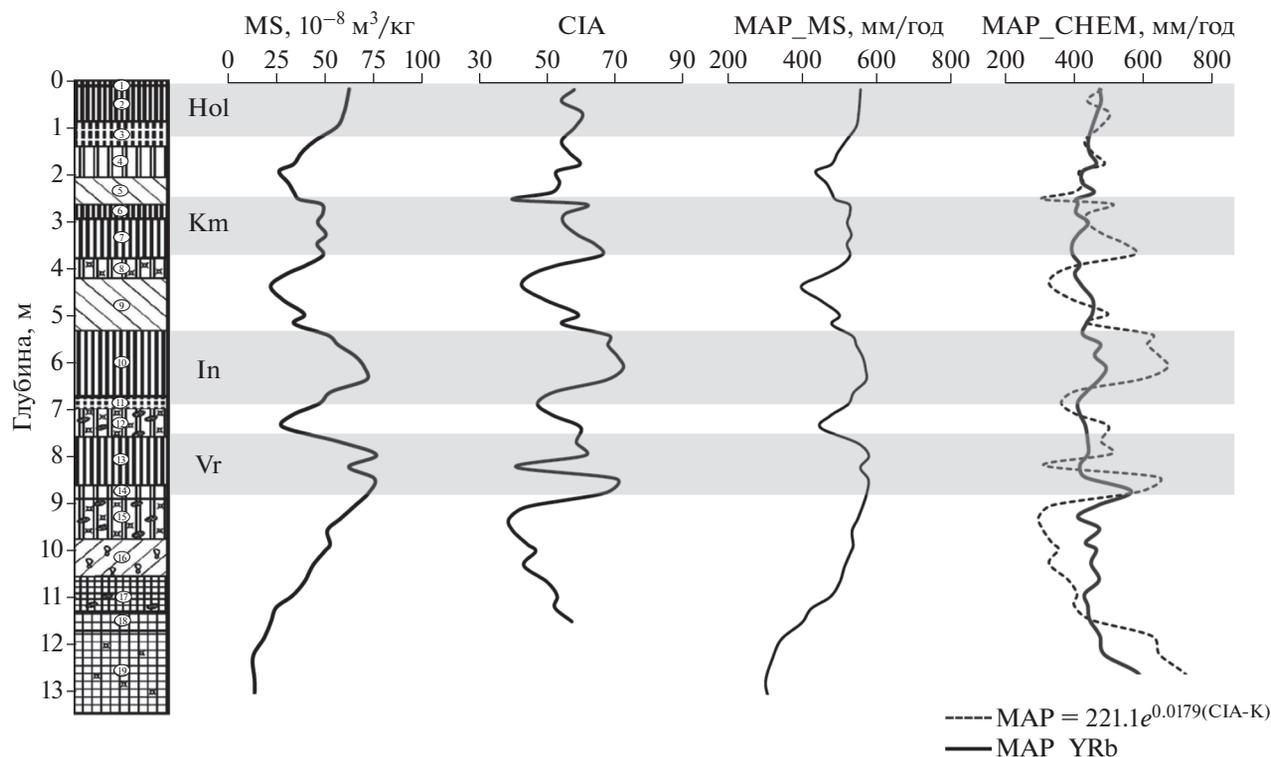


Рис. 4. Пример палеоэкологических количественных реконструкций. Среднегодовой уровень атмосферных осадков на различных этапах исследуемого хроноинтервала, рассчитанный с помощью геохимических и магнитных параметров для разр. Семибалки-2.

вышение значений показателей выветривания и выщелачивания (CIA $\sim 67-70$, Rb/Sr $\sim 0.4-0.5$, и Ba/Sr $\sim 1.7-2.1$). В Инжавинской почве, сформированной в Лихвинское межледниковье, наблюдается увеличение показателя CIA до 73, а также коэффициентов выветривания Rb/Sr ~ 0.4 , что соответствует достаточно выветрелым отложениям, формировавшимся в условиях относительно влажного и теплого климата. Некоторым увеличением коэффициента CIA (порядка 62–66) характеризуются слои, залегающие на глубине 2.6–3.6 м. Они сложены темно-коричневым суглинком и являются сформированной в Чекалинское межледниковье Каменской почвой. Значениями коэффициента CIA ≤ 50 соответствуют холодным этапам лёссонакопления. Так, сложенный серо-коричневым суглинком, расположенный на глубине 6.8–7.1 Коростылевский лёсс имеет CIA = 47 и значения коэффициентов выветривания Rb/Sr ~ 0.3 и Ba/Sr ~ 1.8 . Для отложений Борисоглебского лёсса характерно значение показателя CIA порядка 43, для отложений Валдайского лёсса (Валдайское оледенение) – 40, что является характерным для слабовыветренных пород.

На рис. 4 приведены данные расчета MAP с использованием магнитных (MAP_MS) и геохимических показателей (MAP_CHEM). В целом, показатели MAP с использованием индекса CIA,

по-видимому, завышают значения осадков, так как по морфотипическим признакам погребенных почв в среднем и позднем плейстоцене на исследуемой территории преобладали степные ландшафты, для формирования которых необходимо небольшое количество осадков. Рассчитанное с помощью показателя MAP_YRb количество осадков значительно меньше. Средние значения для ледниковых эпох составляют около 320 мм/год, для межледниковых периодов – 390 мм/год. Максимальное значение фиксируется в Мучкапское межледниковье ~ 440 мм/год.

По показателям MAP_CHEM и MAP_YRb фиксируется тренд на аридизацию и уменьшение количества атмосферных осадков от 570–520 мм/год в Мучкапское межледниковье до 440–490 мм/год в Каменское. Эти значения сопоставимы с реконструкциями осадков в межледниковые эпохи по показателю магнитной восприимчивости. Таким образом, для межледниковых эпох плейстоцена были характерны более влажные, чем современные условия. В ледниковые периоды количество атмосферных осадков уменьшалось на 20–40% относительно современных значений. Схожий результат получен и для других изученных разрезов в регионе.

Для опорных разр. Чумбур-Коса, Беглица, содержащих серии лёссов и ископаемых почв, наи-

более полно отражающих четвертичную историю юга Восточно-Европейской равнины, проведены детальные исследования глинистой минералогии с целью апробации новых параметров для палеореконструкций (минералогические индексы иллит/хлорит и иллит/смектит). Для почвенных горизонтов отмечается увеличение этих индексов по сравнению с лёссами (детально данные не приводятся). Интенсивность процесса иллитизации определяется климатическими факторами. Полученные результаты согласуются с геохимическими данными и реконструкциями, базирующихся на магнитной минералогии палеопочв.

В дополнение для разр. Чумбур-Коса, помимо детальной характеристики минеральной матрицы ископаемых почв, изучено захороненное почвенное органическое вещество с использованием традиционных для почвоведения химических методов и комплекса инструментальных физико-химических методов его исследования, включая твердофазную ^{13}C ЯМР-спектроскопию. Анализ ЯМР-спектров органо-минеральных комплексов илистых фракций погребенных почв лёссово-почвенного комплекса, как и в случае с голоценовым хронологическим порядком, продемонстрировал наличие корреляций качественных характеристик с вариациями климатических условий. Для илистой фракции отмечаются значимые изменения в изотопных данных $\delta^{13}\text{C}$, отражающих климатические факторы МАТ (температуры) и МАР (осадки). Для разр. Чумбур-Коса $\delta^{13}\text{C}$ изотопного состава углерода палеопочв и лёссов лежит в интервале -27.2 – -24.52 , что свидетельствует о преобладании C_3 -растений. Для всех лёссов значения $\delta^{13}\text{C}$ облегчатся в интервале 1.5 – 3% по сравнению с палеопочвами, что подтверждает понижение среднегодовой температуры в период лёссонакопления. Полученные результаты свидетельствуют о информативности изотопного состава углерода органо-минеральных комплексов (илистой фракции палеопочв) для палеореконструкций, но требуют дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученной совокупности магнитных, минералогических, геохимических и изотопных параметров почв и пород выделяется оптимальный вариант набора показателей для палеоклиматических реконструкций. Результаты разных методов дополняют и подтверждают полученные данные, динамика климата существенным образом сказывается на состоянии почв степной зоны и находит отражение в формировании, исчезновении или степени выраженности их свойств и признаков. Детальные минералогические исследования палеопочв, а также анализ органического вещества палеопочв

максимально сохраняющегося в форме стабилизированных органо-минеральных комплексов (илистой фракции почв), дополненные изучением вариаций био- и литофильных элементов существенно увеличивает достоверность почвенных индикаторов для получения информации о палеоклиматических условиях.

Базируясь на изучение геохимических, магнитных и минералогических параметров палеопочв хронологического палеопочв голоцена и ключевым разрезам лёссово-почвенной серии Приазовья (Чумбур-Коса, Семибалки и др.) получены количественные параметры состояния окружающей среды (палеотемпературы, палеоосадков, аридности климата). В частности, расчеты с использованием почвенных параметров (магнитные и геохимические индикаторы) палеоэкологических условий на юге Восточно-Европейской равнины показали, что в конце IV–первой четверти III тыс. до н. э. климатические условия были несколько засушливее современных. На рубеж III–II тыс. до н. э. приходилась наименьшая среднегодовая норма атмосферных осадков. На I в. н. э. приходился микропльвиал, который во II–III вв. н. э. сменился очередным засушливым периодом. В эпоху развитого средневековья (XII–XIV вв. н. э.) имел место климатический оптимум с максимумом увлажненности за последние 5000 лет. Градиент среднегодовых осадков в этом временном интервале составлял 100 – 120 мм/год. Расчетные данные для современных почв соответствуют метеорологическим показателям. Эти результаты полностью согласуются с климатическими реконструкциями, проведенными с использованием традиционных почвенных показателей (содержанием гумуса, легкорастворимых солей, карбонатов и др.) [8].

На территории Приазовья в плейстоцене существовал направленный сдвиг гидротермического режима межледниковых эпох от условий с более высокой влагообеспеченностью к условиям увеличения аридизации. Наиболее гумидные условия на исследуемой территории существовали в период Мучкапского межледниковья (500 – 600 мм/год), наиболее аридные – в эпоху Каменского межледниковья (400 – 500 мм/год). В ледниковые эпохи на территории Приазовья в среднем выпадало 300 – 400 мм осадков.

Следует отметить некоторые методические трудности. Типичным подходом в разработке геохимических, геофизических и других индексов, используемых для количественной реконструкции палеоклиматических условий древних эпох, является определение зависимости между этими параметрами в современных отложениях с современными климатическими параметрами (среднегодовым количеством осадков, температурой и др.). При этом следует учитывать влияние на результат матричного эффекта, заключающегося в исполь-

зовании эмпирических зависимостей, полученных для конкретных территорий и геологических отложений. Калибровка палеогеографических показателей, как правило, полученная в определенных климатических зонах и соответствующих геологических породах и отложениях, и распространение полученных зависимостей, не всегда позволяет однозначно реконструировать климатические особенности для всех исследуемых территорий и отложений. Идеальное решение отмеченных проблем требует использования в каждом исследовании региональных калибровок, однако такие работы для территории Восточно-Европейской равнины носят единичный характер. Несмотря на определенные объективные трудности, именно исследование четвертичных палеопочв и отложений с использованием комплекса геохимических, петрофизических и минералогических методов, взаимно дополняющих и уточняющих, позволяет проводить наиболее реалистичные реконструкции условий их формирования.

Количественные параметры палеоэкологических условий на юге Восточно-Европейской равнины позволяют провести оценки масштаба сдвига природных зон степей в четвертичное время, а также определить кризисные и оптимальные этапы в истории почвообразования как основы для оценки современного состояния почвенного покрова степных экосистем юга России и долгосрочных прогнозах его развития в контексте глобальных и региональных изменений климата.

Благодарность. Работа выполнена по теме Государственного задания № 0238-2016-0015 и при частичной поддержке РФФИ (гранты №18-04-00800, 18-05-00869).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А.О., Алексеева Т.В.* Оксидогенез железа в почвах степной зоны. М.: ГЕОС, 2012. 204 с.
2. *Величко А.А.* Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука, 1973. 254 с.
3. *Величко А.А.* К оценке тренда аридизации юга России: по результатам исследований разреза Семибалки-1, Приазовье // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2006. С. 108–133.
4. *Величко А.А.* Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства северного полушария. Поздний плейстоцен–голоцен. М., 2009. 120 с.
5. *Геннадиев А.Н., Иванов И.В.* Эволюция почв и палеопочвоведение: проблемы, концепции, методы изучения // Почвоведение. 1989. № 10. С. 34–43.
6. *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.
7. *Демкин В.А.* Почвоведение и археология. Пушкино, 1997. 213 с.
8. *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.
9. *Демкин В.А., Гугалинская Л.А., Алексеев А.О., Алифанов В.М., Демкина Т.С., Алексеева Т.В., Борисов А.В., Хомутова Т.Э., Иванникова Л.А., Кабанов П.Б., Алексеева В.А., Каширская Н.Н., Демкина Е.В., Дуда В.И., Дмитриев В.В., Сузина Н.Е., Ельцов М.В., Калинин П.И.* Палеопочвы как индикаторы эволюции биосферы. М.: НИА–Природа, фонд “Инфосфера”, 2007. 282 с.
10. *Иванов И.В.* Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 143 с.
11. *Калинин П.И., Алексеев А.О.* Геохимический подход к исследованию происхождения лёссовых отложений юго-востока Русской равнины // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2013. № 2. С. 53–60.
12. *Калинин П.И., Алексеев А.О., Савко А.Д.* Лёссы, палеопочвы и палеогеография квартала юго-востока Русской равнины // Тр. НИИ геологии Воронеж. гос. ун-та. Вып. 58. 2009. 140 с.
13. *Калинин П.И., Алексеев А.О.* Геохимическая характеристика лёссовопочвенных комплексов Терско-Кумской равнины и Азовокубанской низменности // Почвоведение. 2011. № 12. С. 1436–1453.
14. *Рысков Я.Г., Борисов А.В., Рыскова Е.А., Олейник С.А., Демкин В.А.* О соотношении педогенных и литогенных карбонатов в степных почвах и закономерности их профильной динамики за последние 4000 лет // Почвоведение. 1999. № 3. С. 293–300.
15. *Трофимов В.Т.* Лёссовый покров Земли и его свойства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 464 с.
16. *Alekseev A.O., Alekseeva T.V., Maher B.A.* Magnetic properties and mineralogy of iron compounds in steppe soils // Eurasian Soil Sci. 2003. V. 36. P. 59–70.
17. *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 palaeosols // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. V. 249. P. 103–127.
18. *Alley R.B.* The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland // Quaternary Sci. Rev. 2000. V. 19. P. 213–226.
19. *Cerling T.E., Quade J., Ambrose S.H., Sikes N.E.* Fossil soils, grasses, and carbon isotopes from Fort Ternan, Kenya: Grassland or woodland? // J. Human Evolution. 1991. V. 21. P. 295–306.
20. *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.
21. *Gallet S., Borming J., Masayuki T.* Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence China and paleoclimatic implications // Chem. Geol. 1996. V. 133. P. 67–88.
22. *Koch P.L.* Isotopic reconstruction of past continental environments // Annual Rev. Earth & Planet Sci. 1998. V. 26. P. 573–613.
23. *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 palaeocli-

- matic proxy // *Quaternary Sci. Rev.* 2002. V. 21. P. 1571–1576.
24. *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.
25. *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.
26. *Maher B. A.* The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments and their palaeoclimatic significance // *Aeolian Res.* 2011. V. 3. № 2. P. 87–144.
27. *Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature.* 1982. V. 299. P. 1523–1534.
28. *Nordt L., von Fischer J., Tieszen L.* Late quaternary temperature record from buried soils of the North American Great Plains // *Geology.* 35. 2007. P. 159–162.
29. *Retallack G.J.* *Soils of the Past: An introduction to paleopedology.* Malden, USA. Blackwell Science, 2001. 404 p.
30. *Sheldon N.D., Tabor N.J.* Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols // *Earth-Sci. Rev.* 2009. V. 95. P. 1–52.
31. *Sheldon N.D., Retallack G.J., Tanaka S.* Geochemical climofunctions from North American soils and application to paleosols across the Eocene–Oligocene boundary in Oregon // *J. Geology.* 2002. V. 110. P. 687–696.
32. *Wilson M.A.* *NMR techniques and applications in geochemistry and soil chemistry.* N.Y.: Pergamon, 1987.
33. *Zech M.* Evidence for Late Pleistocene climate changes from buried soils on the southern slopes of Mt. Kilimanjaro, Tanzania // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 2006. V. 242. P. 303–312.
34. *Zech M., Glaser B.* Improved compound-specific $\delta^{13}C$ analysis of n-alkanes for application in palaeoenvironmental studies // *Rapid Communications in Mass Spectrometry.* 2008. V. 22. P. 135–142.

Soil Indicators of Paleoenvironmental Conditions in the South of the East European Plain in the Quaternary Time

A. O. Alekseev^{a, *}, P. I. Kalinin^a, and T. V. Alekseeva^a

^a*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

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

Climatic conditions are an important factor affecting mineralogical and chemical compositions of soils and paleosols with the formation of paleosol archives that reflect major stages of the evolution of biogeosphere systems in the Quaternary period. In the steppe zone of the south of the East European Plain, two types of the “time capsules” storing information on paleoecosystems and paleoclimate of the Quaternary period are found. First, these are loess/paleosol complexes in coastal zone of the Sea of Azov and in the North Caucasus; their environmental records extend back into the Pleistocene for about 800 ka. Second, these are Holocene paleosols of archeological sites; they are buried under kurgans constructed in different periods of the Middle and Late Holocene. The completeness and reliability of paleoenvironmental reconstructions depend on the chosen study objects. For quantitative reconstruction of the environmental parameters in the past, independent methods based on the assessment and interpretation of soil solid-phase properties—magnetic, mineralogical, geochemical, isotopic, etc.—are to be applied. Detailed mineralogical study of paleosols coupled with the analysis of their organomineral complexes and variations in the concentrations of biophile and lithophile elements significantly increase the reliability of soil indicators of the paleoclimatic conditions. The sets of soil indicators obtained from the study of Holocene paleosols and loess/paleosol sequences in the Sea of Azov region allow us to estimate parameters of the paleoenvironment: paleotemperature, paleoprecipitation, and aridity of the climate.

Keywords: global climate changes, soil evolution, paleopedosphere, biogeochemistry, geochemistry, soil mineralogy, magnetic characteristics