ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2019, том 485, № 1, с. 83–87

ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.8:550.4

ПОЧВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ЮГЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

Член-корреспондент РАН А. О. Алексеев*, П. И. Калинин, Т. В. Алексеева, Г. В. Митенко

Поступило 26.07.2018 г.

Представлены результаты исследования закономерностей развития почв и природной среды степной зоны Восточно-Европейской равнины в различные культурно-хронологические этапы бронзового, железного веков и Средневековья (III тыс. до н.э. — II тыс. н.э.) на основе исследований палеопочв погребальных археологических памятников (курганов).

Ключевые слова: палеопочвы, палеоклимат, голоцен, геохимия, магнетизм окружающей среды, геостатистика, экологическое моделирование.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0869-5652485183-87

Без знаний экологических условий исторического прошлого невозможны прогноз долгосрочных ландшафтно-климатических изменений последствий геоэкологических изменений и выработка адекватной стратегии поведения в условиях ускоряющегося развития экологического кризиса. Прогноз не может быть корректным без всестороннего анализа закономерностей формирования основных природных компонентов прошлого, в том числе и погребённых почв. Климатические изменения существенно воздействуют на среду обитания растительных сообществ, и, как следствие, затрагиваются почвообразовательные процессы, процессы выветривания, биологический круговорот элементов, эмиссия и сток парниковых газов. Почвы и почвенный покров являются регулятором климата, его индикатором и памятью происходивших изменений. Климатические условия — один из основных факторов почвообразования, влияющий на процессы преобразования минералогического и химического состава почв и палеопочв, что обусловливает формирование палеопочвенных архивов, отражающих значимые этапы эволюции биосферы. Палеопочвенные исследования на территории Нижнего Поволжья активно проводятся начиная с 80-х годов XX в. Основы этих работ были заложены сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пущино) И.В. Ивановым, В.А. Демкиным и др. [1–4]. Последние годы развитие палеопочвоведения идёт по пути перехода из области качественного анализа к количественному подходу к палеореконструкциям. В настоящем сообщении представлены результаты исследований закономерностей развития почв и природной среды степной зоны Восточно-Европейской равнины. Хроноряды изучаемых почв, как правило, включают современные фоновые и погребённые 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, мы имеем представительные педохроноряды, включающие почвы, погребённые ~5100, ~4900, ~4000, ~3600, ~1900, ~1750, ~700 лет назад (л.н.) и современную почву. Приводятся обобщённые данные количественных климатических реконструкций для более 300 разновозрастных палеопочв под курганными насыпями степной зоны Восточно-Европейской равнины. Основные объекты приурочены к различным геоморфологическим областям Нижнего Поволжья и Прикаспийской низменности (рис. 1). В почвенно-географическом отношении район исследований входит в сухостепную и пустынно-степную зоны соответственно с тёмно-каштановыми и каштановыми, светло-каштановыми и бурыми полупустынными почвами. Для проведения количественных реконструкций на палеопочвенных объектах археологических памятников (палеоосадки, палеотемпература, аридность климата) использован комплекс независимых методов (магнитные, минералогические, геохимические методы, изотопная геохимия), отражающих состояние твёрдой фазы почв. Одна

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской Академии наук, г. Пущино Московской обл.

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

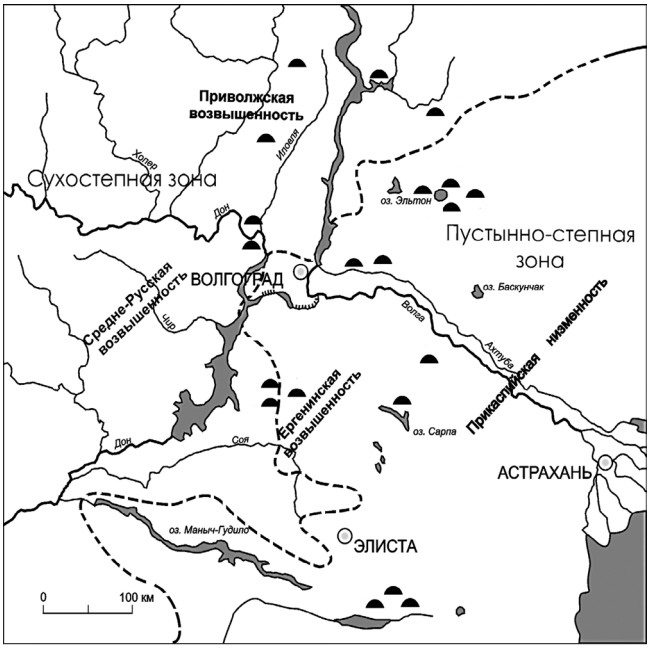

Рис. 1. Карта-схема района исследований степной зоны Восточно-Европейской равнины. *1* — курганные группы с хронорядами палеопочв, *2* — граница природных зон.

из ключевых задач настоящего исследования состояла в количественной оценке сдвига границы сухостепной и пустынно-степной зоны на протяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины, обусловленного климатическими вариациями.

Химический состав образцов изучен методом рентгенфлуоресцентного анализа (SPECTROSCAN MAKC-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 была не менее 200 мг. Количественные калибровки производились с помощью комплекта государственных стандартных образцов состава. Показатель магнитной восприимчивости измеряли в лабораторных условиях на приборе “KAPPABRIDGE KLY-2”.

На протяжение голоцена в степной зоне неоднократно отмечалось развитие аридизации (остепнение, опустынивание) ландшафтов. Увеличение частоты засух, сокращение количества выпадающих осадков (постоянное или временное), возрастание температур выше среднего многолетнего уровня, периодическое преобладание испарения над увлажнением приводили к уменьшению степени увлажнённости обширных территорий, а также вызванное этим сокращение биологической продуктивности экосистем свидетельствовало об аридизации суши [5]. Увлажнение территории вместе с температурными условиями определяет тип растительности и всего географического ландшафта. Для количественной характеристики степени увлажнения используются разнообразные показатели (индексы, коэффициенты) сухости или влажности климата. Степень аридности (сухости) климата характеризует индекс аридности. Различными авторами предложено много формул для определения индекса аридности. В большинство из них входят количество осадков в различные сроки, температура и испарение. Показатель, наиболее подходящий с точки зрения возможных палеоклиматических реконструкций, — индекс аридности по де Мортонну [6]. Это частное от деления годовой суммы осадков в см (R) на сумму средней годовой температуры (t), увеличенной на 10, т.е. $R/(t + 10)$.

По индексу аридности засушливые регионы мира с подразделяются на три зоны: аридную, семиаридную и сухую субгумидную. В аридной зоне (северные пустыни и южные полупустыни) годовое количество осадков 100–200 мм, индекс равен 0–10, зональная растительность солянково-полынная, почвы бурые пустынные. Семиаридная зона (северные полупустыни или опустыненные степи): среднее годовое количество осадков 200–400 мм, индекс аридности 10–20, зональная растительность злаково-полынная, почвы светло-каштановые. Сухая субгумидная зона, сухие степи: количество осадков 400–600 мм, индекс аридности 20–25, зональная растительность бедноразнотравная ксерофильно-злаковая, почвы каштановые и южные черноземы [6, 7]. На сегодняшний день существует возможность реконструировать количество осадков и температуру по палеопочвенным параметрам. Следовательно, мы можем рассчитать индекс аридности по де Мортонну и количественно проследить тренд аридизации климата.

Магнитные свойства степных почв связаны с биоклиматическими условиями. Содержание почвенного (биогенного) магнетита является “магнитной записью”, которая сохраняет информацию об условиях окружающей среды степей. Исследование магнитных свойств и магнитной минералогии современных степных почв показало прямую зависимость прироста величины магнитной восприимчивости материала почвенного профиля относительно почвообразующей породы от среднегодового количества осадков ($R^2 > 0{,}9$). Таким образом был реализован новый подход для реконструкции количества атмосферных осадков в разные исторические и геологические эпохи по результатам изучения маг-

нитной минералогии палеопочв степей в голоцене. Это позволило количественно рассчитать величины атмосферных осадков на изучаемой территории в прошлые исторические эпохи [8, 9]. Среднегодовое значение атмосферных осадков (MAP) (степная зона европейской части России) определяется следующим уравнением:

$$MAP_MS = 86{,}4\ln(X_e - X_c) + 90{,}1,$$

где $(X_e - X_c)$ — прирост магнитной восприимчивости в результате почвообразования.

Анализ данных для различных регионов планеты и математическое моделирование данных, проведённое в последние годы Б. Махер с соавторами [10], подтвердили правомочность этого подхода к количественным реконструкциям палеоклимата для степной зоны юга Восточно-Европейской равнины (интервал осадков 300–700 мм/год). Статистическая обработка ранее собранного для современных почв степной зоны данных с целью получения эмпирических климатических зависимостей продемонстрировала связь почвенных параметров с индексом де Мартонна (коэффициент корреляции для прироста магнитной восприимчивости в почвенном профиле $R^2 = 0{,}75$; содержание гумуса в почве $R^2 = 0{,}81$).

На основе результатов исследований большого набора почв (более 300 почвенных профилей), погребённых под разновозрастными насыпями археологических памятников степей юго-востока Восточно-Европейской равнины, к настоящему времени сформировано представление о климатических изменениях, коснувшихся этого региона. Реконструкции показали, что в конце IV–I четверти III тыс. до н.э. климатические условия были ариднее современных. На рубеже III–II тыс. до н.э. отмечается наименьшая среднегодовая норма атмосферных осадков (около 300 мм/год). На I век н.э. приходился микроплювиал (около 400 мм/год, который во II–III вв. н.э. сменился очередным засушливым периодом (около 350 мм/год)). В эпоху развитого Средневековья (XII–XIV вв. н.э.) существовал климатический оптимум с максимумом увлажнённости за последние 5 тыс. лет (около 450 мм/год). Сопоставление полученных результатов для палеопочв степей европейской части России с климатическими записями для регионов Ближнего Востока свидетельствует о синхронизации глобальных планетарных климатических колебаний [4, 9].

Кроме того, в настоящее время нами продемонстрирована возможность количественной оценки палеотемператур для голоценовых палеопочв на основе почвенного геохимического индекса (PWI). Геохимический подход базируется на эмпирических зависимостях коэффициентов выветривания, связывающих изменения валового химического состава почвенной массы и её элементов с климатическими факторами (пелеоосадки — MAP, палеотемпературы — MAT) [11].

Калибровки, полученные на основании анализа современных почв различных климатических зон, выявили следующие зависимости [12]:

$$MAT = -2{,}74\ln(PWI) + 21{,}39.$$

PWI (палеопочвенный индекс выветривания) предложен и используется как показатель палеотемператур:

$$PWI = [(4{,}20Na) + (1{,}66Mg) + (5{,}54K) + (2{,}05Ca)] \cdot 100.$$

Использование предлагаемого палеопочвенного термометра для степной зоны Восточно-Европейской равнины было апробировано на палеопочвах курганных археологических памятников исследуемого региона. Полученные результаты коррелируют с изменениями палеотемператур голоцена по ледникам Гренландии и подтверждают получаемые величины градиента палеотемператур по палеопочвам (рис. 2). Мы использовали данные, полученные от наиболее известной из пробурённых в Гренландии за последние четверть века скважины GISP2 [13]. Анализ состояния ледовых кернов даёт полную картину об изменениях климата Земли и состоянии атмосферы в прошлом. Температурная кривая позволяет представить климатические ситуации в различные периоды “исторического” времени, к которому приурочены наши исследуемые объекты. Из графиков совершенно однозначно следует, что интервал 3100–3600 л.н. был весьма тёплым, но затем его сменило глобальное похолодание, продолжавшееся вплоть до начала прошлого века. Картина палеопочвенных температурных флуктуаций в отдельных случаях достаточно чётко повторяет данные температурной кривой GISP2. Для курганной группы “Калмыкия” с детальными радиоуглеродными датировками, охватывающими период от 4000 до 4500 тыс. л.н., мы наблюдаем полное повторение данных. Изменения среднегодовых осадков, как отмечалось выше, определяли для каждого почвенного профиля разновозрастных погребённых почв исследуемой территории и рассматривали в локальном контексте. Предлагаемый подход позволяет рассчитать гидротермический показатель индекс аридности по Де Мортонну и оценить количественно сдвиги границ климатических зон на про-

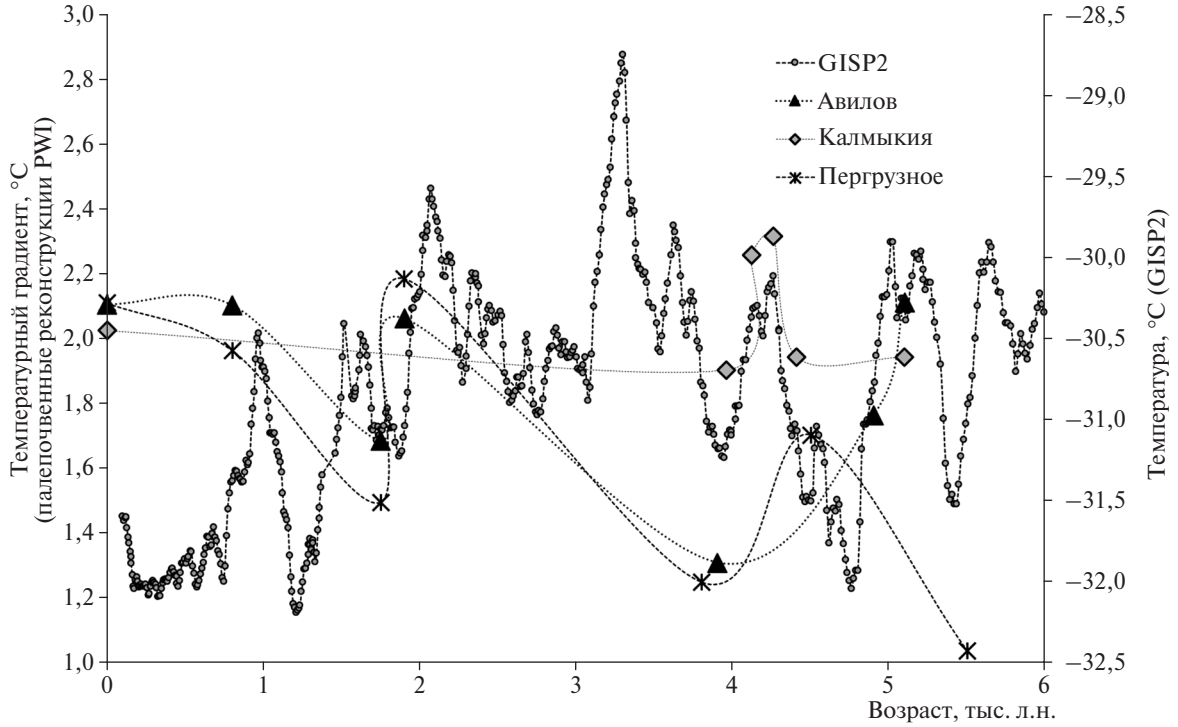

Рис. 2. Пример реконструкции палеотемператур по палеопочвенным данным для хронорядов трёх курганных групп в сравнении с палеотемпературами голоцена, реконструированными по кернам ледников Гренландии (GISP2).

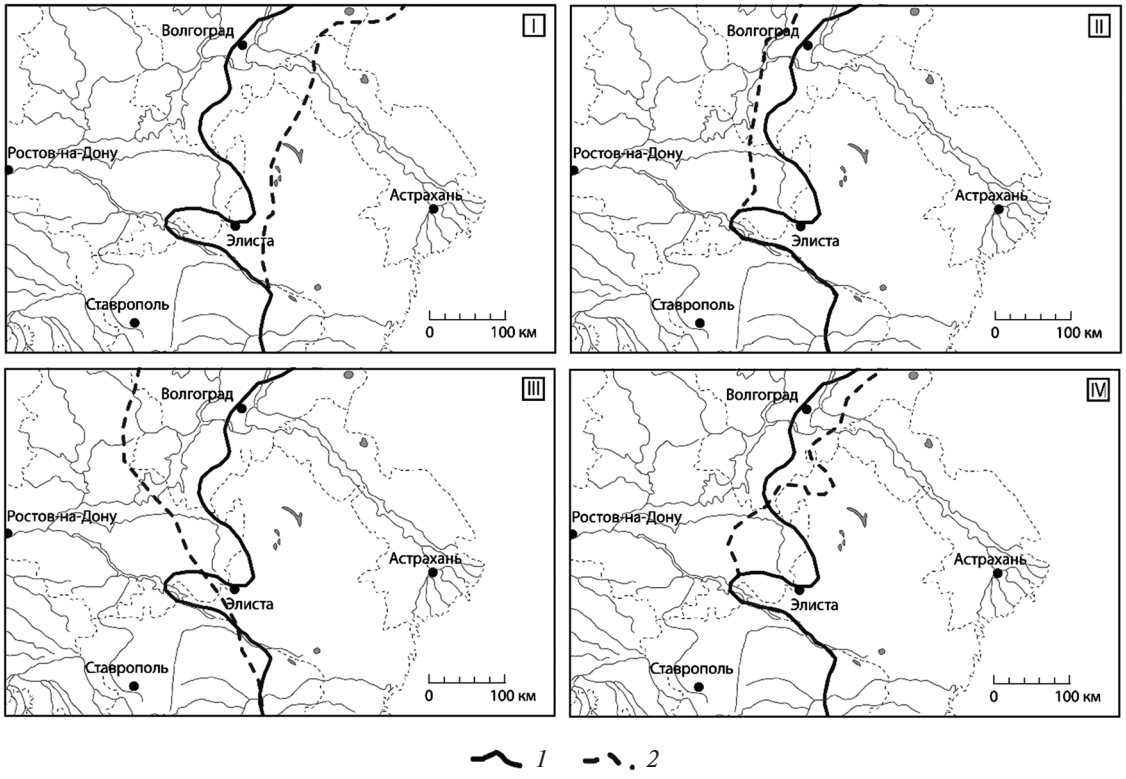

Рис. 3. Результаты ГИС-моделирования сдвига границ природных зон на юге Восточно-Европейской равнины в разные хроноинтервалы голоцена по палеопочвенным: *1* — современная граница сухостепной и пустынно-степной зоны; *2* — реконструированное положение границы, хроноинтервалы, л.н.: I — 600–700; II — 1600–1700; III — 3600–4000; IV — 5000–6000.

тяжении позднего голоцена на юге Восточно-Европейской равнины (рис. 3). Полученные результаты ГИС-моделирования демонстрирует сдвиги природной зоны с амплитудой 200–300 км.

На основании полученных данных возможно детализировать палеоэкологическую периодизацию позднего голоцена для степной и лесостепной зон Восточной Европы с определением кризисных и оптимальных условий среды обитания, ресурсной базы степей и выявлением их корреляции с культурно-историческими процессами и особенностями хозяйственной деятельности древнего населения. Результаты исследования палеопочв голоцена и палеоклиматические параметры могут также быть использованы для создания сценариев будущих изменений семиаридных степных экосистем юга России, связанных с глобальными изменениями климата и антропогенным влиянием. Ретроспективный анализ палеопочв с прогнозными целями необходимо осуществлять с учётом смены доминантов почвообразовательных факторов современности. Современное и ближайшее будущее почвообразовательного процесса в степной зоне определяется изменённым сочетанием факторов в сравнении с прошлым — мощнейшим прямым воздействием человека, определяемым сельскохозяйственным использованием почвенных ресурсов степной зоны.

Источники финансирования. Работа выполнена по теме Государственного задания № 0191–2019–048 и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18–04–00800).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Демкин В.А.*, *Рысков Я.Г.*, *Алексеев А.О.*, *Олейник С.А.*, *Губин С.В.* Палеопедологическое изучение памятников степной зоны // Изв. АН. Сер. геогр. 1989. № 6. С. 40–51.
2. *Иванов И.В.* Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 143 с.
3. *Демкин В.А.*, *Ельцов М.В.*, *Алексеев А.О.*, *Алексеева Т.В. и др.* Развитие почв Нижнего Поволжья за историческое время // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1486–1497.
4. *Алексеев А.О.*, *Алексеева Т.В.* Оксидогенез железа в почвах степной зоны. М.: Геос, 2012. 204 с.
5. *Ковда В.А.* Аридизация суши и борьба с засухой. М.: Наука, 1977. 272 с.
6. The Encyclopedia of Earth Sciences / The Encyclopedia of Climatology. V. XI / J.E. Oliver, R.W. Fairbridge Eds. N.Y.: van Nostrand Reinold, 1987. 103 p.
7. *Виноградов Б.В.* Опустынивание — проблема степной зоны России // Степ. бюл. 1999. № 3/4. С. 55–58.
8. *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 // Quatern. Sci. Revs. 2002. V. 21. P. 1571–1576.
9. *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 // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2007. V. 249. P. 103–127.
10. *Maher B.*, *Possolo A.* Statistical Models for Use of Palaeosol Magnetic Properties as Proxies of Palaeorainfall // Global and Planet. Change. 2013. V. 12. P. 280–287.
11. *Sheldon N.D.*, *Tabor N.J.* Quantitative Paleoenvironmental and Paleoclimatic Reconstruction Using Paleosols // Earth-Sci. Rev. 2009. V. 95. P. 1–52.
12. *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.
13. *Alley R.B.* GISP2 Ice Core Temperature and Accumulation Data. IGBP PAGES / World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2004–013.

SOIL PARAMETERS FOR QUANTITATIVE ESTIMATION OF LATE HOLOCENE CLIMATE CHANGES IN THE SOUTHERN EAST EUROPEAN PLAIN

Corresponding Member of the RAS A. O. Alekseev, P. I. Kalinin, T. V. Alekseeva, G. V. Mitenko

Received July 26, 2018

The results of studies of the regularities of evolution of soils and the environment in the steppe zone of the East European Plain are presented. Different culture-based chronological stages for the Bronze Age, Iron Age, and Middle Ages (3rd millennium BC–2nd millennium AD) are considered on the basis of buried soils at archeological monuments (burial mounds).

Keywords: palaeosols, palaeoclimate, Holocene, geochemistry, environmental magnetism, geostatistics, ecological modeling.