

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ В ЗОНЕ СТЕПИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЧВЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ХРОНОЛОГИИ

© 2016 г. Ф. Н. Лисецкий¹, В. Ф. Столба², П. В. Голесов¹

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Белгород, ул. Победы, 85

²Университет Орхуса, Дания, Nordre Ringgade 1, DK-8000 Aarhus C

e-mail: liset@bsu.edu.ru, klavs@cas.au.dk

Поступила в редакцию 17.03.2015 г.

С помощью геоархеологических подходов исследованы хроноряды дневных почв степной зоны для изучения их развития на протяжении последней трети голоцена в регионе с постоянной сменой этносов и хозяйственной активности (северо-западный Крым). Установлено, что в позднем голоцене возраст морфофункциональной зрелости гумусового горизонта степных черноземов (Chernozems) достигается по прошествии 1600–1800 лет, после чего у этих почв отмечается необратимое замедление развития, а содержание микроэлементов, накопленных в ходе педогенеза, достигает максимума при возрасте почв 1400 лет. Разработан и апробирован новый метод почвенно-генетической хронологии, который основан на хронофункции (математической модели) формирования необратимых результатов педогенеза во времени. С помощью оригинальных педохронологических данных и применения ростовых функций – наиболее адекватных для моделирования педогенеза за последние три тысячелетия – обоснован фундаментальный вывод о том, что закономерности развития морфологического строения почвы как органо-минерального природного тела имеют сходство с формализацией процессов роста, установленных для биологических систем.

Ключевые слова: геоархеология, хронофункции, моделирование, гумусовый горизонт, микроэлементы, степная зона

DOI: 10.7868/S0032180X16080050

ВВЕДЕНИЕ

Понимание закономерностей развития почв во времени является фундаментальной проблемой почвоведения, имеющей перспективы практического использования, так как оно открывает возможности управления этим процессом на основе принципа коэволюции природных систем и хозяйственной деятельности человека. Ключевой момент в этой задаче – разработка надежных методов датирования почв. Создание региональных моделей развития почв во времени с перспективой их интеграции в универсальные модели педогенеза до сих пор затруднены недостатком кондиционных педохронологических данных. При проведении археологических раскопок огромный потенциал эмпирических данных о датированных почвах, которые либо погребены в одно- и многослойных археологических комплексах, либо сформированы на поверхности памятников историко-культурного наследия, пока используется в недостаточной степени.

В настоящее время сформировалась самостоятельная междисциплинарная научная отрасль (дисциплина) – геоархеология, где весомое место занимает почвенное направление [62], которое (в зависимости от акцентов исследования) может

быть названо и педоархеологией (pedoarchaeology), и археологическим почвоведением (archaeological soil science, archaeopedology). Благодаря этому полевые исследования археологов и почвоведов стали проводиться во многих регионах. После первых обобщающих работ по оценке скорости почвообразования, которые были основаны преимущественно на историческом методе и радиоуглеродном датировании гумуса, в последние четыре десятилетия произошел стремительный рост количества данных за счет активного использования почвенно-археологического метода датирования и изучения эволюции почв. В отличие от первых трех десятилетий XX в. [1, 11, 12, 24, 34, 36, 39, 60] с 2000 г. и по настоящее время [7, 31, 33, 35, 40, 48] указанную закономерность подтверждает существенное увеличение количества научных публикаций.

Следует заметить, что в современной геоархеологии наибольшее внимание уделяется исследованию погребенных почв¹. Совместное изучение дневных почв на археологических памятниках и погребенных почв дополняет наши представле-

¹ Примечательно, что в работе, специально посвященной использованию почвенно-археологического метода [19], сформированные на памятниках дневные почвы не упоминаются.

ния о прошлом и настоящем, так как ретроспективный подход позволяет воссоздать условия формирования почв к моменту их погребения, а современное состояние почв мы можем раскрыть с помощью диахронного подхода [9], последовательно выявляя специфические особенности хроностадий. По прошествии 25 лет до сих пор остается справедливым мнение Геннадиева [5] о том, что в подавляющем большинстве исследования хронорядов дневных почв в той или иной форме ограничиваются качественно-информационным уровнем.

Цель работы состояла в установлении особенностей почвообразования на протяжении трех тысячелетий, используя приемы математического моделирования и датированный по историческим и археологическим данным хроноряд почв Северо-Западного Крыма в контексте ранее полученных результатов о развитии почв степной зоны полуострова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

К регионам, которые имеют многовековую этнокультурную и хозяйственную историю, что благоприятствует организации геоархеологических исследований в широком хронологическом диапазоне, относится Крымский п-ов. Большую часть региона занимает Крымская степная физико-географическая провинция, в составе которой находятся Тарханкутский (на западе) (рис. 1) и Керченский п-ова (на востоке). В античный период истории Северного Причерноморья (VI в. до н. э. – IV в. н. э.) территории этих полуостровов, входивших географически в состав Скифии, активно заселяли и осваивали греки.

В ландшафтном отношении регион относится к сухой степи. Климат умеренно жаркий с мягкой зимой, засушливый и характеризуется значительными тепловыми ресурсами (безморозный период составляет 170–220 дней, сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) превышает $3300\text{--}3500^{\circ}\text{C}$), за год выпадает 360–440 мм осадков. По сравнению с центральной и восточной частями крымской степи Тарханкутская возвышенная степь отличается более теплой зимой, годовые и суточные амплитуды температур здесь меньше, а погода внутри сезонов более стабильна (из-за близости к морю и удаленности от гор) [21].

Согласно карте распределения климатических затрат энергии на почвообразование (по формуле [4]), в равнинном Крыму ее величина изменяется от 800–900 (в приморских зонах) до 1200 МДж/м^2 в год (в центре) [16]. На территории Крымского п-ова доля почв, сформированных на плотных породах и их делювии, составляет 33.7% от всей площади. В Северо-Западном Крыму доминируют черноземы и дерново-карбонатные почвы на элювии карбонатных пород, а также черноземы



Рис. 1. Регион геоархеологических исследований (Тарханкутский п-ов): 1 – почвы на датированных памятниках; 2 – целинные почвы; 3 – антропогенные земляные валы.

на лёссовых породах. Как правило, в карбонатных черноземах содержание CaO в гумусовом профиле не превышает 28%, тогда как в дерново-карбонатных почвах оно может достигать 30–37%. В соответствии с первой почвенной картой с обновленной легендой ФАО [32] здесь доминируют Calcic Chernozems и только на западе и юге Тарханкутского п-ова выделяют Calcic Phaeozems. Широко распространены каменистые степи, которые на 63% распаханы.

Исследования разновозрастных почв проводились в геоархеологических экспедициях 2011–2012 гг. и основывались, прежде всего, на выборе памятников, которые надежно датированы археологическими методами, а также задержанных поверхностей с историческими датами XIV–XX вв. (жилые и хозяйственные постройки, окопы и др.). Кроме того, в составе археологических комплексов изучались почвы на антропогенных насыпях без артефактов.

Помимо упорядоченности педохронологических данных по шкале абсолютного времени, хорошей полноты в обеспеченности всех хронозон, необходимо также соблюсти принцип единственного различия – разновременные почвы должны быть на автономных позициях рельефа, иметь близкий тип материнской породы и растительного покрова, находиться в сходных условиях мезоклимата. Это определяет необходимость проведения региональных исследований на разновременных археологических памятниках для получения педохронологических данных в объеме, позволяющем провести статистическую обработку. Используя предложенную структуру описаний профилей новообразованных почв для наполнения базы почвенно-хронологических данных [3], по 24 объектам геоархеологических исследований на

северо-западе Крыма сформировали массив эмпирических данных для целей моделирования. Для сравнения использовали ранее полученные результаты по другим районам степной зоны Крыма [14, 16].

Статистическое обоснование хронофункций зависимости мощности гумусового горизонта черноземов от времени почвообразования производили по результатам педохронологических исследований в антропогенно-нарушенных ландшафтах с датированным началом почвообразования. Естественную вариабельность данного морфологического признака почв учитывали путем создания для каждого объекта выборок значений (как правило, $n \geq 30$). Выборки обрабатывали средствами описательной статистики с расчетом доверительного интервала индивидуальных значений ($P = 0.95$).

Цвет почвы в сухом состоянии представлен по шкале Манселла [49]. Химические свойства почв определяли общепринятыми методами: содержание органического углерода по Тюрину, фракционный анализ гумуса по Пономаревой–Плотниковой, валовое содержание азота по Кьельдалю, подвижные P_2O_5 и K_2O по Мачигину, обменные основания, рН водной вытяжки, CO_2 по государственным стандартам. Геохимические особенности почв исследовали с помощью валового анализа на XRF-спектрометре. Ранее предложенный Шоу [54] коэффициент аккумуляции микроэлементов (R_n) был модифицирован: предложен расчет отношений содержания микроэлементов в почве (S_i) и материнской породе (P_i) с помощью среднегеометрического:

$$R_n = \sqrt[n]{\prod \frac{S_i}{P_i}}$$

В кластерном анализе почв археологических памятников использовали метод Уорда, в качестве меры объединения в кластеры – квадрат Евклидова расстояния.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обоснование адекватных моделей развития почв во времени. Для количественной оценки, сравнительного анализа, использования в прогнозных моделях необходимо математическое описание почвенных характеристик (зависимостей свойства от воздействующего фактора) [23]. Состояние почвенной системы можно определить либо через входные воздействия и выходные сигналы (факторы почвообразования – свойства), либо через макропараметры системы (скорость, ускорение). Исследование хронорядов почв путем разработки трендовой модели процесса формирования гумусового горизонта позволяет рассчитать характерные времена

и скорости процесса для отдельных этапов развития почвенного профиля [15].

Использование почвенно-археологического метода получает значительные преимущества в точности оценок и надежности интерпретации, если изучают не отдельные разновременные почвы, а хроноряды дневных и погребенных почв.

Постулат В.В. Докучаева о почве как функции пяти факторов почвообразования, сформулированный в 1883 г., математически формализован в 1927 г. Захаровым [10] и, как было убедительно аргументировано в работе [22], широко известная из работы Йенни [41] формула Захарова имеет вид:

$$S = f(cl, o, r, p, t, \dots), \quad (1)$$

где S – почва или ее свойства; cl – климат; o – организмы; r – топография; p – материнская порода; t – возраст.

Концепция хронорядов была разработана Йенни [41], который представил ее в виде формализованной записи:

$$S = f(T_{cl, o, r, p, \dots}), \quad (2)$$

где T – время, по которому формируется хроноряд почв.

Перечень факторов открыт для дополнений. Последующие совершенствования почвенно-факториальных моделей показывают [30] все большую их комплексность в эволюционном, ландшафтном и экологическом аспектах.

В уравнении (2) Йенни показал, что для корректного применения концепции хронорядов важно соблюсти принцип единственного различия, предполагающего относительное постоянство факторов почвообразования на разновозрастных поверхностях. Независимость факторов от времени, как это отражает уравнение (2), относительна. Предложение [44] рассматривать группу пространственных факторов почвообразования, обособляя постоянно меняющиеся факторы (cl и o) и позиционные факторы (p и r), чтобы провести соответствующую модернизацию уравнения (1), имеет свои резоны. Таким образом, используя уравнение из работы [44] с некоторыми дополнениями, полное изменение почвенного профиля за период педогенеза $t = t_n - t_0$ (где t_n – текущее время и t_0 – время начала почвообразования) можно выразить как

$$S = \int_{t_0}^{t_n} f[cl(t), o(t), h(t)] dt \Big|_{p(t), r(t)}, \quad (3)$$

где $h(t)$ – хозяйственная деятельность человека, связанная, прежде всего, с использованием биологических и земельных ресурсов (выжиганием растительности, сенокосением, пастбищной нагрузкой, распашкой земель, ирригацией, внесением удобрений и мелиорантов и др.).

Справедливо отмечено [51], что основные факторы почвообразования разнозначимы, и сила их воздействия на педогенез меняется в зависимости от возраста и стадии почвенного развития.

В своем более позднем уточнении [56, с. 339] Йенни различает понятия “хроноряд”, когда речь идет о связи почвенных свойств с относительным возрастом, и “хронофункция”, когда почвенные свойства и абсолютный возраст могут быть выражены количественно. Возможности почвенно-археологического метода позволяют эффективно, особенно для второй половины голоцена, применять хронофункции дневных и погребенных почв.

Первоначально хронофункции представляли в виде графиков, которые отражали характер изменения почвенных свойств во времени, то есть больше на качественном, гипотетическом уровне. Позже были предприняты попытки установить количественные зависимости изменения морфологии и свойств почв от их возраста, используя эмпирические педохронологические данные [26, 27, 29, 37, 38, 42, 52, 61, 63].

Выполненный обзор 100-летнего опыта формализации почвенных концепций в виде почвенно-факториальных моделей [30] показал, что среди трех выделяемых здесь групп (качественных, количественно-эмпирических и количественно-механистических) все еще с большим преимуществом доминируют качественные модели. В другом обзоре [44] более 20 наиболее известных моделей классифицированы на четыре группы в зависимости от особенностей учета фактора времени, они носят теоретико-методологический характер. Многие из этих моделей представлены как дифференциальные уравнения или в виде интегралов. Дальнейшее их применение в любом случае требует численных решений с использованием региональных коэффициентов или дальнейшей доработки на основе статистически обоснованного массива эмпирических данных.

Анализ подходов в части разработки хронофункций процессов формирования гумусового горизонта и гумусонакопления показывает, что для разных выборок опробованы регрессионные модели различного типа: линейные, степенные, логарифмические, двойные логарифмические, параболические второй степени, полиномы третьего порядка, экспоненциальные, логистические и др. функции. Примечательно, что, как правило, относительно простые уравнения аппроксимации оказываются достаточными, если количество педохронологических данных ограничено. Анализ уравнений разного типа [25, 28, 37, 47] для подбора адекватных хронофункций показал, что при рассмотрении длительных периодов педогенеза на основе хорошего эмпириче-

ского обеспечения наилучшие результаты дает использование нелинейных функций.

При этом важно отметить, что еще в 1883 г. В.В. Докучаев предполагал, что “скорость увеличения толщины чернозема не может быть пропорциональна времени..., возрастание мощности почв идет не равномерно, а замедляющимся образом” [8, с. 390].

Принципиальное заключение, которое во многом резюмирует различные варианты моделирования, сформулировано в работе [37]: развитие почв в длительном масштабе времени имеет характер, при котором с возрастом скорость почвообразования замедляется, и поэтому основная тенденция временного ряда должна иметь логарифмический или экспоненциальный вид. Использование различных нелинейных функций не только способно улучшить подбор адекватных типов хронофункций, но и продвигает наше понимание того, как происходит становление почвенной системы [53]. Логике процесса формирования гумусового горизонта на начальном этапе педогенеза может соответствовать модель, которая отражала бы постепенное возрастание скорости почвообразования (пропорционально увеличению поступления органического вещества (ОВ) в субстрат по мере развития фитоценоза, увеличения биоразнообразия в почве). Затем, после достижения максимума, модель должна отражать постепенное снижение скорости почвообразования, так как устанавливается баланс ОВ в зоне максимального освоения субстрата почвенной биотой. Таким образом, приходим к важному выводу: поиск адекватных хронофункций перспективно искать в семействе S-образных моделей роста, хорошо разработанных для решения задач биологии и экологии. Исходя из теоретического предположения, что закономерности развития почвы должны сохраняться на всех его этапах, логически обоснованным будет выбор функции Гомперца [35]. Использование уравнения Гомперца позволяет выделить ключевые фазы роста гумусового горизонта, благодаря наличию критических точек, соответствующих: T1 – максимальному ускорению роста, T2 – максимальной скорости роста (период зрелости), T3 – минимальному ускорению роста. Хроноинтервалу T1–T3 отвечает период характерного времени роста.

Хронофункции изменения мощности гумусового горизонта черноземов. Предыдущие исследования процесса почвообразования в Крыму [16] показали, что период резкого уменьшения скоростей процессов, как формирования гумусового профиля, так и гумусонакопления, наблюдается после достижения почвами возраста 1100–1200 лет. В целом развитие гумусового горизонта (*h*) крымских почв характеризуется быстрым достижением квазиравновесного со-

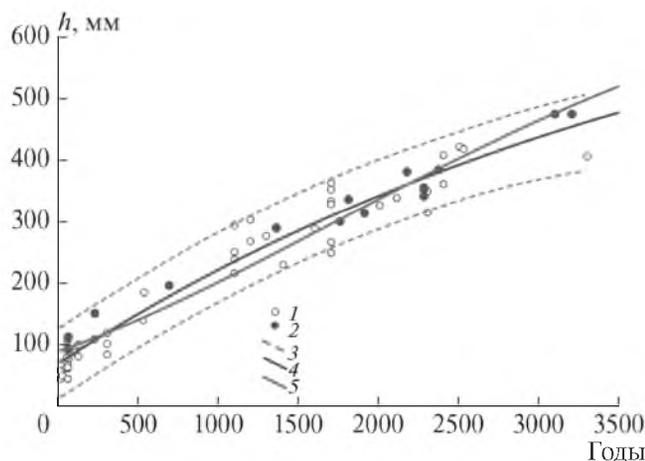


Рис. 2. Хронофункции изменения мощности гумусового горизонта черноземов на породах суглинистого гранулометрического состава за 3500 лет: эмпирические данные получены авторами в ходе геоархеологических исследований на датированных памятниках: 1 – степной Крым; 2 – Тарханкутский п-ов; 3 – доверительные интервалы ($P = 0.95$); два типа уравнений, с помощью которых моделируется процесс $h = f(t)$: 4 – Йенни (экспоненциальная) функция; 5 – Гомперца (двойная экспоненциальная) функция.

стояния (по гумусированности). Объяснением этому может служить специфика климатических условий Крыма: в связи с продолжительным безморозным периодом и усвоением почвами атмосферных осадков на 73–88% от годовой суммы хорошо проявляется высокая подвижность новообразованного ОВ по профилю почвы при интенсивном ее промачивании в периоды с низким испарением.

Путем сопоставления средних скоростей формирования гумусового горизонта (Δh) на позднеголоценовом этапе развития крымских почв показано [45], что черноземы южные и темно-каштановые почвы формируют одну эволюционную группу почв и по значениям показателя Δh возглавляют ранжированный ряд зональных почв: черноземы южные и темно-каштановые почвы – бурые горно-лесные почвы – коричневые щебнистые почвы.

Для почвенно-климатических условий Степного Крыма получены данные о морфологии и свойствах новообразованных почв на датированных археологических памятниках (табл. 1). Разработка хронофункций проведена для двух параметров: количественного – мощности гор. А + АВ (h), легко измеряемой в полевых исследованиях, включая археологические раскопки, и качественного – валового состава почвы, который определяется при небольших трудовых затратах. Выбор не только гор. А, но и верхнего переходного (АВ) обусловлен тем, что первый развивается намного быстрее, и при использовании для датирования

почв только его мощности заведомо сужаются хронологические рамки применимости педохронологического подхода.

По педохронологическим данным на рис. 2 можно получить два типа хронофункций зависимости мощности гумусового горизонта (h , мм) от времени почвообразования (t , годы), которые описывают изменение данного морфологического признака в хроноинтервале $t = n \times 10^2 - n \times 10^3$ лет:

экспоненциальную:

$$h = 800(1 - 0.913e^{-0.000234t}), \quad r = 0.98, \quad (4)$$

и функцию Гомперца:

$$h = 800e^{-e^{(0.785 - 0.000466t)}}, \quad r = 0.97. \quad (5)$$

Уравнения (4)–(5) описывают процесс, который протекает при минимальном влиянии нарушающих факторов, то есть когда поверхность формирующейся почвы находится в условиях, где ограничено удаление или привнос твердого вещества.

Следует отметить, что в пределах доверительных интервалов можно определить семейство кривых, которые отражают внутрорегиональные различия. Для северо-западной части крымских степей (Тарханкутского п-ва) из-за более благоприятных условий климата, чем на остальной части степного Крыма, почвообразование протекает с несколько большими скоростями (рис. 2). Однако следует заметить, что частные модели педогенеза в степной зоне будут подчиняться той же закономерности, которая определяется графическим видом моделей типа (4)–(5).

Сопоставление расчетных значений по моделям (4)–(5) по критерию Колмогорова–Смирнова [43] показало, что модели Йенни и Гомперца дают результаты с несущественной разницей ($P = 0.95$).

Анализ математических функций, аппроксимирующих направленность формирования генетических признаков почвы, позволяет выявить диахронические закономерности педогенеза. Особенно ценную в педогенетическом отношении информацию дает анализ функции Гомперца [35]. Ее особенностью является наличие трех критических точек, обозначающих “переломные” моменты в динамике ростовых процессов. Их определение основано на вычислении первой и второй производных функций (соответственно скорости и ускорения роста).

На рис. 3 представлены вариативные характеристики хроноряда зависимости мощности гумусового горизонта черноземов от времени почвообразования, иллюстрирующие размах варьирования индивидуальных значений по отдельным хроноинтервалам. Из анализа графика, аппроксимируемого полиномиальной функцией, а также средних интервальных значений, следует об-

ший вывод о постепенном замедлении формирования гумусового горизонта во времени.

Для почв изучаемого района установлено, что в первые десятилетия наблюдается максимальная скорость почвообразования (2–4 мм/год). В последующую фазу, завершение которой на оси внутреннего времени определено положением критической точки T2 функции Гомперца (1252 г.), почва достигает возраста зрелости, после которого скорости почвообразования уже необратимо замедляются, если почвообразовательный потенциал среды меняется на уровне флуктуаций. А по координате точки T3 определен временной рубеж, когда отмечается минимальное ускорение роста – 3750 лет (при достижении почвой мощности 546 мм). Таким образом, для черноземов степной зоны продолжительность основной фазы роста оценивается в 3650–3700 лет.

В условиях степи субатлантический период (*cal* 2.8 тыс. лет) характеризовался такими доминирующими процессами, как выщелачивание и гумусонакопление [2]. Анализ результатов моделирования показывает, что в относительно однородной климатической обстановке последней трети голоцена возраст морфофункциональной зрелости гумусового горизонта степных почв достигается по прошествии 1600–1800 лет (с учетом погрешности модели), после чего начинается процесс с отрицательным ускорением роста, описываемый уравнением Гомперца.

Педохронологический метод датирования почв. Первым, кто обратился к проблеме развития почв с помощью археологической датировки курганов, был Рупрехт в 1866 г. [18]. Позже (в 1914 г.) метод сравнения гумусовых горизонтов палеопочв для датировки курганов использовал Городцов [6]. Если в результате геоархеологических исследований будут разработаны надежные хронофункции изменения необратимых генетических почвенных свойств от времени, то может быть решена обратная задача – датирование почв, сформированных на антропогенных сооружениях [59].

В общем виде, из хронофункции типа (4) можно получить выражение для почвенно-хронологической датировки поверхностей археологических памятников:

$$t = -\frac{\ln(1 - h/h_{lim}) + k}{\lambda}, \quad (6)$$

где h_{lim} – предельная мощность гумусового горизонта; k характеризует начальные условия роста h ; λ – эмпирический коэффициент нелинейной регрессии, который имеет размерность, обратную времени (1/год).

Объективно существующее варьирование мощности h на археологических памятниках не может обеспечить достоверность датировок луч-

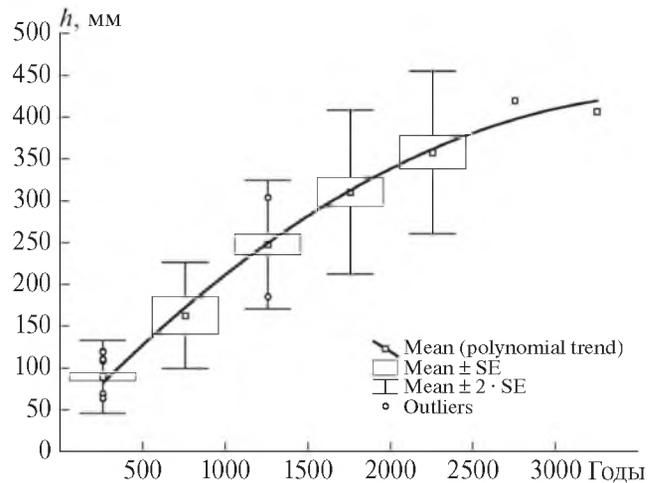


Рис. 3. Статистические характеристики хроноряда зависимости мощности гумусового горизонта от возраста почв.

ше, чем ± 52 года при $\alpha = 0.05$, чем ± 68 лет при $\alpha = 0.01$, чем ± 87 лет при $\alpha = 0.001$. Использование расчетного почвенно-археологического метода датирования по уравнению (6) позволяет получить наиболее точные датировки археологических объектов в диапазоне от VII в. до н. э. до XV в. н. э. При корректном использовании этот метод может превосходить по точности более затратные аналитические методы. Это связано с тем, что морфологическое строение почв – это всегда вновь приобретенный признак, а функциональные признаки, включая содержание и возраст ОВ, могут быть унаследованы от почвообразующей породы (особенно если имеем дело с культурными слоями). Спецификой метода является то, что он дает хронологическую информацию о времени прекращения трансформирующей деятельности человека на конкретном объекте.

Применительно к району наших исследований для расчета возраста поверхностей археологических памятников раннего железа (с момента начала почвообразования на них) уравнение (6) можно представить в более упрощенном виде:

$$t = \frac{\ln(1 - h/800) + 0.156645}{-0.000190775} = (-5241.777 \ln(1 - 0.00125h) - 821.098) + \tau, \quad (7)$$

где τ – экспертная оценка инициального периода освоения пионерными растительными группировками нового экспонированного субстрата (в нашем случае, не более 4 лет).

Наиболее достоверные результаты датирования по уравнению (6) могут быть получены для почв возрастом от 200 до 2500 лет. Верификацию педохронологического метода проводили на двух опорных античных поселениях района исследо-

Таблица 1. Химические свойства датированных почв и их зональных аналогов в пределах Тарханкутского полуострова

№ (рис. 1)	Археологический (исторический) памятник	Датировка почвы, годы (века)	Глубина, см	Цвет почвы (по Манселлу)	pH H ₂ O	Гумус	CaCO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Обменные катионы, сМоль(экв)/кг		
						%		мг/кг		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Дерново-карбонатные почвы, целина												
S1	—	Голоцен	0–36	10YR 5/3	8.4	4.2	36.1	5.2	170.7	18.50	2.68	0.28
			36–48	10YR 5/2	8.4	3.6	49.9	5.0	185.1	16.73	3.20	0.40
Дерново-карбонатные почвы (Calcaric Phaeozems), целина												
S2	—	Голоцен	0–24	10YR 7/3	8.3	3.4	59.5	11.7	458.4	10.20	2.20	0.80
			24–32	10YR 6/6	8.6	3.0	60.9	6.2	615.6	5.90	2.00	2.00
Молодые почвы												
S3	Земляное покрытие ангара	47	0–11	10YR 6/5	8.3	8.2	39.1	31.2	706.5	13.90	1.55	0.60
S4	Окоп	68	0–9.3	10YR 5/3	8.6	4.6	14.5	20.3	526.3	16.67	1.92	0.68
S5	Окоп	68	0–12	10YR 7/3	8.7	3.7	70.4	8.3	411.6	9.51	1.46	0.60
Черноземные почвы на рыхлых породах												
S6	Некрополь	XIV в.	0–20	10YR 5/3	8.0	6.9	7.0	5.5	849.6	23.10	5.40	0.55
S7	Кельшейх-1, раскоп	Около 270 г. до н.э.	0–18	10YR 4/2	8.2	7.5	12.8	13.6	402.6	21.55	1.70	0.60
			18–43	10YR 4/2	8.5	5.9	17.0	12.1	285.4	20.23	1.28	0.60
R1	Кельшейх-1, земляной вал	Около 300 г. до н.э.	0–24	10YR 5/3	8.1	5.7	5.8	0.9	258.0	24.15	5.20	0.60
			24–46	10YR 5/2	8.0	6.2	4.4	0.3	248.0	25.99	4.95	0.60
			[A + AB], 46–50	10YR 5/2	8.2	5.5	5.4	0	167.6	23.51	3.00	0.60
S8	Панское I	IV – 270 г. до н.э.	0–21	10YR 4/2	8.1	4.2	22.4	12.2	755.8	12.20	1.20	0.20
S9	Поселение S11-029	Около 270 г. до н.э.	21–34.5	10YR 4/2	8.1	3.4	19.2	12.8	568.4	12.80	1.60	0.30
			0–28	10YR 5/3	8.4	6.1	16.6	11.7	499.9	16.29	1.58	0.90
R3	Насыпь над зерновой ямой	Около 270 г. до н.э.	0–13	10YR 5/3	8.3	5.4	3.2	1.6	228.4	23.62	2.97	0.95
			13–33	10YR 5/2	8.4	5.0	0.7	0.8	184.5	25.18	2.83	0.95
			33–48	10YR 5/4	8.3	5.4	3.2	1.6	228.4	20.84	3.86	0.80
S10	Ак-Сарай	I в. н.э.	0–14	10YR 5/2	8.0	7.7	10.0	62.3	1813.0	19.53	10.80	0.60

Таблица 1. Окончание

№ (рис. 1)	Археологический (исторический) памятник	Датировка почвы, годы (века)	Глубина, см	Цвет почвы (по Манселлу)	pH H ₂ O	Гумус	CaCO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Обменные катионы, смоль(экв)/кг		
						%		мг/кг	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
S11	Джангуль	IV в. до н.э.	14–34	10YR 5/2	8.1	6.1	12.1	64.7	1363.5	20.17	5.10	0.70
			0–20	10YR 5/3	7.9	8.7	36.4	8.1	737.2	19.71	3.60	0.60
			20–38	10YR 5/3	8.0	6.0	43.9	1.8	473.6	18.47	2.55	0.50
Дерново-карбонатные почвы												
S12	Калос Лимен	III в.	0–22.5	10YR 6/2	8.8	7.1	45.6	167.6	1061.8	11.03	2.92	0.68
S13	Караджинское городище	III в.	0–7	10YR 6/2	8.4	9.6	34.6	215.7	1119.5	14.91	1.40	0.60
			7–21	10YR 6/2	8.3	6.3	34.2	143.4	1213.0	14.18	1.49	0.70
R2	Межевой вал	270 г. до н.э.	0–20.5	10YR 6/3.5	8.5	4.5	31.0	14.0	423.6	16.98	1.37	0.60
			20.5–51	10YR 5/3.5	8.6	3.8	27.0	6.6	299.1	16.46	1.70	0.60
S14	Кельшейх-1, здание H2	Около 270 г. до н.э.	0–25	10YR 3/2	8.3	9.0	6.3	8.9	615.9	24.74	3.06	1.00
			25–35	10YR 3/2	8.0	5.4	13.8	2.7	405.2	24.83	2.64	1.00
			35–47	10YR 5/2	8.0	4.8	16.5	1.3	355.2	24.09	3.39	1.00
S15	Поселение S11-029	270 г. до н.э.	0–27	10YR 5/3	8.4	6.6	23.6	12.4	310.5	19.89	1.92	0.90
Почвы на зольниках												
S16	Калос Лимен	I в.	0–22	10YR 6/2	8.9	4.9	37.5	167.1	1015.3	9.62	2.97	1.30
S17	Кунан	II в. до н.э.	0–19	10YR 5/2	7.9	9.1	34.7	225.6	2108.3	23.28	6.00	0.50
			19–38	10YR 5/1	8.1	7.1	18.9	278.4	1547.3	21.45	5.40	0.60
S18	Поселение S11-022 (Черноморское)	XV–XII вв. до н.э.	0–18	10YR 5/2	8.2	8.4	9.1	103.9	455.2	24.35	2.50	0.45
			18–50	10YR 6/2	8.2	6.5	12.8	139.0	609.9	21.62	1.70	0.70
Интразональные (засоленные) почвы												
S19	Ярылгач-2	VII–IX вв.	0–15.2	10YR 5/3	9.0	3.0	27.7	4.7	1237.3	4.70	8.70	9.70
			0–21.8	10YR 5/3	9.3	1.6	38.1	2.3	1084.8	2.30	2.90	10.6
S20	Пос. на м. Ойрат	XVIII в.	0–17	10YR 6/2	8.9	3.3	35.8	7.3	1644.8	7.30	3.20	5.30

Таблица 2. Почвенные характеристики на границе перехода от новообразованной к погребенной почве (вал на поселении Кельшейх, начало III в. до н. э.)

Параметр	Горизонт, глубина отбора, см	
	A, 34–37	[A + AB], 37–40
Цвет (по Манселлу)	10YR 4/2	10YR 5/2
C общ, %	2.22	1.66
N, %	0.27	0.19
C/N	8.3	8.9
C гк	19.14	10.79
C фк	40.54	34.17
C гк/C фк	0.5	0.3
Негидролизуемый остаток	59.46	65.83
ГК 2	5.85	0.55
ФК 2	6.54	4.83
Тип гумуса	Гуматно-фульватный	Очень фульватный

ваний: Панское I и Кельшейх-1, окончание жизнедеятельности на которых датируется по данным археологии [57, 58] около 270 г. до н. э.

По двум выборкам данных о мощности h на археологических памятниках ($n = 26$) различия в почвах несущественны: $H \pm t_{0.5} S_x = 358 (355 \div 360)$ и $356 (352 \div 360)$ соответственно. Используя формулу (7), по калиброванной кривой для условий Тарханкутского п-ва получаем дату 2269–2293 лет, то есть 260–280 лет до н. э.

В ходе геоархеологических исследований изучены также объекты без артефактов: земляной вал на поселении Кельшейх-1 (R1) и система межевых валов в 14 км к западу от него (R2–3). Современные параметры межевых валов: ширина у основания – 3.7 м, относительная высота – 16–17 см. Первый межевой вал (R2) располагается на пологом склоне древнего суходола, а по замыслу кадастровой системы его вероятное продолжение (R3) отчетливо прослеживается на останце, который обособлен двумя древними эрозионными врезам, достигшими уровня известняковой плиты. То есть уже априорно можно было сказать, что вал R3 никак не мог быть создан в земледельческий период (XVIII–XX вв.), а имеет более ранний возраст. На межевом валу R2 новообразованная почва имеет несколько большую мощность, чем на культурных слоях поселений (на 1.4–2.1 см), а участок вала в эрозионно опасной позиции меньшую (на 4 см).

Используя уравнение (7), вал R1 датируется первой половиной III в. до н. э., вал R2 – второй половиной IV в. до н. э. Таким образом, сооружение межевых валов с поправками на эти локальные особенности может быть уверенно

отнесено ко времени не позднее рубежа IV–III вв. до н. э.

При датировании почв, которые сформировались на гумусированной насыпи, следует учитывать важное обстоятельство. Такие формы микро-рельефа, как земляные валики систем межевания, претерпевали в той и иной мере денудационное выравнивание. С другой стороны, аппликативное почвообразование, при котором развитие нового почвенного профиля в толще старого происходит без его стирания, способствует формированию большей мощности гумусового горизонта, чем при рецентном почвообразовании (на культурных слоях археологических памятников). Это можно объяснить тем, что аппликативный профиль наследует преобразование материнской породы почвой-предшественником, “экономит” время на погружение вниз по профилю геохимических барьеров (карбонатного прежде всего) и развивается в системе существующих пор биологического происхождения. Конечно, оба эти процесса (денудация и регенерация почвы) разнонаправлены и в определенной мере могут быть сбалансированы, но в разных условиях по-разному.

Поэтому при датировании почв, которые сформировались на гумусированной насыпи, необходимо вводить поправки. Они связаны с дополнением морфологических исследований, которые осуществимы в полевых условиях, химико-аналитическими данными. Общая мощность гумусированного слоя на вершине вала (то есть новообразованная почва и погребенная перемещенная смесь почвенного материала) колеблется от 36 до 47.5 см. В полевых условиях отделить новообразованную почву трудно, и только при детальнейшем изучении перехода в цвете, структуре, ориентации педов можно провести границу, ниже которой находится исходная насыпь. Если сравнивать почвы в сухом состоянии, то нижняя часть новообразованного слоя и верхняя часть гумусированного материала насыпи отличаются по окраске на половину или одну градацию по шкале Манселла: обычно нижний слой молодой почвы на половину или одну градации оттенка (*chroma*) больше, то есть он более желтоват, или на одну градацию яркости (*value*) больше: он более сероват.

Слои толщиной 3 см выше и ниже морфологически выявляемой границы новообразованной почвы и погребенного материала насыпи имеют ясные различия по содержанию азота, ОВ и его качественному составу (табл. 2). Расчет по уравнению (6) позволяет датировать эту границу серединой III в. до н. э.

По целому ряду химических показателей погребенная почва насыпи [A + AB] отличается от новообразованной почвы (гор. A + AB) (табл. 3): содержание нерастворимого осадка в 1.5 раза больше, что характерно для погребенной почвы,

Таблица 3. Почвенные характеристики новообразованной почвы и погребенной под валом в начале III в. до н. э.

Параметр	Горизонт, глубина отбора (см)		
	A, 0–24	AB, 24–46	[A + AB], 46–50
Цвет (по Манселлу)	10YR 5/3	10YR 5/2	10YR 5/2.5
C общ, %	0.92	1.76	1.26
C/N	5.1	13.2	5.4
C гк	21.52	19.38	4.21
C фк	30.54	25.23	18.49
C гк/Сфк	0.7	0.8	0.2
Негидролизующий остаток	47.94	55.39	77.30
ГК 2	7.94	3.98	0.08
ГК 3	11.30	14.66	2.86
ФК 2	9.35	8.24	0.71
Тип гумуса	Фульватный	Гуматно-фульватный	Чисто фульватный
CaCO ₃ , %	5.8	4.4	5.4
SiO ₂ , %	49.66	46.97	43.47
CaO, %	5.23	5.16	8.03
Sr, мг/кг	125	139	144
pH H ₂ O	8.1	8.0	8.2
K ₂ O, мг/кг	258	248	168
P ₂ O ₅ , мг/кг	0.9	0.3	0

несколько больше содержание Са и связанного с ним Sr, меньше содержание фульвокислот, а особенно гуминовых кислот. Тип гумуса чисто фульватный при высоком обогащении гумуса азотом. Следующие три фракции состава гумуса содержатся в погребенной почве в меньшем количестве, чем у современной дневной почвы: связанные друг с другом и в основном с кальцием (ФК 2, ГК 2) и R₂O₃ (ГК 3).

Особенности химических и геохимических показателей новообразованных почв археологических ландшафтов. Помимо морфологического строения со временем у почвы меняются многие свойства. Для повышения надежности датирования по мощности гумусового горизонта новообразованных почв необходимо эти оценки подкрепить данными о хронологически зависимых свойствах.

Почвы раннего железного века, которые формировались на элювии карбонатных пород, отличаются щелочной реакцией (8.5–8.8 при норме (целинные почвы) 8.3–8.4), содержание С орг у них на 2% больше, чем на целине [46], достигая в среднем 4.2%. В гор. А и АВ содержание Р₂O₅ относительно невелико – 3–14 мг/кг, что близко диапазону в целинных почвах – 5–12 мг/кг. Обеспеченность пахотных дерново-карбонатных почв Тарханкута подвижными фосфатами оценивает-

ся как очень низкая – 4.0 ± 2.0 мг/кг [17]. В отличие от фосфора содержание К₂O в новообразованных почвах значительно – 401 ± 122 мг/кг (обеспеченность обменным калием высокая) и мало зависит от возраста почвы, тогда как в почвах целины отмечен широкий диапазон содержания К₂O – 171–458 мг/кг. Для сравнения, в пахотных дерново-карбонатных почвах обменного калия в слое 0–30 см содержится 156 мг/кг [17].

Почвы раннего железного века, формирование которых проходило на породах суглинистого состава, в среднем содержат в гумусовом горизонте 3.5% С орг, 11.8 мг/кг Р₂O₅ и особенно много К₂O в гор. А – 577 мг/кг (у полноголоценовых почв – 300–390 мг/кг).

В Крыму особым типом почвообразующей породы, созданной исключительно хозяйственной деятельностью человека, является зола, которая формирует основу культурного слоя некоторых поселений или их функциональных зон, причем как эпохи бронзы, так и раннего железного века. По своему химическому составу зола более сходна с лёссовидными суглинками, чем с элювием известняков. Но по сравнению с суглинками, зола содержит больше Sr (на 68 мг/кг), Zn и Pb и меньше Mn, Cu, V, Сг. Почвы археологических памятников, сформированные на золистом субстрате, обладают совершенно специфическими свойствами: содержание С орг в гор. А достигает

4.6–5.2%, P_2O_5 и K_2O в гумусовом профиле – 171 и 1162 мг/кг соответственно, в почвенном поглощающем комплексе отмечена не только высокая доля Ca^{2+} , но и Mg^{2+} .

При сравнении двух доминирующих типов почвообразующих пород Тарханкута установлено, что суглинки, обычно среднего и тяжелого гранулометрического состава, устойчиво отличаются от элювия известняка более значительной аккумуляцией Mn, Sr, Zn, Cu, Ni, Cr, Si, Pb и Co (элементы расположены в порядке убывания их концентраций). Элювий по сравнению с суглинками более обогащен кальцием (в среднем на 10%).

Почвы раннего железного века, которые встречаются в пределах археологических памятников на обоих указанных типах почвообразующих пород, также имеют существенные различия в валовом химическом составе. Поэтому коэффициент R_n для почв, которые формировались на культурных слоях суглинистого состава, рассчитан по девяти наиболее информативным элементам (Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Si, Co, P и K), а для почв на элювии карбонатных пород – по шести (Mn, Zn, Pb, Ca, P и K).

Для почв археологических памятников кластерный анализ по совокупности общих для лёссовидного суглинка и элювия карбонатных пород химических элементов, которые наиболее информативно отражают результаты педогенеза (Ca, Zn, Pb, P, K) показал: первоначальная группировка почв в кластеры происходит либо по территориальной близости объектов, либо по возрасту; тип материнской породы, на которой сформировались почвы, не выступает однозначным критерием кластеризации; рассредоточение кластеров подтверждает информативность коэффициента R_n .

Соотношение морфоструктурной и морфофункциональной организации почвенной системы. Увеличение мощности гумусового профиля при росте почвы вниз необратимо, если она расположена в ландшафте на автоморфных позициях, где скорости денудации минимальные. Но другое дело, когда рассматриваются почвенные свойства, многие из которых имеют различную по времени скорость воспроизводства. Можно предположить существование такого этапа функциональной “зрелости” почвы (ее химического и минералогического состава), когда ее будет характеризовать необратимое замедление морфофункционального развития. Если для развития гумусового профиля почв с целью поиска гносеологически целесообразных аналогий с развитием биологических систем применимо понятие онтогенез [35], то появляется возможность оперировать такими категориями возраста как юность, зрелость и старость [50].

В онтогенезе почв интенсивное накопление ОВ в фазе быстрого роста сменяется экстенсивным приростом гумусового профиля, что связано со стабилизацией органо-минерального комплекса, достижением его квазиклимаксного состояния. Рубежи для таких качественных стадий, как показано ранее [35], могут быть обоснованы при анализе функции сигмоидного вида (рис. 2) по положению двух критических точек, которые соответствуют максимальному и минимальному ускорению процесса.

То, что разные почвенные свойства (содержание ОВ, илистой фракции, $CaCO_3$) достигают во времени максимума своего развития, после чего наблюдается онтогенетически обусловленное (не связанное с изменением биоклиматических условий во времени) снижение достигнутых уровней, показал Йенни графически в виде гипотетического хроноряда почв [41, с. 242]. В частности, для процесса гумусонакопления он предполагал, что максимум этого процесса будет достигнут только по прошествии порядка 5000 лет.

Для черноземов степной зоны установлено [14], что скорости процесса гумусонакопления опережают приращение мощности гумусового горизонта до периода 1700–1800 лет. Этому возрасту почв соответствует толща гумусированного профиля степных черноземов, наиболее насыщенная корнями, 32–33 см. Затем (через 1800–1900 лет) морфоструктурная организация почвенного профиля дополняется более активно включенными в процесс почвообразования иными процессами: выщелачивание, миграция продуктов гумификации и др.

При изучении развития почв использовали хронофункцию изменения средней количественной оценки способности почв обеспечивать рост концентрации микроэлементов – показатель R_n . Зависимость степени геохимической зрелости гор. А от возраста (рис. 4) показывает, что концентрация накопленных микроэлементов, которые диагностируют педогенез, достигает максимума при возрасте почвы 1400 лет, а затем снижается вплоть до того времени, когда длительность педогенеза составляет 2200–2400 лет. Это можно объяснить тем, что по прошествии этого времени более активно протекают процессы внутрипрофильного перераспределения микроэлементов.

По уравнению аппроксимации вида полиномиальной модели второго порядка (то есть $y = c + bx + ax^2$) определены координаты вершины: $x = -b/2a$, что позволило определить точку перегиба: она соответствует возрасту почвы ~1400 лет. Таким образом, в этой закономерности неперманентной аккумуляции химических элементов в гор. А можно усмотреть аналогию с обновлением ОВ, что ограничивает применение радиоуглеродного метода для датирования почв [13]. В выпол-

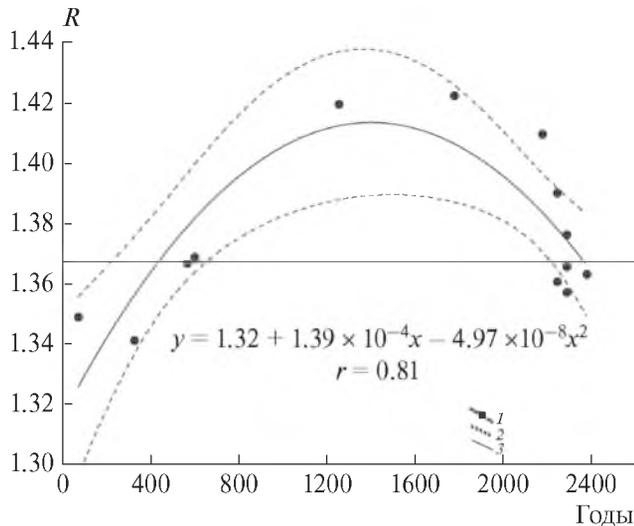


Рис. 4. Зависимость степени геохимической зрелости почв, которая выражена через коэффициент R , от их возраста (по датировкам археологических памятников Тарханкутского п-ва); прямой линией показан средний зональный уровень R , который для почв голоцена (то есть возрастом ~10 тыс. лет) составляет 1.368.

ненном исследовании опирались на устойчивые и консервативные свойства почвенной системы, которые являются интегральным результатом действия факторов и процессов почвообразования от нуля-момента до момента наблюдения. Такие свойства предложено [20] называть “soil memory” (pedomemory, pedorecord). В этой связи почвы, упорядоченные по результатам геоархеологических исследований в хроноряды и которые в результате моделирования можно представить серией хронофункций элементарных почвенных процессов, обладают информационным потенциалом для плодотворных междисциплинарных — педоархеологических исследований объектов культурного наследия.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования способствуют развитию логико-математического моделирования для обоснования наиболее адекватных моделей педогенеза из класса S-образных кривых, применяемых в качестве ростовых функций в биологических и экологических исследованиях. Использованием одной из функций такого типа — функции Гомперца — удастся отразить количественные динамические закономерности развития почвы на всех его этапах ее становления, а интерпретация критических точек процесса дает возможность объективно установить “переломные” моменты педогенеза. При различиях во мнениях о продолжительности характерного времени почвенных процессов [1, 5], которое для трендовых процессов определяется временем,

необходимым для достижения состояния квазиравновесия, предложен подход к его обоснованию на основе математического моделирования (вычисления первой и второй производных функций). Результативность указанного подхода, полученная в данном исследовании для определения характерного времени формирования гумусового горизонта черноземных почв на рыхлых почвообразующих породах, определяет перспективу его применения для оценки других почвообразовательных процессов.

2. Предположение Йенни о возникновении этапа функционального “старения” почвы (ее химического и минералогического составов), показанное им в виде гипотетического хроноряда почв на всей шкале эволюционного времени, нашло подтверждение в определении времени достижения морфофункциональной зрелости гумусового горизонта степных почв (при их развитии на протяжении 3.5 тыс. лет) уже по прошествии 1600–1800 лет, после чего начинается процесс необратимого замедления развития (“динамического старения”) этих почв, адекватно описываемый уравнением Гомперца. Максимум геохимической зрелости гумусово-аккумулятивного горизонта почв (при их возрасте до 3500 лет) достигается через 1400 лет.

3. Предложенные эмпирические модели формирования почв на антропогенно-нарушенных поверхностях перспективно использовать для почвенно-хронологического датирования археологических памятников, находящихся в режиме ренатурации после прекращения бытования создавших их культур. Данный метод, использующий закономерности формирования во времени новообразованного гумусового горизонта почв, может быть усовершенствован путем построения математических моделей, отражающих направленность протекания других почвообразовательных процессов (выщелачивания, оструктурирования, геохимической трансформации субстрата и др.).

4. Разработанный метод почвенно-генетической хронологии — метод датирования антропогенных сооружений, основанный на математической зависимости необратимых генетических почвенных свойств от времени, определяет востребованность почвоведения для атрибуции и охраны объектов культурного наследия. Педохронологический метод представляет особый интерес для археологии в тех случаях, когда земляные сооружения (оборонительные, гидротехнические и межевые валы) не содержат артефактов, а подкурганые погребения безинвентарны. Условием для успешного применения метода почвенно-генетической хронологии является необходимость проведения геоархеологических исследований в регионах со сравнительно однородными почвенно-климатическими условиями, получение методически согласованных педохронологических дан-

ных в объеме, позволяющем обрабатывать их методами статистики, а также калибровки по этим данным хронофункций изменения почвенных свойств во времени и верификации расчетной формулы датирования почв.

Благодарность. Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в НИУ «БелГУ» по виду работ «Организация проведения научных исследований» № 2014/420-1.

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. База почвенно-хронологических данных: свидетельство № 2010620434 о гос. регистрации базы данных / Ф.Н. Лисецкий, П.В. Голеусов, О.А. Чепелев и др.; правообладатель ГОУ ВПО Белгородский государственный университет (БелГУ). № 2010620190; заявл. 26.04.2010; опублик. 16.08.2010.
4. Волобуев В.Р. Введение в энергетiku почвообразования. М.: Наука, 1974. 126 с.
5. Геннадиев А.Н. Почвы и время: модели развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 232 с.
6. Городцов В.А. Культура бронзовой эпохи в Средней России // Отчет исторического музея за 1914 г. М., 1916.
7. Демкин В.А., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э. и др. Эволюция почв и динамика климата сухих степей Приволжской возвышенности за последние 3500 лет // Почвоведение. 2012. № 12. С. 1244–1258.
8. Докучаев В.В. Избр. соч. М.: Сельхозгиз, 1949. Т. 1. С. 390.
9. Жекулин В.С. Историческая география: предмет и методы / Под ред. С.Б. Лаврова. Л.: Наука. 1982. 224 с.
10. Захаров С.А. Курс почвоведения. М.—Л.: Госиздат, 1927. 440 с.
11. Золотун В.П. Развитие почв юга Украины за последние 50–45 веков. Автореф. дис. ... д. с.-х. н. Киев, 1974.
12. Иванов И.В. Эволюция почв степной зоны в голоцене. М.: Наука, 1992. 144 с.
13. Иванов И.В., Хохлова О.С., Галицкий В.В. и др. Радиоуглеродное загрязнение и самоочищение гумуса черноземов Восточно-Европейской равнины в 1900–2008 гг. // Почвоведение. 2012. № 8. С. 899–907.
14. Лисецкий Ф.Н. Воспроизводство почв в степных экосистемах разного возраста // Сибирский экологический журнал. 2012. Т. 5. № 6. С. 819–829. doi 10.1134/S1995425512060108
15. Лисецкий Ф.Н., Голеусов П.В., Чепелев О.А. Развитие черноземов Днестровско-Прутского междуречья в голоцене // Почвоведение. 2013. № 5. С. 540–555. doi 10.1134/S1064229313050086
16. Лисецкий Ф.Н., Ергина Е.И. Развитие почв Крымского полуострова в позднем голоцене // Почвоведение. 2010. № 6. С. 643–657. doi 10.1134/S1064229310060013
17. Основы рационального использования почвенно-климатических условий в земледелии. М.: Колос, 1972. 304 с.
18. Рупрехт Ф. Геоботанические исследования о черноземе. СПб, 1866. 131 с.
19. Рябогина Н.Е., Якимов А.С. Палинологические и палеопочвенные исследования на археологических памятниках: анализ возможностей и методика работ // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2010. № 2. С. 186–200.
20. Соколов И.А., Таргульян В.О. Структурный и функциональный подход к почве: почва-память и почва-момент // Математическое моделирование в экологии. М.: Наука, 1976. С. 17–34.
21. Физико-географическое районирование Украинской ССР / Под ред. В.П. Попова, А.М. Маринича, А.И. Ланько. Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1968. 683 с.
22. Флоринский И.В. Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение. 2012. № 4. С. 500–506.
23. Шейн Е.В., Русанов А.М., Милановский Е.Ю. и др. Математические модели некоторых почвенных характеристик: обоснование, анализ, особенности использования параметров моделей // Почвоведение. 2013. № 5. С. 595–602.
24. Aleksandrovskii A.L., Gol'eva A.A., Gunova V.S. Reconstruction of paleolandscape conditions of the early Scythian soils in the Stavropol region // Eur. Soil Sci. 1997. V. 30. № 5. P. 461–471.
25. Bain D.C., Mellor A., Robertson-Rintoul M.S.E. et al. Variations in weathering processes and rates with time in a chronosequence of soils from Glen Feshie, Scotland // Geoderma. 1992. V. 57. № 3. P. 275–293.
26. Barrett L.R. A strand plain soil development sequence in Northern Michigan, USA // Catena. 2001. V. 44. № 3. P. 163–186. doi 10.1016/S0341-8162(00)00170-3
27. Birkeland P.W. Holocene soil chronofunctions. Southern Alps, New Zealand // Geoderma. 1984. V. 34. № 2. P. 115–134.
28. Bockheim J.G. Soil development rates in the Transantarctic Mountains // Geoderma. 1990. V. 47. № 1/2. P. 59–77.
29. Bockheim J.G. Solution and use of chronofunctions in studying soil development // Geoderma. 1980. V. 24. № 1. P. 71–85.
30. Bockheim J.G., Gennadiyev A.N. Soil-factorial models and earth-system science: A review // Geoderma. 2010. V. 159. № 3. P. 243–251. doi 10.1016/j.geoderma.2010.09.005
31. Demkin V.A. Buried soils of defence lines of ancient Russia and the problems of ancient and recent history of soil formation // Eur. Soil Sci. 1999. V. 32. № 10. P. 1094–1104.
32. Dominant soils of Ukraine. Scale 1 : 2500000. Printed by ISRIC International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, 1998.

33. *Dreibrodt S., Nelle O., Lijens I., Mitusov A., Clausen I., Bork H.* Investigations on buried soils and colluvial layers around bronze age burial mounds at bornhöved (northern germany): An approach to test the hypothesis of 'landscape openness' by the incidence of colluviation // *Holocene*. 2009. V. 19. № 3. P. 487–497. doi 10.1177/0959683608101397
34. *Fisher P.F.* Pedogenesis within the archaeological landscape at south lodge camp, Wiltshire, England // *Geoderma*. 1983. V. 29. № 2. P. 93–105.
35. *Goleusov P.V., Lisetskii F.N.* Soil development in anthropogenically disturbed forest-steppe landscapes // *Eur. Soil Sci.* 2008. V. 41. № 13. P. 1480–1486. doi 10.1134/S1064229308130188
36. *Griffith M.A.* A pedological investigation of an archaeological site in Ontario, Canada, I. An examination of the soils in and adjacent to a former village // *Geoderma*. 1980. V. 24. № 4. P. 327–336.
37. *Harden J.W.* Soil development on stable landforms and implications for landscape studies // *Geomorphology*. 1990. V. 3. № 3–4. P. 391–398.
38. *Heimsath A.M., Dietrich W.E., Nishiizumi K. et al.* The soil production function and landscape equilibrium // *Nature (London)*. 1997. V. 388. P. 358–361.
39. *Huggett R.J.* Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review // *Catena*. 1998. V. 32. № 3. P. 155–172.
40. *Ivanov I.V., Tabanakova E.D.* Changes in the thickness of humus horizons and the Holocene evolution of East European Chernozems (mechanisms, factors, and regularities) // *Eur. Soil Sci.* 2003. V. 36. № 9. P. 917–930.
41. *Jenny H.* The soil resource. Origin and behavior. N.Y.-Heidelberg-Berlin, 1980. 377 p.
42. *Kohnke H., Bertrand A.R.* Soil conservation. New York: McGraw-Hill, 1959.
43. *Kolmogorov A.N.* Confidence limits for an unknown distribution function // *AMS*. 1941. V. 12. P. 461–463.
44. *Lin H.* Three principles of soil change and pedogenesis in time and space // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2011. V. 75. № 6. P. 2049–2070. doi 10.2136/sssaj2011.0130
45. *Lisetskii F., Stolba V., Ergina E. et al.* Post-agrogenic evolution of soils in ancient Greek land use areas in the Herakleian Peninsula, southwestern Crimea // *Holocene*. 2013. V. 23. № 4. P. 504–514. doi 10.1177/0959683612463098
46. *Lisetskii F.N., Stolba V.F., Marinina O.A.* Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use // *Geoderma*. 2015. V. 239–240. P. 304–316. doi 10.1016/j.geoderma.2014.11.006
47. *Liu G., Liu P., Zhang Q. et al.* Construction of heilu soil chronofunction in Luochuan, China // *Internat. Conf. on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE)*. 2011. P. 188–191. doi 10.1109/RSETE.2011.5964247
48. *Mitusov A.V., Mitusova O.E., Pustovoytov K. et al.* Palaeoclimatic indicators in soils buried under archaeological monuments in the Eurasian steppe: a review // *Holocene*. 2009. V. 19. № 8. P. 1153–1160. doi 10.1177/0959683609345076
49. *Munsell Color*, 1990. Munsell soil color charts. Baltimore, MD.
50. *Nikiforoff C.C.* Reappraisal of the soil // *Science. New Series*. 1959. V. 129. № 3343. P. 186–196.
51. *Phillips J.D., Turkington A.V., Marion D.A.* Weathering and vegetation effects in early stages of soil formation // *Catena*. 2008. V. 72. № 1. P. 21–28. doi 10.1016/j.catena.2007.03.020
52. *Ruxton B.P.* Rates of weathering of Quaternary volcanic ash in Northeast Papua // *Int. Congr. Soil Sci, Trans. 9th (Adelaide. Austr.)*. 1968. V. 4. P. 205–213.
53. *Schaetzl R.J., Barrett L.R., Winkler J.A.* Choosing models for soil chronofunctions and fitting them to data // *Europ. J. Soil Sci.* 1994. V. 45. № 2. P. 219–232.
54. *Shaw D.M.* Interprétation géochimique des éléments en traces dans les roches cristallines. Paris: Masson, 1964.
55. *Sondheim M.W., Singleton G.A., Lavkulich L.M.* Numerical analysis of a chronosequence, including the development of a chronofunction // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1981. V. 45. № 3. P. 558–563.
56. *Stevens P.R., Walker T.W.* The chronosequence concept and soil formation // *Quarterly Rev. Biol.* 1970. V. 45. № 4. P. 333–350.
57. *Stolba V.F.* La vie rural en Crimée antique: Panskoe et ses environs // *Études de Lettres*. 2012. V. 1–2. P. 311–364. doi 10.4000/edl.365
58. *Stolba V.F., Andresen J.* Unveiling the hinterland: A new type of Hellenistic rural settlement from Crimea // *Antiquity*. 2015. V. 89. № 344. P. 345–360. doi 10.15184/aqy.2014.10
59. *Stolba V.F., Lisetskii F.N.* Application of soil chronology in studies of ancient land use // *4th International Cong. EUROSIL 2012 “Soil science for the benefit of mankind and environment”, Bari, Italy*. doi 10.13140/2.1.4126.5441
60. *Valentine K.W.G., Fladmark K.R., Spurling B.E.* The description, chronology and correlation of buried soils and cultural layers in a terrace section, Peace River Valley, British Columbia // *Canadian J. Soil Sci.* 1980. V. 60. № 2. P. 185–197.
61. *Vidic N.J., Lobnik F.* Rates of soil development of the chronosequence in the Ljubljana Basin, Slovenia // *Geoderma*. 1997. V. 76. № 1–2. P. 35–64.
62. *Walkington H.* Soil science applications in archaeological contexts: A review of key challenges // *Earth-Science Rev.* 2010. V. 103. P. 122–134. doi 10.1016/j.earscirev.2010.09.002
63. *Wilcke W., Valladarez H., Stoyan R. et al.* Soil properties on a chronosequence of landslides in montane rain forest, Ecuador // *Catena*. 2003. V. 53. № 1. P. 79–95. doi 10.1016/S0341-8162(02)00196-0