

Воспроизводство почв в степных экосистемах разного возраста

Ф. Н. ЛИСЕЦКИЙ

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
308015, Белгород, ул. Победы, 85
E-mail: liset@bsu.edu.ru

АННОТАЦИЯ

На основе изучения разновозрастных почв археологических памятников выявлены особенности развития степных черноземов. Показаны различия в формировании фитомассы и морфологической зрелости почвенного профиля в восстановительных разновозрастных сукцессиях. Разработанная региональная модель формирования гумусового горизонта степных почв во времени позволила оценить временной интервал, на котором процессы гумусонакопления и морфологической зрелости почвенного профиля становятся относительно равновесными, – 1700–1900 лет.

Ключевые слова: степные экосистемы, воспроизводство почв, антропогенные нарушения, археологические памятники, поздний голоцен.

Экологическая реставрация степных биомов подразумевает, прежде всего, управление процессом восстановления растительного покрова. При этом из-за разной длительности процессов воспроизводства растительного и почвенного покровов ведущая роль отводится степной растительности, хотя ясно, что результаты эколого-реставрационных мероприятий надежно закрепляются в почвенной системе. Поскольку почва – биокосная система, естественное плодородие как результат развития природного почвообразовательного процесса, включающего биогеохимическое преобразование минеральной части почвы, следует отнести к трудно возобновимым ресурсам. По аналогии с биологическим и ландшафтным разнообразием предложено [1] выделять “почвенное разнообразие” – исчерпаемый невозобновимый ресурс. В степной зоне такие своеобразные почвы, как разновременные на курганах, поселениях, фортификационных земляных сооруже-

ниях, наряду с их полноголоценовыми аналогами, обычно представленными на особо охраняемых природных территориях, должны входить в состав Красных книг почв. Опыт таких разработок уже имеется [2–3]. Флористическое разнообразие на одних только курганах впечатляет: при исследовании 44 курганов (возраст от 700 до 5000 лет) из 900 степных видов украинской флоры обнаружено 209 видов растений в различных микроразнообразных местоположениях [4]. Кроме того, упорядоченные по оси времени в виде хронологических смен почвенно-растительного покрова, восстанавливаемого после гетерохронных антропогенных нарушений, представляют собой информативные пространственно-временные модели процессов экологической ренатурации.

Согласно рекомендациям EUROSITE, Toolkit Management Planning [5] в зонах природоохранного планирования следует проводить как активное управление для поддержания биотопов и биоразнообразия, так и полномасштабное управление по воспроизводству био-

топов. Эффективному решению этой задачи может способствовать более глубокое понимание взаимоотношений (сингенетических) связей в системе почва – растение. Выявление эколого-почвенных связей на количественном уровне, учитывающих региональные и локальные особенности ландшафтных зон, обосновано [6] в числе наиболее важных и актуальных проблем экологии почв – одной из самостоятельных наук биосферного класса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полевое изучение ландшафтов, сформировавшихся на протяжении позднего голоцена, проводили на территориях Республики Крым (Украина) и Краснодарского края (Россия). Организации почвенно-эволюционных исследований на Керченском и Таманском полуостровах благоприятствует обилие разновременных памятников древности со сформированными почвами в своеобразной, но довольно однородной биоклиматической обстановке. В реалиях античного времени европейская и азиатская части Боспорского государства соответствуют двум субрегионам, самобытным в геологическом, почвенно-географическом и биоклиматическом отношении. Керченская холмисто-грядовая степь как физико-географическая область отличается от территорий к западу (Степного Крыма), а Таманский полуостров не похож на другие районы Кубани, расположенные восточнее.

На Керченском полуострове среднегодовое количество осадков колеблется от 330–350 до 400 мм. Климат очень засушливый, умеренно жаркий (среднегодовая температура составляет 11 °С, средняя температура в июле – 22,6–23,3 °С) с мягкой зимой. По среднегодовым значениям коэффициент увлажнения (Иванова-Высоцкого) меняется от 0,50 на северо-западе до 0,38 на юге. Характерные для Керченского холмогорья ковыльно-полынные степи на южных и карбонатных черноземах, а также каштановых и солонцеватых почвах сочетаются с петрофитными кустарниково-разнотравно-злаковыми степями на малоразвитых щебнистых почвах черноземного типа и каштановых почвах. На Керченском полуострове начало формирова-

ния почвенного покрова из черноземов современного облика относится к 5,2 тыс. лет назад [7] (по калиброванным датам 6,0 тыс. лет назад).

При большом разнообразии оригинальных ландшафтов на территории Керченского полуострова к изученным объектам наиболее близка экологическая обстановка, связанная с низменными геокомплексами с темно-каштановыми и южно-черноземными почвами под ксеро-, петро- и галофитными вариантами дерновинно-злаковых степей со значительным участием полукустарничков полыни и прутняка [8]. Здесь много нераспаханных участков, что может способствовать быстрой реставрации нарушенных земель. Один из самых больших в Украине участков (6–7 тыс. га) ковыльных степей “Чигини”, сохранившийся возле с. Золотое Ленинского р-на, представлен формациями *Stipeta braunerii*, *S. grafiana*, *S. capillatae*, *S. borysthonicae* [9].

На Таманском полуострове, условную границу которого проводят от Анапы до западного побережья Курчанского лимана, климат из-за приморского положения смягчен (менее контрастный). Условия теплообеспеченности отличаются высокой суммой положительных температур (до 3600–3800 °С). Среднегодовые температуры варьируют в пределах 10–14 °С, в среднем 11 °С. Лето жаркое (средняя температура воздуха в июле составляет 21–24 °С). Средняя температура зимнего периода составляет минус 0,3 °С (в наиболее холодный месяц (январь) – –2 ... –4 °С). Климат Тамани не слишком влажный (за год выпадает 350–430 мм осадков, в среднем около 400 мм) и отличается мягкой зимой. Причем максимум осадков приходится на два сезона – зиму и осень [10]. Характерную растянутость гумусовых профилей почв можно объяснить значительным участием нисходящих токов влаги в периоды невысокого испарения (на зиму, весну и осень приходится 72 % годовой суммы осадков).

На Таманском полуострове энергетические затраты на почвообразование (по В. Р. Волобуеву) составляют 954 (843 ÷ 1013) МДж/(год · м²). Эти значения выше, чем на Керченском полуострове, за счет несколько большего увлажнения и лучшей степени теплообеспеченности. В почвенном покрове Таманского полу-

острова доминируют южные черноземы. Это преимущественно слабогумусированные мичелярно-карбонатные мощные и средне-мощные черноземы на лессовидных суглинках, частично на песчано-глинистых аллювиальных отложениях и дочетвертичных солонесных глинах. «Каштановые черноземы» Тамани (черноземы южно-европейской фации) содержат в верхнем слое 3–3,5 % гумуса [10].

В качестве примера приведем описание морфологического строения полноголоценовой почвы (чернозема южного тяжелосуглинстого) под крымскопольно-типчаковой ассоциацией (в 0,8 км к западу от пос. Тамань): А (0–28 см), с 16 см отмечено побурение почвы, АВ₁ (28–74 см), с 66 см первые признаки иллювиирования, В_{1Ca} (74–93 см), ниже горизонт ВС.

В почвенно-эволюционных исследованиях последнего времени уже получил хорошую апробацию метод изучения разновозрастных почв, объединенных по шкалам внутреннего времени изучаемого процесса в хроноряды почв (совокупности анализируемых почв, сформированных на одинаковом субстрате в сходных биоклиматических условиях, но отличающихся относительным возрастом). Следующий этап, способствующий пониманию закономерностей развития почв, связан с переходом к хронофункциям почв. Для выполнения этой задачи изменение почвенных свойств координируется с возрастом, установленным количественными методами датирования (например, археологическим).

Исследования морфологического строения почвенных профилей на археологических памятниках проводили в почвенном разрезе, вскрывающем совокупность новообразованных горизонтов почвы после окончания бытования для селитебных зон или последней досыпки для земляных насыпей. Аналитические работы проводили по стандартным методикам: гумус – по методу Тюрина, азот валовой (N) – по методу Кьельдаля, кислотность почвы (рН) – потенциметрически, карбонаты – ацидиметрическим методом.

Датированную сукцессию характеризовали через тип фитоценоза и общее проективное покрытие (ОПП). Оно в определенной мере диагностирует приход растительного вещества, поступающего в почву и участву-

ющего в формировании гумуса, а также степень защищенности почвы от водной эрозии и дефляции.

Для получения зависимости мощности гумусового горизонта почв от их возраста целесообразно сформировать хроноряд почв на антропогенных сооружениях в максимально возможном временном диапазоне. Поэтому объектами данного исследования послужили: территории античных городов, сельских поселений и городищ, курганы, земляные насыпи древности и II Мировой войны в так называемых беллигеративных (от латинского *belligero* – вести войну) ландшафтах [11], отвалы горнорудной промышленности. Исследованные разновозрастные почвы характеризуют хроноинтервал почвообразования от 15 до 3500 лет. Для сравнения привлекали данные по морфологии зональных (полноголоценовых) почв. Объекты исследований представлены списком по географическому принципу и обозначены на рис. 1.

1. Крымская Республика. Романова бухта. Семеновка, поселение. Чернозем на плотной глине. Разнотравная ассоциация.

2. П-ов Казантип, Карантинный (Желяевский) мыс. Мысовка (Мысовое II). Поселение II в. до н. э. Чернозем на зольнике. Разреженная злаковая растительность.

3. 29 км к западу от Керчи. Узунларский, или Аккосов (на картах – Татарский), вал высотой 2,6 м, шириной (со рвом) 34 м, конец I тыс. до н. э. (у разных авторов от IX до IV в. до н. э.), укреплен боспорским царем Асандром (47–16 гг. до н. э.). Чернозем на плотной глине. Ковыльно-типчаковая ассоциация с участием грудницы.

4. П-ов Казантип, побережье Татарской бухты. Городище Гераклий III в. н. э. Чернозем карбонатный на элювии известняка. Житняковая ассоциация.

5. Мыс Зюк. Зенонов Херсонес (городище), VII в. н. э. Суглинок средний. Рудеральное разнотравье.

6. Каменка, поселение. Гумусированная насыпь. Разнотравная ассоциация (овсяница, полынь крымская, молочай, тысячелистник).

7. Еникале, крепость. Вал верхнего замка. Суглинок средний. Типчаково-разнотравная ассоциация (ОПП = 60 %).

8. Мирмекий, город. Суглинок легкий карбонатный. Костровая ассоциация.

9. Окрестности Керчи, курган к северу от 2-го Змеиного кургана. Разнородная земляная насыпь. Суглинок тяжелый. Злаково-разнотравная ассоциация.

10/1. Пантикапей, античный город. Нижняя терраса. Суглинок щебнистый. Почва под насыпью археологических раскопок.

10/2. Керчь, крепость XIX в., земляная насыпь. Глина со щебнем. Пырейно-разнотравная группировка (ОПП = 80 %).

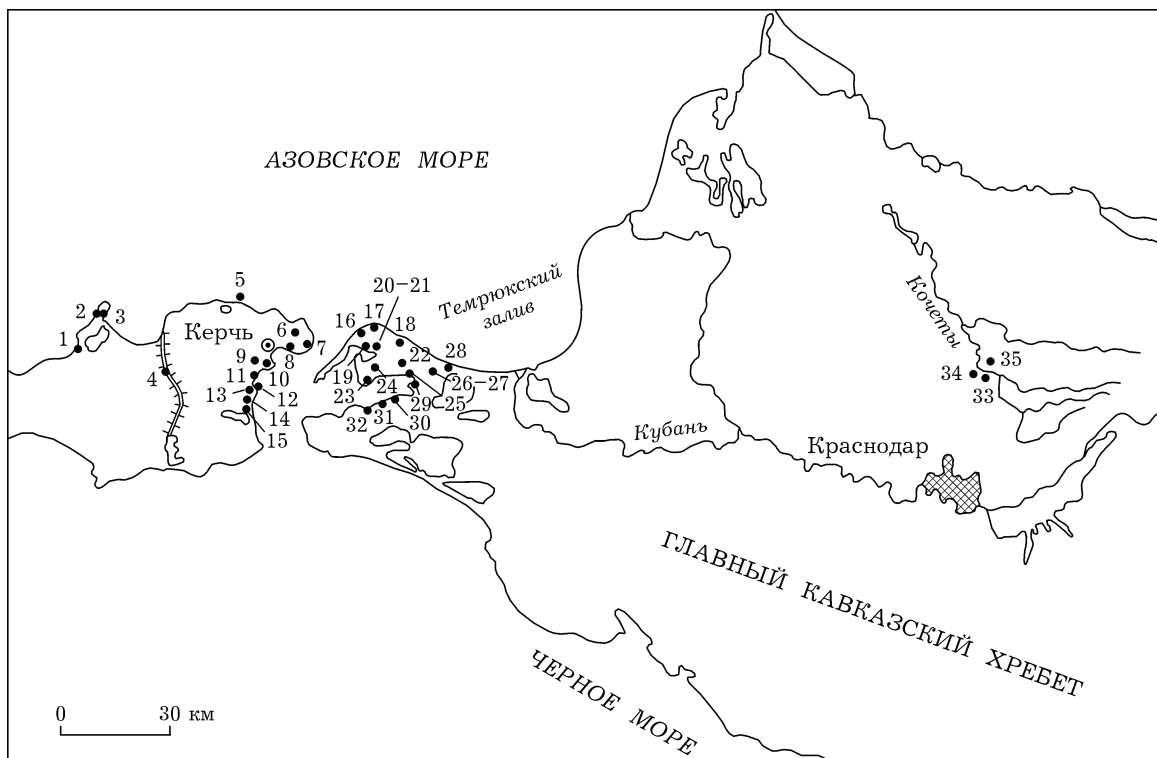


Рис. 1. Объекты почвенно-хронологических исследований в пределах Керченско-Таманского региона и смежных территорий. Пояснения в тексте

11. Тиритака, город. Разнородный культурный слой. Рудеральная растительность (пырей, резак, мхи).

12. Керчь, микрорайон Аршинцево, дамба. Насыпь из табачной глины. Типчаковая ассоциация (ОПП = 55–60 %).

13. Нимфей, город. Суглинок средний. Разнотравно-злаковая ассоциация (ОПП = 85–90 %).

14. Героевка II, поселение. Культурный слой. Суглинок средний. Разнотравно-злаковая ассоциация (типчак, пырей, полынь, люцерна серповидная, подорожник ланцентный).

15. Героевка I, поселение. Суглинок средний. Разнотравно-типчаковая ассоциация (ОПП = 60–70 %).

16. Северо-западная окраина пос. Ильич. Территория между валом и обрывом коренного берега Керченского пролива. Городище (Трапезунта) (IV–VI вв. н. э.). Суглинок средний лессовидный. Почва перекрыта археологическим выбросом.

17. Северо-восточнее пос. Ильич. Батарейка. Крепость возникла на рубеже нашей эры, окончательно разгромлена тюркютами в 576 г. По другим данным, жизнь в крепости прекратилась в IX в. н. э. В гумусовом горизонте новообразованной почвы и на границе почвенных горизонтов АВ и В встречена керамика, датированная II–V вв. н. э., на глубине 29 см – амфорная ручка II–III вв. н. э. Суглинок средний опесчаненный. Разнотравно-типчаковая ассоциация (типчак, кохия, полынь австрийская).

18. Южное побережье Темрюкского залива. Городище Кучугуры II (IV–III вв. до н. э. – III–IV вв. н. э.).

Супесь карбонатная. Дерезняк, злаки. Там же. Суглинок средний карбонатный. Злаковая растительность.

19. Северное побережье Динского залива, городище Батарейка I (I–IV вв. н. э., по новым данным [12] существовало и в VI в. н. э.). Легкий суглинок. Крымскопольно-типчаковая ассоциация (ОПП = 40 %).

20/1. Пос. Батарейка. Городище Батарейка II (конец II в. до н. э. – IV в. н. э., существовало и в VI в. н. э. [12]). Суглинок средний карбонатный. Злаковая растительность, небольшая пастбищная дигрессия (ОПП = 95 %).

20/2. Там же. Археологический раскоп на городище, заложенный экспедицией Н. И. Сокольского в 1962–1965 гг. Суглинок лессовидный карбонатный. Сорная растительность, измененная пастбищной дигрессией.

21. Северное побережье Динского залива, в 0,25 км к ЮЗ от пос. Батарейка. Бруствер пулеметной точки 1943 г. Суглинок тяжелый карбонатный. Разнотравно-злаковая растительность (пырей, полынь австрийская).

22. Поселение “Красноармейское” (I в. до н. э. – V в. н. э.). Суглинок средний. Разнотравно-злаковая растительность.

23. 1,2 км к юго-западу от станицы Фонталовской. Вершина кургана высотой 4 м. Новообразованная почва позднескифского времени. Суглинок средний карбонатный. Сорная растительность.

24. Северное побережье Таманского залива, западная окраина пос. Гаркуша, город Патрей (VI в. до н. э. – 70-е гг. IV в. н. э.). Средний суглинок. Почва перекрыта археологическим выбросом.

25/1. Восточнее пос. Юбилейный. Киммерийский вал, общая длина 1,2 км, ширина у основания до 30 м и высота около 5 м. Суглинок средний карбонатный. Злаковая растительность с участием напочвенных лишайников.

25/2. Там же, немецкий блиндаж на склоне вала. Суглинок средний. Злаковая растительность.

26. Окраина пос. За Родину. Законсервированный археологический памятник "Таманский толос и резиденция Хрисалиска" после раскопок 1975 г. Суглинок средний. В растительном покрове доминирует пырей (ОПП = 50 %).

27. В 2 км к юго-западу от пос. За Родину, курган Веселый, высота – 12 м. Подъемный материал датируется скифским временем. Суглинок средний. Австрийскополюнно-типчакковая ассоциация (ОПП = 30 %).

28. Побережье Темрюкского залива, пересыпь Ахтанизовского лимана, оборонительный вал городища Тирамба (сооружен в I в. до н. э., разрушен в I в. н. э., но жизнь на городище продолжалась до III в. н. э.). Суглинок средний, переходный к легкому. Злаково-разнотравная растительность.

29. Восточное побережье Таманского залива, античный город Кепы (перв. пол. VI в. до н. э. – IV в. н. э., разрушен гуннами незадолго до 545 г. [12]). Суглинок легкий. Разреженная растительность (прутняк простертый, солонечник мохнатый, шандра ранняя), пастбище.

30. В 1 км к западу от ст. Сенной. Античный город Фанагория (VI в. до н. э. – VII в. н. э.). Суглинок средний. Злаковая растительность (типчак и житняк с участием прутняка и кермека).

31/1. Южное побережье Таманского залива, у восточной окраины пос. Тамань. Фанагорийская крепость. Нижний вал 1795 г. Суглинок тяжелый. Ксерофитная степная растительность.

31/2. Там же, восточная часть крепости у бастиона св. Петра. Блиндаж 1943 г. Суглинок средний. Злаковая растительность.

32/1. Северо-западная окраина Тамани. Прибрежная зона. Городище Гермонасса. Почва на слое с керамикой V–IV вв. до н. э. Суглинок легкий. Типчакковая ассоциация (проективное покрытие 60 %), пастбищная дигрессия.

32/2. Северная окраина Тамани. Новообразованная почва на слое с артефактами первых веков н. э. и слоем до XII в. (городище Тмутаракань). Суглинок средний. Крымскополюнная ассоциация (ОПП = 20 %).

Кроме того, для лучшей обеспеченности модели эмпирическими данными привлечены результаты исследований по территориям, смежным с Таманью.

33/1. Краснодарский край, Динской р-н, левый берег р. Кочеты, х. Новый, 1-я надпойменная терраса, курган высотой ок. 9 м. Разнотравно-пырейная растительность (подмаренник, шалфей).

33/2. Там же, курган высотой 10 м с пунктом триангуляции. Пырейно-подмаренниковая ассоциация (ОПП = 80 %).

34. Там же, в 1,2 км к западу от 33/1, курган высотой ок. 9 м. Разнотравно-пырейная растительность (подмаренник, шалфей).

35. Там же, в 8 км к СВ от 33/1, курган с широкой вершиной, пунктом триангуляции, высотой 7 м. Злаковая растительность, на склонах кустарники.

Данные, полученные в полевых условиях и в результате аналитических определений, интегрированы в почвенно-хронологическую базу данных (БД), которая содержит более 400 описаний почвенно-генетических профилей новообразованных почв на разновозрастных поверхностях разных ландшафтно-географических районов Восточной Европы [13]. Описание объектов БД структурировано по четырем разделам: 1) пространственная характеристика (местоположение, координаты, фото, растительная ассоциация); 2) описание почвенного профиля и условий почвообразования, возраст почвы; 3) почвенно-генетическое описание по горизонтам; 4) морфологические и физико-химические свойства почв. Информация из БД использована для моделирования процесса регенерации степных почв во времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Путем обобщения результатов исследований разновозрастных почв археологических памятников Керченско-Таманского региона разработана модель зависимости мощности гумусового горизонта (H) новообразованных почв от их возраста. Как установлено ранее при изучении разновозрастных почв Крыма [14], не выявляются достоверные различия по H почв, которые формировались в зонах распространения черноземов южных и темно-каштановых почв за последние 2600 лет. Для обоснования возможности объединения почвенно-хронологических данных Керченского и Таманского массивов проведено моделирование зависимости величин H южных черноземов от их возраста – отдельно для каждого массива. Сравнение расчетных данных, полученных по двум моделям, показало отсутствие достоверных различий (критерий Колмогорова – Смирнова, $P = 0,95$) между моделями. В результате для расчета параметров модели был составлен объединенный массив эмпирических данных для почв степной зоны Керченского-Таманского региона. График зависимости мощности гумусового

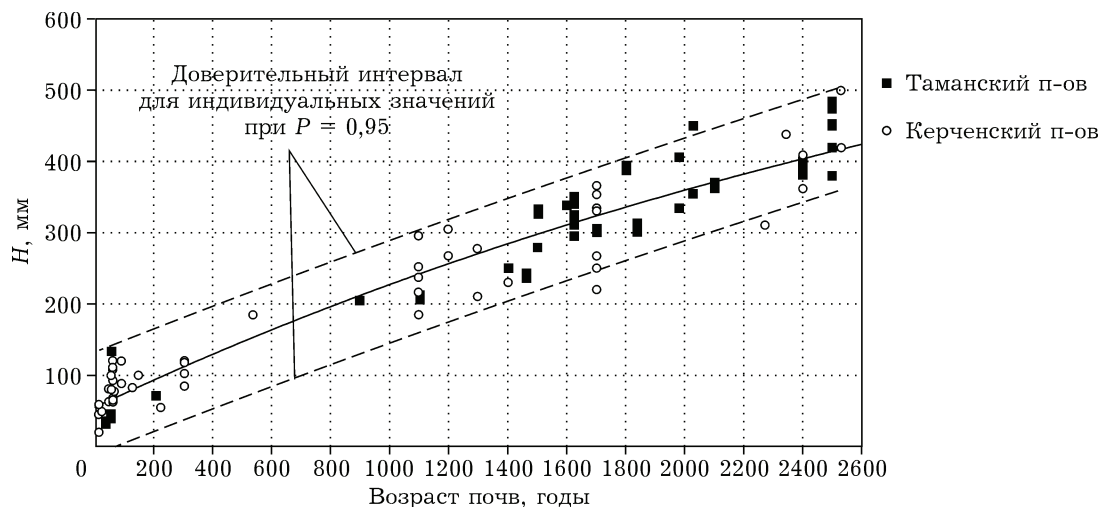


Рис. 2. Зависимость мощности гумусового горизонта черноземов южной степи от времени (по данным исследований на территории Керченского и Таманского полуостровов)

го горизонта южных черноземов от их возраста представлен на рис. 2.

Адаптивная трансформация структуры восстанавливаемых степных сообществ проходила сингенетично с формированием гумусового горизонта новообразованных почв на поверхностях, созданных антропогенным рельефообразованием. В археологических ландшафтах показательна зависимость общей величины надземной фитомассы степных экосистем от возраста сукцессии. Надземная фитомасса в автогенных сукцессиях, сформированных на культурных слоях 1600–3500-летнего возраста с доминированием ковыля, составляет 7,1 т/га, а в типчаковых ассоциациях – 4,8 т/га.

По усредненным многолетним данным [15], типчаково-ковыльные ассоциации коренного облика обеспечивают за счет над- и подземной (в слое 0–20 см) массы ежегодное поступление 12 т/га растительного вещества, что эквивалентно скорости гумусообразования 2,4–2,5 т/га в год. По скорости разложения отдельных структурных частей мортмассы и содержанию в них важнейших элементов-органогенов (Са, К, Р) рассчитано, что с опадом на поверхности почвы и отпадом корней (в 0–20 см) ковыля-волосатика поступает 58 и 131 кг/га этих зольных элементов, а типчак (*Festuca valesiaca*) обеспечивает приход соответственно 38 и 66 кг/га. Поэтому почва под ковылем получает в 1,8 раза больше элементов-органогенов, чем под типча-

ком, и ценность ковыля в отношении процесса гумусообразования выше.

Для процесса почвообразования важно формирование у серийных сообществ определенного запаса подстилки (степного войлока). В изученных нами степных экосистемах возраста от 16 до 35 вв. средние запасы подстилки составляли (198 ± 39) г/м². В ковыльных сообществах при двучленной структуре подстилки (верхнего горизонта мортмассы (слабо разложившейся) и нижнего (сильно разложившейся)) контактный с почвой горизонт более интенсивно разлагается и в него вмываются азот и зольные элементы (К, Са, Mg, S) [16].

При оценке запасов фитомассы в восстановительных разновозрастных сукцессиях отмечены меньшие различия по сравнению с целиной в типчаковых ассоциациях, чем в ковыльных (1,1–1,2 против 1,3–1,9 раза). По-видимому, это может указывать на большее экологическое соответствие типчака достигнутой зрелости почв и уровню их плодородия. Это тем более примечательно, что после 55 лет заповедания участка “Старый” в Аскании-Нова в сукцессии сухостепной растительности четко прослеживается главная тенденция – трансформация ковыльных ценозов в типчаковые [17].

Закономерно, что растительность быстрее отражает факторы среды, чем почвы. Если растительные сообщества через 2–3 тыс. лет формируют надземную фитомассу в преде-

лах 80–84 % от уровня коренных сообществ на полноголоценовых почвах, то мощность гумусового горизонта для почв возраста 16–18 вв. составляет 39–42 % от эталона, а для 22–35 вв. – 47–62 %.

Таким образом, выраженность статуса климакса в растительном сообществе даже при благоприятных климатических предпосылках определяется компонентом экосистемы с наибольшим характерным временем – эдафотопом. Сравнениями с коренными сообществами установлено, что отличия эдификационной структуры сохраняются даже через 16–35 вв. саморазвития. Длительностью сукцессии не снимаются сохраняющиеся и через несколько тысячелетий различия в продуктивности, обусловленные онтогенетической зрелостью почв [18]. И если для квазиклимаксного состояния растительных сообществ могут быть установлены конкретные хронологические рамки, то равновесные состояния эдафотопы гетерохронны: у почв, в частности, максимумы процессов выщелачивания (декарбонатизации), гумусонакопления и аккумуляции ила отличаются на порядки [19].

Эволюцию следует понимать как непрерывное постепенное упорядочение, т. е. усложнение почвы или почвенного покрова в процессе саморазвития [20]. Онтогенетическое развитие почвы представляет собой нелинейный процесс, который характеризуется сложной последовательностью неравновесных динамических переходов к равновесному (квазиклимаксному) состоянию. Общий характер онтогенетического развития почвы как биокосной системы может быть описан моделями роста, уже апробированными для био- и экологических систем.

Введем следующие обозначения: H – мощность гумусового горизонта почв, мм; H_{lim} – предельная мощность гумусового горизонта H в конкретных биоклиматических условиях для определенного гранулометрического состава почвообразующих пород, мм; t – время почвообразования, годы; λ – константа, зависящая от биоклиматических условий почвообразования.

Учитывая, что общая направленность изменения ресурсных характеристик почв (мощности гумусового горизонта (H) и содержания (запасов) гумуса (Γ) в нем) на протяже-

нии голоцена зависит, прежде всего, от зонально-провинциального уровня предельных значений почвенных параметров (H_{lim} , Γ_{lim}) и функции времени ($F(t)$), каждый из этих процессов, в частности процесс формирования гумусового горизонта, можно записать в виде

$$dH/dt = H'_t = \lambda H_{\text{lim}} F(t). \quad (1)$$

Для обоснования вида функции времени возможна аналогия направленного развития морфогенетических процессов в автоморфных почвах на протяжении голоцена [21] с общей закономерностью ростовых процессов в экосистемах. Графически оба процесса отображаются S -образными (сигмоидными) кривыми. Среди аппроксимирующих их функций – логистической и Гомпертца [22] – последняя представляется более предпочтительной из-за ее асимметрии, что выражается в большей растянутости верхней ветви (затухание роста происходит медленно). Поэтому процесс формирования гумусового горизонта можно представить в виде

$$H_t = H_{\text{lim}} (\exp(-e^{a+\lambda t})), \quad (2)$$

где a – константа. Тогда первую производную можно представить следующим образом:

$$H'_t = -\lambda H_{\text{lim}} e^{a+\lambda t} \exp(-e^{a+\lambda t}). \quad (3)$$

После интегрирования (3) и перехода к временной шкале голоцена зависимость формирования гумусового горизонта во времени приобретет вид

$$H_t = H_{\text{lim}} (\exp(-\exp(a + \lambda t)) - \exp(-\exp(a - 2000\lambda))), \quad (4)$$

где t изменяется от -2000 до 0 (предыстория почв) и от 0 до $10\,000$ лет (голоценовая история). Заметим, что на этапе предыстории процесс приобретения материнскими породами первичного плодородия носит вероятностный характер из-за палеогеографических реконструкций, основанных на косвенных данных.

Применительно к прикладным задачам аналитический вид кривой, наиболее адекватно представляемый уравнением (4), может быть несколько упрощен. С этой целью запишем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными следующего вида:

$$dH/dt = \lambda(H_{\text{lim}} - H(t)), \quad (5)$$

где $H_{\text{lim}} - H(t)$ – зональная величина потенциала процесса формирования гумусового горизонта, скорость которого определяется коэффициентом λ .

После интегрирования получим уравнение вида

$$\ln|H(t) - H_{\text{lim}}| = -\lambda t + \ln C. \quad (6)$$

Полагая, что при $t = 0$ и $H(t) = 0$, определим значение константы C :

$$C = H_{\text{lim}} \exp(t_0 \lambda). \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) получим уравнение

$$H_t = H_{\text{lim}} (1 - \exp(t_0 \lambda) \exp(-\lambda t)), \quad (8)$$

которое после замены $\exp(t_0 \lambda)$ на k приобретает вид обычной экспоненциальной функции

$$H_t = H_{\text{lim}} (1 - k \exp(-\lambda t)), \quad (9)$$

где k может быть интерпретировано как уровень первичного плодородия почвообразующих пород (для полногумусовых почв) или начального количества органического вещества для культурных слоев и насыпных субстратов антропогенного генезиса; λ – коэффициент процессной динамики, который имеет размерность, обратную времени (1/год).

Отмечено [23], что экспоненциальные режимы роста соответствуют не только развитию, которое происходит при постоянных внутренних и внешних условиях, но и при изменении условий в определенных диапазонах, не превосходящих некоторые критические значения.

По данным региональных почвенно-хронологических исследований по уравнению (9) нами проведена «калибровка» модели развития гумусового горизонта черноземов южно-степной подзоны (H_t) во времени (t) с расчетом региональных параметров.

Зависимость, графически показанная на рис. 2, наиболее адекватно отражается аналитической формулой вида

$$H_t = 800 (1 - 0,931 e^{-0,00026 t}), \quad (10)$$

где H_t – мощность гумусового горизонта, мм; t – возраст почвы, годы; e – основание натурального логарифма ($e = 2,718$).

При анализе хронологических рядов становятся очевидными стадийность развития почвы и гетерохронность ведущих процессов почвообразования [24]. Существенное влияние на последовательность стадий педогенеза оказывает достижение экосистемами относительной “зрелости” продукционно-деструкционных процессов, с которыми тесно связана интенсивность протекания группы элементарных почвенных процессов метаморфизма органического вещества. Период быстрого роста продуктивности фитоценоза ($n \cdot 10, n \cdot 100$ лет) сопровождается (с учетом инерционности почв) преобладанием процессов аккумуляции гумусовых веществ над их закреплением в глубине профиля. Стабилизация продукционной способности фитоценозов на квазиклиматском уровне обуславливает переход развития почвы к стадии “медленного роста” с относительным преобладанием элювиальных процессов ($n \cdot 1000$ лет). Особенностью этой стадии является близкое к завершению формирования в профиле парагенетической совокупности горизонтов и других диагностических признаков зональной почвы, что характеризует период “зрелости” почвы [25].

Для начального этапа развития почв (первые десятилетия) величины скоростей почвообразования на два порядка больше, чем для почв тысячелетнего возраста. Это свидетельствует о высокой способности природных геосистем восстанавливать необходимый режим функционирования их важнейшего компонента – почвы.

С закономерностями формирования мощности гумусового горизонта новообразованных почв связаны особенности изменения других почвенных свойств. В качестве наиболее информативных можно назвать: запас органического вещества в гумусовом горизонте, степень выщелачивания карбонатов (положение линии “вскипания” от 10%-й HCl) и (или) их распределение по профилю почвы, степень “зрелости” органического вещества (соотношение гуминовых и фульвокислот, содержания углерода и азота), степень развития почвенной структуры, перераспределение глинистых частиц по профилю и др.

Сопоставление морфологической зрелости их гумусовых горизонтов новообразованных почв свидетельствует о закономерном про-

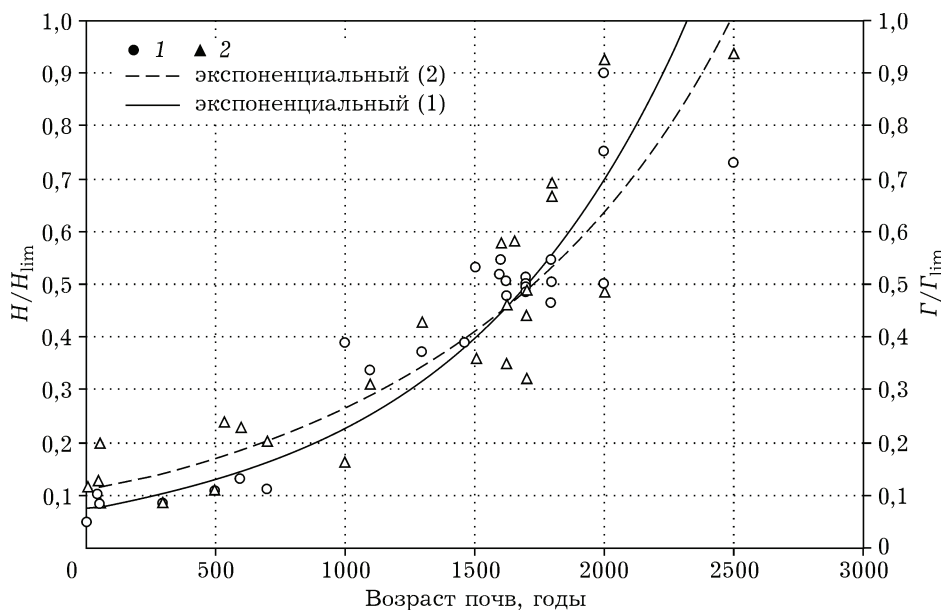


Рис. 3. Изменение мощности гумусового горизонта и запасов гумуса в почвах Керченско-Таманского региона: 1 – фактические значения мощности гумусового горизонта, нормированные по его предельному значению (H/H_{lim}); 2 – фактические значения запасов гумуса, нормированные по его предельному значению (Γ/Γ_{lim})

грессивном развитии этого признака в последние 2500 лет почвообразования. Средняя скорость формирования гумусового горизонта степных черноземов за указанный период составляет 0,16 мм/год, что сопоставимо с аналогичным показателем для более благоприятных биоклиматических условий лесостепной зоны [26]. Объяснением этому может служить высокая подвижность новообразованного органического вещества по профилю степных почв в условиях интенсивного ее промачивания в периоды с низким испарением. В целом развитие гумусового профиля исследованных почв характеризуется довольно быстрым достижением квазиравновесного состояния (по мощности, содержанию гумуса). В новообразованных почвах обогащенность азотом, как правило, средняя и высокая (менее 8).

Значительно окарбонатенные культурные слои археологических памятников в условиях климата южной степи начинали подвергаться выщелачиванию уже в первые десятилетия после начала почвообразования. За период 1000–1500 лет в гумусовом профиле почв может быть достигнута предельная степень выщелачивания от карбонатов. Исследованные почвы характеризуются щелочной

реакцией почвенного раствора, причем возрастные различия этого показателя слабо выражены. Это объясняется геохимической спецификой ландшафтов, испытывающих постоянное воздействие щелочных ионов морских аэрозолей при исходной высокой щелочности почвообразующих пород.

Сопоставление закономерностей формирования гумусового горизонта степных почв и запасов гумуса в нем (рис. 3) позволило оценить временной интервал, на котором процессы гумусонакопления и морфологической зрелости почвенного профиля становятся относительно равновесными, – 1700–1900 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направленное во времени развитие морфогенетических процессов в почвах и, прежде всего, формирование гумусового горизонта почв – это имманентно детерминированная тенденция, аналогия которой усматривается в закономерностях протекания ростовых процессов в экосистемах. Определяющую роль в процессе воспроизводства почв имеет биогеохимический цикл, включающий комплекс процессов поступления органических остатков, их трансформации, минерализации

и гумификации. В биоклиматических условиях степной зоны (при коэффициенте увлажнения 0,4–0,5) через 2–3 тысячелетия экологической ренатурации антропогенно преобразованных геосистем надземная фитомасса в автогенных сукцессиях достигает величин, которые в относительном выражении составляют 80–84 % от среднемноголетней продуктивности экосистем коренного облика. К этому времени среднегодовые темпы депонирования энергетических запасов органического вещества в гумусовом горизонте почв достигают 3,1 МДж/м².

Формирование достаточного по массе и разнообразного по биохимическому составу растительного вещества определяет динамические параметры процесса гумусонакопления, определяющие его опережающие скорости над формированием гумусового горизонта степных почв на протяжении периода до 1700–1800 лет. Этому возрасту почв соответствует толща гумусированного профиля степных черноземов, наиболее насыщенная корнями, – 32–33 см, что составляет 52–54 % от предельной мощности. Затем (через 1800–1900 лет), по-видимому, морфоструктурная организация почвенного профиля дополняется более активно включенными в процесс почвообразования процессами: выщелачиванием, миграцией продуктов гумификации и др. С возрастом сукцессии, увеличением роли многолетних видов формируются локальные каналы в профиле почв (ходы корней, трещины, поверхности макроагрегатов и т. п.), по которым (а не фронтально) происходит миграция органических веществ.

Смены почвенно-растительного покрова, представленные во временном диапазоне $n \cdot 10 - n \cdot 1000$ лет, могут рассматриваться в качестве пространственно-временных моделей процесса ренатурации степных экосистем в режиме, близком к природному воспроизводству их биологических и биокосных компонентов.

Автор выражает искреннюю благодарность за помощь в проведении полевых исследований П. В. Голуусову, О. А. Чепелеву (Белгород), Г. П. Гарбузову (Ростов-на-Дону), а за поддержку в организации работ В. Н. Зинько (Керчь) и сотрудникам Таманского археологического музея. Работа выполнена при поддержке грантов НИУ БелГУ.

1. Добровольский Г. В., Никитин Е. Д. Сохранение почв как незаменимого компонента биосферы. М.: Наука, МАИК "Наука/Интерпериодика", 2000. 185 с.
2. Соловиченко В. Д., Лукин С. В., Лисецкий Ф. Н., Голуусов П. В. Красная книга почв Белгородской области. Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. 139 с.
3. Лисецкий Ф. Н. Региональная Красная книга почв и охрана степных экосистем // Степной бюл. 2007. № 23–24. С. 50–52.
4. Moysiienko I., Sudnik-Wójcikowska B. The flora of kurgans in the steppe zone of Southern Ukraine – phytogeographical and ecological aspects // Polish Botanical Studies. 2006. Vol. 22. P. 387–398.
5. Alexander M. Management planning for nature conservation: a theoretical basis & practical guide. Dordrecht; London: Springer, 2008. 425 p.
6. Дергачева М. И. Экология почв: становление новой науки биосферного класса // Сиб. экол. журн. 2009. № 2. С. 143–150.
7. Никонов А. А., Пахомов М. М., Черкинский А. Е., Чичагова О. А. К палеогеографии Керченского полуострова в голоцене и в конце позднего плейстоцена // ДАН. 1993. Т. 328, № 2. С. 221–225.
8. Маринич А. М., Пащенко В. М., Шищенко П. Г. Природа Украинской ССР. Ландшафты и физико-географическое районирование. Киев: Наук. думка, 1985. 224 с.
9. Дідух Я. П., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Ковиловий степ Чигини (Крим) // Укр. ботан. журн. 1980. Т. 37, № 4. С. 79–84.
10. Блажний Е. С. Почвенный очерк Таманского полуострова. Краснодар, 1926. 31 с.
11. Мильков Ф. Н. Проблема реликтов в физической географии // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1989. № 6. С. 5–15.
12. Болгов Н. Н. Боспор Киммерийский. Белгород: Издательство БелГУ, 2003. 80 с.
13. Лисецкий Ф. Н., Голуусов П. В., Чепелев О. А. и др. База почвенно-хронологических данных. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2010620434. Зарег. в Реестре баз данных 16.08.2010 г.
14. Лисецкий Ф. Н., Ергина Е. И. Развитие почв Крымского полуострова в позднем голоцене // Почвоведение. 2010. № 6. С. 643–657.
15. Лисецкий Ф. Н. Периодизация антропогенно обусловленной эволюции степных экосистем // Экология. 1992. № 5. С. 17–25.
16. Громова В. С. Разложение растительного опада сухостепной зоны под влиянием различных факторов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1978.
17. Веденьков Е. П. Научное обоснование режима охраны степного заповедника "Аскания-Нова" // Проблемы охраны генофонда и управления экосистемами в заповедниках степной и пустынной зон. М., 1984. С. 78–81.
18. Лисецкий Ф. Н. Автогенная сукцессия степной растительности в постантитных ландшафтах // Экология. 1998. № 4. С. 252–255.
19. Jenny H. The soil resource. Origin and Behavior. New York – Heidelberg – Berlin, 1980. 377 p.
20. Рожков В. А. Организационный аспект эволюции почв // Эволюция почвенного покрова. История идей и методы, голоценовая эволюция, прогнозы. Пуццино, 2009. С. 37–39.

21. Лисецкий Ф. Н. Модель трендовой составляющей голоценового почвообразования // Докл. АН Украины. Математика, естествознание, технические науки. 1994. № 11. С. 149–152.
22. Шмидт В. М. Математические методы в ботанике. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 288 с.
23. Жирмунский А. В., Кузьмин В. И. Критические уровни в развитии природных систем. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 223 с.
24. Геннадиев А. Н. Почвы и время: модели развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 232 с.
25. Goleusov P., Lisetskii F. Soil development in anthropogenically disturbed forest-steppe landscapes // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41, N 13. P. 1480–1486.
26. Голусов П. В., Лисецкий Ф. Н. Воспроизводство почв в антропогенно нарушенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 2009. 232 с.

Soil Reproduction in Steppe Ecosystems of Different Age

F. N. LISETSKII

*Belgorod State National Research University
308015, Belgorod, Pobedy str., 85
E-mail:liset@bsu.edu.ru*

Features of the development of the steppe chernozems were established, based on the study of soils of different age groups on archaeological sites. Differences in the formation of phytomass and morphological maturity of the soil profile in different age successions recovery were shown. Regional model of the humus horizon steppe soil over time allowed us to estimate the time interval at which the processes of humus accumulation and morphological maturity of the soil profile are relatively equilibrium – 1700–1900 years.

Key words: steppe ecosystem, the reproduction of soils, human disturbance, archaeological monuments, Late Holocene.