

состоянии с последующим промыванием водой или слабощелочными растворами.

Длительное применение минеральных и больших норм органических удобрений усиливает элювирование профиля дерново-подзолистых супесчаных почв Украинского Полесья.

В результате антропогенного элювирования почва теряет слабобуферную часть тонкодисперсного материала с частичным его переотложением в нижней части профиля. Оставшиеся коллоиды характеризуются повышенным содержанием гумуса, большими размерами и значительной емкостью поглощения.

Антропогенное элювирование является деградационным процессом, снижающим естественное плодородие дерново-подзолистых почв.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние разных доз удобрения на пептизируемость илистой фракции и минералогический состав в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве / А. Д. Хлыстовский, Н. П. Чижикова, Б. П. Градусов, Н. Корнеевко // *Агрохимия*.— 1988.— № 3.— С. 65—68.
2. *Воронин А. Д.* Основы физики почв.— М.: Изд-во МГУ, 1986.— 244 с.
3. *Горбунов Н. И.* Почвенные коллоиды и их значение для плодородия.— М.: Наука, 1976.— 167 с.
4. *Гумматов Н. Г., Пачепский Я. А.* Современные представления о структуре почв и структурообразовании.— Пушкино, 1991.— 32 с.
5. Минеральный состав и структурные особенности минералов дерново-подзолистых почв и их изменение под влиянием длительного применения удобрений / В. В. Прокошев, Н. П. Чижикова, Б. П. Градусов, С. С. Бордукова // *Агрохимия*.— 1979.— № 11.— С. 32—37.
6. *Фридрихсберг Д. А.* Курс коллоидной химии.— Л.: Химия, 1984.— 368 с.

Получена редколлегией 01.11.93.

ISSN 0587-2596. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 1994. Вип. 57.

УДК 631.487 : 631.472.54

Ф. Н. ЛИСЕЦКИЙ, кандидат географических наук

Одесский государственный университет

НАПРАВЛЕННОСТЬ ПОЧВООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ГОЛОЦЕНЕ (ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Предложена математическая модель трендовой составляющей процесса формирования почв Восточно-Европейской равнины на протяжении голоцена. Модель для точки и профиля склона отражает условия тепло- и влагообеспеченности, обобщенные в энергетических затратах на почвообразование, годичную продукцию растительности, гранулометрический состав почв и время их образования.

скорость почвообразования, энергия, геоморфологические особенности, математическая модель

Из учения В. В. Докучаева о факторах почвообразования следует, что каждый из генетических типов (подтипов) почв, отражая среду, потенциально способен эволюционировать до состояния относительного равновесия с комбинацией факторов почвообразования, постоянно характеризующих соответствующую ландшафтную зону или ее часть.

Формализованное выражение докучаевской концепции пространственно-временной координации почвенной системы в ландшафте разработано Г. Иенини (1941):

$$S = f(d, o, r, p, t),$$

где S — почва или ее свойства; d — климат; o — организмы; r — топография; p — материнская порода; t — время. По мнению Д. Яалона (1992), от традиционной трактовки фактора времени как равноправного с другими факторами почвообразования целесообразно перейти к отражению множественности его проявления в макропроцессах:

$$S = f \left(P_1 \frac{dE}{dt}, \frac{dF}{dt}, \frac{dA}{dt}, \frac{dM}{dt} \right),$$

где E — почвообразование и эрозия; F — транспорт и миграция; A — аккумуляция; M — преобразование. При такой близкой к «неодокучаевской» трактовке сущность почвообразования усматривается в изменениях самой почвы, обусловливаемой специфичной почвенных процессов, а не взаимодействиями факторов (Зонн С. В., Травлев А. П., 1989).

В связи с тем, что почвы опосредствуют роль и влияние факторов почвообразования по-разному, они развиваются и эволюционируют с различной скоростью.

На представлении о стадии временного замедления развития при квазистационарном состоянии независимых факторов (рельеф, климат, биота) основана концепция климаксовой почвы. Причем, как справедливо отмечает А. Н. Геннадиев (1990), не следует синхронизировать процесс поликлиматичности с процессом политипности, поскольку кривая развития почв имеет ступенчатый характер по отношению к классификационным представлениям, но не является ступенчатой в хронологическом плане.

При рассмотрении основной тенденции (тренда) голоценового развития автоморфных типов почв главные закономерности современной почвенно-географической зональности хорошо отражаются в достижении почвой соответствующих предельных значений важнейших ее агросурсовых характеристик — мощности гумусового горизонта и содержания (запасов) гумуса в нем. Гипотетическое представление о направленности ресурсоформирующих процессов в ходе голоценового почвообразования приводит к рассмотрению S-образных кривых. Применение подобного рода функций к описанию почвообразовательного процесса, на наш взгляд, оправдано при рассмотрении всего голоцена, с интерпретацией его субарктического периода (по Блитт-Сернандеру) как предыстории формирования современного почвенного покрова. Соответственно на нуль-моменте почвообразования (10 000 лет назад) предполагается наличие у почвообразующих пород первичного плодородия. Его оценка, помимо очевидного теоретического и прикладного значения, становится одним из условий получения устойчивого решения уравнений, описывающих почвообразовательный процесс.

Общая направленность изменения ресурсных характеристик почв на протяжении голоцена зависит, прежде всего, от зонально-провинциального уровня предельных значений почвенных параметров и функций времени ($F(t)$). Учитывая это, каждый из ресурсоформирующих процессов, в частности процесс формирования гумусового горизонта, можно записать в виде:

$$dH/dt = H_t' = \lambda N_{np} F(t), \quad (1)$$

где λ — коэффициент, зависящий от биоклиматических условий почвообразования. Для обоснования вида функции времени возможна аналогизация тренда голоценовой эволюции ресурсоформирующих процессов в автоморфных почвах с общей закономерностью ростовых процессов в экосистемах, которые

в обоих случаях подчиняются ходу S-образных кривых. Среди аппроксимирующих их функций — логистической и Гомпертца (Шмидт В. М., 1984) последняя представляется более предпочтительной из-за ее асимметрии, выражающейся в большей растянутости верхней ветви (затухание роста происходит медленно). Исходя из этого, процесс формирования гумусового горизонта можно представить в следующем виде:

$$H_t = H_{np} (e^{-e^{a+lt}}),$$

где a — константа. Тогда первую производную получим в виде

$$H'_t = -\lambda H_{np} e^{a+lt} \cdot e^{-e^{a+lt}} \quad (2)$$

После интегрирования (2) и перехода к временной шкале голоцена общей продолжительностью 12 000 лет получим:

$$H_t = H_{np} (e^{-e^{a+lt}} - e^{-e^{a-2000\lambda}}), \quad (3)$$

где t изменяется от -2000 до 0 (предыстория почв) и от 0 до 10 тыс. лет (голоценовая история). Аналитический вид части кривой, выражаемой уравнением (3), в интервале времени от 0 до $10\,000$ лет применительно к прикладным задачам может быть значительно упрощен. С этой целью запишем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными следующего вида:

$$dH/dt = \lambda(H_{np} - H) + \varphi(t, H, H(\cdot)), \quad (4)$$

где оператор функция $\varphi(t, H, H(\cdot))$ — функция возмущения (белый шум), характеризующая иерархически организованную систему циклических изменений процесса почвообразования под влиянием ритмики астроклиматических и атмосферных процессов (разработки автора по этой проблеме требуют специального сообщения и здесь не рассматриваются).

После интегрирования получим уравнение вида —

$$\ln/H - H_{np}/ = -\lambda t + \ln c. \quad (5)$$

Полагая, что при $t = -2000$ лет $H = 0$, определим значение константы c .

$$c = H_{np} \cdot e^{-2000\lambda}. \quad (6)$$

Теперь, после подстановки (6) в (5) получим уравнение:

$$H = H_{np} (1 - e^{-2000\lambda} \cdot e^{-\lambda t}),$$

которое после замены $e^{-2000\lambda}$ на k приобретет вид обычной экспоненциальной функции:

$$H = H_{np} (1 - k e^{-\lambda t}), \quad (7)$$

где k характеризует зональные уровни первичного плодородия почвообразующих пород в нуль-момент почвообразования, достигнутые за период предыстории; λ — коэффициент, имеет размерность, обратную времени ($1/\text{год}$).

Допустимость упрощения функции Гомпертца экспоненциальной функцией при выявлении в процессе формирования гумусового горизонта основной детерминированной тенденции временного ряда на интервале $0 \div 10\,000$ лет определена по массиву педохронологических данных ($N=82$) для черноземов обыкновенных Восточно-Европейской равнины. Сопоставление полученных по

моделям (3) со сдвигом нуля к началу древнего голоцена (на 2000 лет) и (7) уравнений:

$$H_1 = 1000e^{-e^{1,09-0,00026t_1}}, \quad t_1 = 0 + 12000;$$

$$H_2 = 1000(1 - 0,84e^{-0,00016t_2}), \quad t_2 = 0 + 10000$$

показало, что разность расчетных значений мощности для последних 10 тыс. лет по непараметрическому критерию Вилкоксона незначительна на 5%-м уровне значимости. Однако ошибка отклонения от регрессии при использовании экспоненциальной функции в 1,6 раза меньше, чем при аппроксимации тех же данных функцией Гомпертца. Это дало возможность систематизировать разрозненные педохронологические данные, накопленные по основным зональным типам (подтипам) почв Восточно-Европейской равнины, в виде экспоненциальных функций изменения мощности гумусового горизонта в ходе онтогенетического развития почв (Лисецкий Ф. Н., 1990). По сравнению с более ранними работами привлечения оригинальных почвенно-хронологических определений по территории Украинского Причерноморья (изучено более 90 археологических памятников XXXIII в. до н. э.—XVIII в. н. э.) позволило автору значительно увеличить количество анализируемых данных (до 430). При обработке этих материалов и литературных данных получены следующие зональные значения эмпирических параметров λ и k : $28 \cdot 10^{-5}$ и $0,76$ соответственно для подзолистых, дерново-подзолистых почв, $24 \cdot 10^{-5}$ и $0,90$ для черноземов Лесостепи, $18 \cdot 10^{-5}$ и $0,89$ для черноземов обыкновенных, $19 \cdot 10^{-5}$ и $0,85$ для черноземов южных и темно-каштановых почв, $26 \cdot 10^{-5}$ и $0,74$ для каштановых, светло-каштановых, бурых пустынно-степных почв.

Для получения обобщенной зависимости мощности гумусового горизонта зональных почв от времени выразим предельные значения гумусового горизонта через энергетические затраты на почвообразование — функцию Q В. Р. Волобуева. По обобщенным нами данным, включавшим фациальные параметры предельной мощности гумусового горизонта автоморфных почв Восточно-Европейской равнины ($H_{пр}$, мм) для отдельных градаций гранулометрического состава и соответствующие показатели тепло- и влагообеспеченности почвенных районов ($N=282$), получена зависимость вида:

$$H_{пр} = 10,85 \cdot g \cdot e^{0,0044Q}, \quad \eta \pm t_{05}S_{\eta} = 0,72 \pm 0,08,$$

где g — поправочный коэффициент на гранулометрический состав почв (1 — средне- и тяжелосуглинистые; 1,4 — супесчаные и песчаные; 0,95 — легкосуглинистые; 0,72 — глинистые). Такая парная зависимость оправдана только при полной реализации энергетического эквивалента потенциала гидротермических условий в зональной величине растительной продукции. Используя обобщенные данные по Восточно-Европейской равнине и собственные исследования 1981—1991 гг. на территории Северного Причерноморья ($N=70$), мы получили зависимость средней годичной продукции в почвенно-растительных формациях — F_z , $t \cdot ga^{-1} \cdot год^{-1}$ (в сухой массе) от энергетических затрат на почвообразование (Q):

$$F_z = 8,7 \cdot 10^{-8} \cdot Q^{2,69}, \quad \eta \pm t_{05}S_{\eta} = 0,85 \pm 0,13.$$

Антропогенно обусловленные различия в величине поступления растительных остатков в отдельные историко-экологические периоды голоцена определяют целесообразность выражения этих различий с помощью отношения фактической продукции растительности (F_f) к зональной — климатически обусловленной (F_z).

Учитывая зависимость мощности гумусового горизонта автоморфных почв от зонально-провинциальных ресурсов тепло- и влагообеспеченности, поступления растительного вещества, времени и гранулометрического состава поч-

вообразующих пород, получим итоговую запись трендовой составляющей процесса формирования гумусового горизонта:

$$H = 10,85g (F_1/F_2)^{0,37} \cdot e^{0,0044Q} (1 - ke^{-\lambda t}). \quad (8)$$

С использованием уравнения (8) могут быть получены два вида оценок скорости формирования гумусового горизонта, применимых как нормативные показатели в практике почвозащитного проектирования. Во-первых, это потенциальные скорости воспроизводства почвенного ресурса, определяемые, прежде всего, онтогенетической зрелостью почвенного профиля. Аналогизация разновозрастных почв с профилями, испытавшими водно-эрозионные и деформационные деформации и находящимися под мелиоративными воздействиями с вещественно-энергетическим потенциалом зонального почвообразования, позволяет использовать нормативы воспроизводства почв, представленные в таблице. Второй вид оценок — скорость рецентного почвообразования — отражает почвообразовательный потенциал современных зональных биоклиматических условий на материнской породе, поднятой к дневной поверхности прямым или косвенным антропогенным влиянием. Учитывая нелинейный характер формирования почвенного профиля на этапе становления, наиболее корректным следует признать способ дискретных оценок скоростей рецентного почвообразования по хроноинтервалам, используя уравнение (8). Но для общей экспертизы эффективности и приемлемых сроков осуществления программ по консервации разрушенных земель путем их залужения или лесомелиорации, рекультивации постпромышленных ландшафтов и т. п. представляют интерес среднегодовые скорости рецентного почвообразования, рассчитанные для периода, обеспечивающего формирование первых 20 см плодородного слоя почвы (см. табл.).

Для перехода от оценки мощности гумусового горизонта (H) в точке водораздела, отражаемой моделью (8), к распределению H по профилю склона, воспользуемся записью среднего значения непрерывной функции:

$$\bar{H}(L) = \frac{1}{L} \int_0^L H(l) dl, \quad (9)$$

где $\bar{H}(L)$ — средняя мощность гумусового горизонта почвы до сечения, удаленного на расстоянии L от водораздела; H(l) — мощность в произвольном сечении склона, расположенного на расстоянии l от водораздела.

Мощность гумусового горизонта ($\bar{H}(L)$, мм) для топокатены с одновозрастным почвенным покровом может быть рассчитана по формуле, полученной путем подстановки (8) в (9):

$$\bar{H}(L) = \frac{1}{L} \int_0^L [10,85 \cdot g (F_1/F_2)^{0,37} \cdot e^{0,0044Q} (1 - ke^{-\lambda t})] dl. \quad (10)$$

В случае, если рассматривается топокатена с полнолощенными почвами, то за счет группировки постоянных величин выражение (10) можно представить в следующем виде:

$$\bar{H}(L) = \frac{A}{L} \int_0^L (g(l) \cdot F_1^{0,37}(l) \cdot e^{0,0044Q(l)}) \cdot dl, \quad (11)$$

где A — коэффициент. По усредненным данным применительно к территории Причерноморья Украины для черноземов Лесостепи он равен 3,7, для черноземов обыкновенных — 3,8, для черноземов южных и темно-каштановых почв — 4,4, для каштановых почв — 6. Вычисления по формуле (11) допустимо проводить с помощью известных методов численного интегрирования

Средняя скорость формирования гумусового горизонта почв разной степени смытости (дефлированности) и скорость рецентного почвообразования (V_R) — в числителе (мм/год), в знаменателе (т/га в год при плотности сложения 1,2 т/м³)

Почвы	Степень смытости (дефлированности)			V_R
	слабая	средняя	сильная	
Подзолистые, дерново-подзолистые	0,04	—	—	0,06
	0,47			0,7
Черноземы Лесостепи	0,05	0,11	0,18	0,33
	0,59	1,30	2,22	4,0
Черноземы обыкновенные	0,05	0,09	0,15	0,22
	0,54	1,06	1,82	2,6
Черноземы южные, темно-каштановые	0,04	0,08	0,11	0,19
	0,50	0,95	1,35	2,3
Каштановые, светло-каштановые, бурые пустынно-степные	0,02	0,05	0,07	0,09
	0,27	0,55	0,88	1,1

(формулы трапезий, Симпсона и др.). Для перехода от оценок по профилям к оценкам по площади склона следует использовать двойное интегрирование, учитывающее склоново-поперечную размерность в распределении характеристик факторов почвообразования.

Таким образом, в количественной оценке результата естественного почвообразовательного процесса, отраженного в пространственно распределенных величинах мощности гумусового горизонта склоновых почв, определяющими параметрами могут быть приняты: условия тепло- и влагообеспеченности, синтезированные в оценке затрат энергии на почвообразование; чистая первичная продукция парагенетических склоновых фитоценозов и изменение гранулометрического состава почвообразующих пород. Сложная зависимость годового прироста растительности от совокупности климатических характеристик вертикальных склоновых микрозон, значительное увеличение по сравнению с плакорами территориального разнообразия сообществ затрудняет получение приемлемых по точности расчетных значений параметра F_1 . В этой связи возможно использование отношений между показателями биологической продуктивности ландшафтов (Утехин В. Д., 1971). Так, для перехода от первичной биомассы надземных зеленых частей (принятой за 1) к чистой первичной продукции для луговой степи рекомендован коэффициент 1,71, для сухой — 2,8. По данным Н. И. Базилевич (1986), для перехода к оценкам продукции фитомассы в умеренно засушливой, засушливой и сухой степи следует величины мортмассы умножать на коэффициенты соответственно 1,43; 1,25 и 1,11.

В расчете величины радиационных затрат на почвообразование (Q) применительно к разноэкспонированным склонам различной крутизны не вызывает затруднений оценка радиационного баланса. Для этого в микроклиматологии созданы расчетные методики составляющих баланса, но можно воспользоваться и поправочными коэффициентами [7] представляющими отношение средних суточных сумм радиационного баланса склонов к соответствующим суммам радиационного баланса горизонтальной поверхности.

Более сложная задача, чем оценка условий теплообеспеченности, заключается в редукции параметра P (среднегодовое количество осадков) формулы

В. Р. Волобуева (1974) в «эффективные осадки», т. е. ту часть атмосферной влаги, которая впитывается в почву и участвует в почвообразовании. Исходя из общей записи уравнения водного баланса склона (Швебс Г. И., 1981), для оценки эффективных осадков в период их выпадения наиболее важными составляющими являются процессы стока, инфильтрации, а в отдельных случаях и поверхностного задержания в естественных углублениях.

Оценку величины склонового стока можно получить расчетным методом либо, как предложено Г. И. Швебсом (1981, с. 139), по разнице между осадками и изменениями влагозапасов за период промачивания почвы. В последнем случае, используя работы [8, 10 и др.], можно получить относительную оценку влагозапасов в зависимости от экспозиции, крутизны, длины, формы склона и его эродированности, соотнесенной с условиями плакоров.

Выводы. Применяя модели Г. И. Швебса, можно рассчитать потенциальную мощность гумусового горизонта, сформированного в течение голоцена и по отдельным хроносрезам на различных местоположениях склона. При этом в значительной степени элиминируется влияние на гумусовый профиль водно-эрозийного процесса, что дает возможность оценки скорости естественного почвообразовательного и эрозийного процессов по реконструкциям морфологического строения почвенных профилей. Не имеет принципиальных отличий и оценка скорости почвообразовательного процесса для обрабатываемых склонов с применением модели Г. И. Швебса. Однако для этого потребуются экспериментальные или надежные расчетные значения среднегодового модуля поверхностного смыва и дефляции почв за период сельскохозяйственного использования земель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Базилевич Н. И.* Биологическая продуктивность почвенно-растительных формаций СССР // Изв. АН СССР. Сер. географ.— 1986.— № 2.— С. 49—67.
2. *Волобуев В. Р.* Введение в энергетику почвообразования.— М.: Наука, 1974.— 127 с.
3. *Геннадиев А. Н.* Почвы и время: модели развития.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990.— 229 с.
4. *Зонн С. В., Травлев А. П.* Географо-генетические аспекты почвообразования, эволюции и охраны почв.— К.: Наук. думка, 1989.— 216 с.
5. *Иенни Г.* Факторы почвообразования (1941): Пер. с англ.— М.: Изд-во иностр. лит., 1948.— 347 с.
6. *Дисецкий Ф. Н.* Закономерности формирования гумусового горизонта зональных почв Русской равнины // Агрохимия и почвоведение.— 1990.— Вып. 53.— С. 3—7.
7. Методические указания по обобщению результатов микроклиматических исследований для целей сельскохозяйственного производства.— Л.: Гидрометеониздат, 1967.— 87 с.
8. *Микроклимат СССР.*— Л.: Гидрометеониздат, 1967.— 286 с.
9. *Утегин В. Д.* О методах исследования биологической продуктивности ландшафта // Методика ландшафтных исследований.— Л., 1971.— С. 44—62.
10. *Швебс А. В.* Распределение запасов влаги на склонах в зависимости от рельефа и эродированности почв // Метеорология, климатология и гидрология.— 1968.— Вып. 3.— С. 172—178.
11. *Швебс Г. И.* Теоретические основы эрозиоведения.— К.; Одесса: Выща шк., 1981.— 222 с.
12. *Шмидт В. М.* Математические методы в ботанике.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984.— 288 с.

Получена редколлегией 12.09.93.