

УДК 631.481:631.413.5

**ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГИСТЕРЕЗИСА
ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ**

Н. П. ПАНОВ, В. И. САВИЧ, И. М. ГАББАСОВА
(Кафедра почвоведения)

Почва является многофазной гетерогенной системой. В связи с этим воздействие внешних факторов (влажности, температуры) на свойства почвы носит многоступенчатый характер. Ответная реакция почв на воздействие внешних факторов проявляется несколько позднее

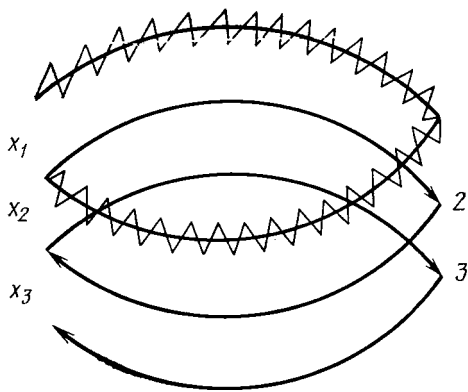
самого воздействия, т. е. как бы запаздывает по времени. Такое явление запаздывания называется гистерезисом и отмечается у почв [1, 2, 8, 9, 10].

Значения гистерезиса по факторам, определяющим окислительно-восстановительный потенциал (E_h), в конечном итоге могут служить интегральной характеристикой гистерезисных явлений почвы. Изучение гистерезиса, изменений E_h при воздействии влажности и температуры необходимо для определения сезонной динамики E_h и установления зависимостей E_h от факторов, его определяющих.

Знание размера гистерезиса позволяет более точно прогнозировать изменения свойств почв при орошении и осушении и судить о генетических изменениях. Сезонные изменения свойств почв, связанные с варьированием влажности и температуры, складываются из обратимых гистерезисных изменений, временно необратимых изменений (остаточного гистерезиса) и полностью необратимых изменений. Из наличия циклов таких изменений и состоит весь почвообразовательный процесс. Рассмотрение последнего с учетом сезонной динамики внесло существенный вклад в изучение генезиса почв. Анализ процесса почвообразования с учетом гистерезиса и необратимых изменений, безусловно, перспективен, но, к сожалению, какие-либо данные по этому вопросу в литературе отсутствуют. Для проведения такого анализа по методике В. Савича необходимо построение петель гистерезиса по ряду параметров почвы на основании данных многолетней сезонной динамики или результатов модельных опытов. Если петля гистерезиса получается замкнутой, то почва находится в полностью стационарном состоянии как с точки зрения развития процесса почвообразования (этап «климакса»), так и с точки зрения биологического круговорота вещества. Если петля гистерезиса разомкнута, то это свидетельствует о наличии нестационарного состояния (нестационарность обусловлена необратимыми изменениями), о степени которого можно судить по величине разомкнутости петли.

Нестационарность состояния определяется по степени различия данной почвы и почвы, находящейся в состоянии «климакса», т. е. в равновесном состоянии, характерном для данных климатических условий и растительности [3]. Если нестационарность состояния есть отличие свойств данной почвы от свойств этой же почвы в состоянии климакса, то степень нестационарности состояния есть скорость почвообразования — скорость эволюции. Она обусловлена интенсивностью выветривания, проградации (процессом восстановления предшествующих почв) и инерцией почвообразования [1]. Интенсивность выветривания может быть оценена по скорости физико-химического процесса выветривания [3] и, с нашей точки зрения, по величине необратимых изменений свойств почв за 1 год, но по данным за ряд лет, что устраняет ошибку, связанную с явлением остаточного гистерезиса и с сезонной динамикой свойств почв. В качестве свойств почв при этом следует брать только такие, которые являются характеристическими для типов и процессов почвообразования. Мы считаем, что в этих целях можно использовать E_h и gH_2 .

Необходимо отметить, что значения параметров почв в отдельные сезоны, даже при соответствующем учете варьирования в пространстве, не совпадают по годам не только в связи с эволюцией почвы, но и в связи с изменением влажности и температуры, в связи с возможным наличием циклов климатических условий. Однако эти различия значений параметров почвы по годам обуславливают варьирование петли гистерезиса, но не устраняют последнюю. Это варьирование не устраняет и разомкнутости петли, если нестационарное состояние существует. Схема возможных изменений свойств почв при эволюции показана на рисунке. Степень разомкнутости петли X_1 , X_2 , X_3 не обяза-



Теоретическая петля гистерезиса по значению параметра почвы при ее эволюции по годам (1, 2, 3). В конкретных условиях внешний вид петли, естественно, может быть различным. Значение параметров берется при одинаковых показателях влажности и температуры, что определяется методами экстра- и интерполяции при вычислении уравнений регрессии $x=f(\omega)$; $x=f(t^\circ)$.

описано в предыдущих работах [11]. Третий показатель при учете многолетних данных и построении петли гистерезиса с экстраполяцией и интерполяцией значений параметров почв на одинаковые значения влажности и температуры указывает на степень нестационарности состояния почвы. Значение гистерезиса может быть оценено по площади его петли, а также по времени запаздывания следствия. Этот параметр может быть оценен как $r_2 - r_1$, где r_2 и r_1 — коэффициенты корреляции между причиной и следствием с учетом запаздывания изменения следствия и без него.

Со значением гистерезиса и степенью нестационарности состояния почвы связаны ее буферные свойства и их варьирование в динамике. Чем больше несоответствие почвы равновесному состоянию, тем больше значения $\frac{\Delta Eh}{\Delta \omega} \cdot \frac{\Delta Eh}{\Delta t^\circ}$; $\Delta Eh = a + b\omega + ct^\circ$, где ω — влажность, t° — температура (меньше буферность) при равной величине буферной емкости по данному параметру. К такому же выводу можно прийти при анализе значений варьирования параметров почвы по сезонам года. В данной работе значения варьирования оценивались по условному показателю $\frac{\max - \min}{\min} \cdot 100$ за год и за 2 года.

Достоверность разницы средних значений варьирования для разных почв определяли по критерию Стьюдента. Большее значение принятого условного показателя при одинаковом варьировании свойств почв в пространстве свидетельствует о большей нестационарности состояния и меньшей буферности почв по отношению к изучаемым параметрам (большой величине $\frac{\Delta x}{\Delta t}$; $\frac{\Delta x}{\Delta \omega}$, где x — один из параметров).

Нами обработаны данные многолетних исследований динамики некоторых свойств почв на стационарных площадках, проведенных И. С. Кауричевым [5], Н. П. Пановым [8] и Н. Н. Поддубным [9]. Гистерезис и факторы, с ним коррелирующие, рассчитаны также по данным модельных опытов [6].

Наиболее значительно по сезонам года варьирует содержание подвижных форм железа и особенно gH_2 . Значения Eh

только одна и та же в разные годы. Как правило, значение этого показателя должно меняться, так как при эволюции почвы меняется и степень нестационарности ее состояния. В связи с медленным изменением почв во времени установить без большой повторяемости определений степень нестационарности состояния за 2—3 года трудно. Однако это возможно при осушении и орошении почв при их распашке, химической мелиорации.

Как указывалось ранее, петля гистерезиса обусловлена собственно гистерезисом, остаточным гистерезисом и необратимыми изменениями. Первый показатель характеризует запаздывание следствия, выраженность различных форм кинетики, второй — наличие сорбционных мест ППК определенной конфигурации, обуславливающих возникновение остаточного гистерезиса, что подробно

Варьирование Eh, влажности, температуры, содержания FeO
по сезонам года ($M_V \pm m_V$)

Почва	Eh	Eh*·10*	W	t°	[Fe ²⁺]
Лугово-каштановая	14,8±3,2 (6,9±1,2)	9,0	237,2 ±35,0	546,5 ±65,5	978,8 ±289,8
Солонец луговой	14,3±1,2 (7,8±0,9)	45,8	131,0 ±6,9	243,9 ±37,8	343,9 ±215,7
Солончак луговой	16,3±5,8	227,5	17,9 ±8,3	400 ±100	287,5 ±12,5
Солодь дерновая	48,2±9,8 (20,7±1,0)	63,1	200,6 ±16,7	382,7 ±50,8	347,2 ±35,6
Дерново-подзолистая, лес	19,1±2,2	0,21**	88,6 ±14,8		5183,9 ±607,4
Дерново-подзолистая, поле	14,8±3,4	0,25**	59,9± ±13,1		955,0 ±157,3
Дерново-подзолистая, бессменный пар	18,0±1,3	0,51**	35,5 ±8,3		1662,9 ±176,9
Лугово-зернистая, целина	189,7±69,2	18,2	61,1 ±16,1	173,3 ±48,0	690,2 ±162,5
Лугово-зернистая, пашня	89,8±10,7	14,7	41,1 ±6,0	156,5 ±43,3	459,0 ±174,1
Перегноино-торфяная, целина	389,5±9,2	59,7	67,1 ±13,9	97,2 ±1,34	178,5 ±48,6
Перегноино-торфяная, пашня	698,9±342	10,2	61,9 ±6,6	114,1 ±36,4	201,3 ±26,9

* Варьирование значений Eh почв, исправленное на варьирование влажности и температуры.

** Исправление только на варьирование влажности. В скобках варьирование gH_2 .

и gH_2 обусловлены рядом почвенных систем, которые могут изменяться при изменении влажности и температуры не в одном направлении (например, при избыточном увлажнении Eh уменьшается, pH увеличивается). Можно сформулировать общее правило, выраженное следующими уравнениями.

$$V_A = f(V_x \cdot V_y) \text{ при } V_x = f(z); V_y = f(z); V_A = f(z) \quad (1)$$

при однонаправленном изменении x и y в результате изменения z ;

$$V_A = f\left(\frac{V_x}{V_y}\right) \quad (2)$$

при разном направлении изменения x и y под действием изменения z , где z — значение фактора внешней среды, воздействующего на почву; x и y — параметры почвы; A — параметр почвы, зависящий от x и y . Сезонное варьирование влажности и температуры разных почв, кроме торфяных, более значительное, чем окислительно-восстановительного потенциала, т. е. почвы более буферны в окислительно-восстановительном интервале и менее буферны по отношению к изменению температуры, влажности и содержания подвижных форм железа. Как правило, варьирование влажности и температуры в нижних горизонтах меньше, чем в верхних. Однако это не относится к Eh, gH_2 и $[Fe^{2+}]$. Несмотря на меньшие амплитуды колебания влажности и температуры в нижних горизонтах, варьирование Eh, gH_2 и $[Fe^{2+}]$ в них часто выше в связи с малой буферной емкостью этих горизонтов.

Большой размах варьирования обусловлен нестационарностью состояния почвы и малой буферностью (большим значением $\frac{\Delta x}{\Delta t}; \frac{\Delta x}{\Delta w}$) почв по отношению к изучаемому параметру (данное положение пра-

Значения коэффициентов корреляции Eh и параметров его определяющих при расчете без учета запаздывания (r_1) и с учетом запаздывания (r_2) на один срок (10—15 дней)

Почва	Параметры, коррелирующие с Eh	r_2	r_1	$r_2 - r_1$	Уравнение регрессии
Дерново-среднеподзолистая почва					
A ₁ , 9—18	W	-0,57	-0,45	-0,12	$y_{r1} = 32,8 - 0,06x$ $y_{r2} = 32,3 - 0,05x$
	Fe ²⁺	-0,35	-0,48	0,13	$y_{r1} = 29,4 - 0,10x$ $y_{r2} = 30,1 - 0,11x$
A ₂ , 19—29	W	-0,39	-0,43	0,04	$y_{r1} = 2,0 - 0,09x$ $y_{r2} = 33,3 - 0,1x$
	t°	0,37	0,52	0,15	$y_{r1} = 30,0 \pm 0,31x$ $y_{r2} = 28,3 \pm 0,41x$
Чернозем выщелоченный					
A ₁	W	0,02	-0,04	0,06	
B ₁ , 45—55	W	-0,34	-0,71	0,37	$y_{r1} = 39,3 - 0,23x$ $y_{r2} = 46,8 - 0,61x$
Лугово-зернистая (целина)					
B _q , 60—70	W	-0,53	-0,74	0,21	$y_{r1} = 7983,45 - 216,05x$ $y_{r2} = 996,5 - 15,6x$
B _q , 100—110	W	0,04	-0,38	0,42	
C, 130—140	W	-0,72	-0,83	0,11	$y_{r1} = 2544,75 - 67,33x$ $y_{r2} = 3181,68 - 86,9x$
Лугово-зернистая (пашня)					
B _q , 30—40	W	-0,27	-0,68	0,41	$y_{r1} = 1362,5 - 25,4x$
B _q , 50—70	W	-0,12	-0,69	0,57	$y_{r2} = 1005,6 - 12,4x$
Перегноино-торфяная (целина)					
A ₁ , 20—30	t°	-0,17	-0,71	0,56	
A _т , 60—70	W	0,04	-0,70	0,66	$y_{r1} = 938,4 - 1,7x$
A _б , 110—120	W	-0,51	-0,74	0,23	$y_{r2} = 527,1 - 0,8x$
	Fe ²⁺	0,13	-0,45	0,58	
Торфяно-глеевая (пашня)					
A _{т.пах}	Fe ²⁺	0,25	-0,37	0,62	
B _д , 60—70	W	-0,31	-0,57	0,26	
A _т , 80—90	W	0,23	-0,45	0,68	
C, 130—140	t°	-0,42	-0,74	0,32	

П р и м е ч а н и е. Уравнения регрессии приведены только для r , достоверных при $P = 0,95$; $r_2 - r_1$ рассчитаны с учетом направленности процессов.

вильно при одинаковых амплитудах колебания влажности и температуры и может быть достигнуто только в модельных опытах). Кроме того, варьирование обусловлено и буферной емкостью. Для того чтобы оценить влияние скорости эволюции почвы и буферной емкости на варьирование параметра, необходимо знать по крайней мере значение одного из указанных выше факторов.

Это мы и попытались сделать. Так, в Башкирии в пойме реки Танып в непосредственной близости расположены пойменные лугово-зернистая и перегноино-торфяная почвы. Значение варьирования Eh в пахотной и целинной лугово-зернистой и целинной перегноино-торфяной почвах (последние осушены) было ниже, чем в пахотной перегноино-торфяной, что свидетельствует о меньшей равновесности состояния пахотной перегноино-торфяной почвы. Значение $\frac{\Delta Eh}{\Delta t^\circ \Delta w}$ лугово-зернистой почвы выше, т. е. в ней буферность меньше. Буферная емкость ее так-

же оказалась более низкой. Значение $\frac{\Delta E_h}{\Delta t^\circ \Delta w}$ в целинных почвах в основном ниже, а буферная емкость выше, чем у пахотных. Степень варьирования E_h с исправлением на варьирование температуры и влажности выше (в лугово-зернистой почве на пашне и целинных участках величины однопорядковые).

Варьирование E_h с исправлением на варьирование влажности выше в дерново-подзолистой почве под паром и ниже под лесом, что говорит о большей нестационарности состояния пахотной почвы, так как значения буферной емкости на участках были близкими [9].

Из сравнения варьирования r_{H_2} и E_h лугово-каштановой почвы, солонца, солончака и солоды следует, что эти показатели меньше варьировали в лугово-каштановой почве. Это свидетельствует о большей близости ее к стационарному состоянию. Сравнение темно-каштановой почвы, чернозема, солонца и солоды по данным показателям свидетельствует о меньшем их варьировании у двух первых почв.

Степень нестационарности почвы оценивали по разности коэффициентов корреляции E_h с влажностью, температурой, содержанием закисного железа, вычисленных без учета запаздывания (r_1) и с его учетом (r_2).

Как видно из данных табл. 2, E_h коррелирует с влажностью, температурой и содержанием закисного железа. С увеличением влажности E_h , как правило, уменьшается реже, изменение E_h недостоверно. Однако в отдельных образцах с увеличением влажности E_h возрастает, что обусловлено выпадением дождей и обогащением в связи с этим почвы кислородом или пределами влажности, в которых определялся коэффициент корреляции. Существование подобных фактов не ново и отмечалось многими авторами [4—8, 13].

Запаздывание изменения E_h при изменении влажности, температуры и содержания закисного железа на 1 мес наблюдалось редко. Очевидно, такое большое запаздывание в природе отсутствует. При сроке запаздывания 20 дней и менее коэффициенты корреляции (r_2) выше или знак коэффициента корреляции меняется на тот, который должен быть при установлении равновесия. Указанный факт, безусловно, свидетельствует о наличии гистерезиса.

Гистерезис по влажности выражен в большей степени, чем по содержанию подвижных форм закисного железа и температуры. С увеличением значения коэффициента при x в уравнении регрессии возрастает зависимость E_h от изучаемого параметра. По полученным данным, для расчета со сдвигом на один срок уравнения регрессии более достоверны, чем для расчета без сдвига, коэффициент при x в большинстве случаев выше.

Методически правильно сравнивать коэффициенты корреляции и разность $r_2 - r_1$ для почв, где близки интервалы изучаемых параметров для почв, у которых предполагается одинаковое время запаздывания, наконец, для почв, где анализы выполнялись строго по одной методике (лучше одним аналитиком).

Следует отметить, что в почвах поймы реки Танып (срок запаздывания при вычислении r_2 15 дней) значение $r_2 - r_1$ больше в торфянистых горизонтах. Оно несколько выше в пахотных почвах, чем в целинных, что говорит о большей нестационарности состояния первых при равной буферной емкости.

При меньшем значении сдвига срока определения r_2 по сравнению со сроком определения r_1 разница $r_2 - r_1$ более существенная, т. е. гистерезис проявляется более четко. Л. Н. Инишева [4] также отмечает четкое наличие гистерезиса (инерционность) в почвах реки Томи в случае определения r_2 при сдвиге на 1—5 дней. Таким образом, значение разности $r_2 - r_1$ свидетельствует о буферности, гистерезисе и степени

Т а б л и ц а 3

Гистерезис и необратимые изменения Eh дерново-подзолистых почв по данным сезонной динамики [9] (изучаемый параметр — ОВП)

Объект исследования	n_1 — n_2 , мВ, на осень 1-го и 2-го годов	$\frac{\max - \min}{\min}$ за 2 года	Площадь гистерезиса, см ²
Лес:			
4—14 см	35	0,21	6,0
50—60 см	40	0,41	2,0
Поле № 6:			
0—10 см	30	0,27	7,5
50—60 см	100	0,25	4,0

компонентов следует за изменением Eh. Так, для оглеенных дерново-подзолистых почв коэффициент корреляции $Eh = f\left(\frac{NO_3}{NN_4}\right)$ равен при вычислении без запаздывания — 0,1, а для случая опаздывания на 1 срок + 0,13, т. е. последний несколько выше и лучше отражает существующую зависимость, чем первый. В то же время для этих же почв при выяснении зависимости $Eh = f\left(\frac{Fe_2O_3}{FeO}\right)$ наибольший коэффициент корреляции ($r = +0,32$) получен для случая, когда изменение форм железа совпадает по времени с изменением Eh (разрыв между сроками взятия образцов в динамике составлял 5—10 дней, что не позволяет установить наличие гистерезиса, длящегося меньшие промежутки времени).

Таким образом, изменение ОВП следует за изменением влажности и температуры почвы с некоторым опозданием. Изменение химических свойств почв, зависящих от ОВП (для пар, не являющихся потенциалоопределяющими в данных условиях), также возникает лишь после изменения ОВП.

В табл. 3 представлены данные о гистерезисе и необратимых изменениях свойств некоторых почв по данным сезонной динамики. Значения влажности и температуры осенью 1-го и 2-го годов в первом приближении были равны.

По площади гистерезиса, как отмечалось выше, можно судить о буферных свойствах почв и степени нестационарности состояния, такая же информация заложена в показателе $\frac{\max - \min}{\min}$; разность значений параметра на осенние сроки предыдущего и последующего годов ($n_1 - n_2$) свидетельствует о размере необратимых изменений (при должном учете варьирования свойств почв в пространстве), т. е. и о степени нестационарности состояния почвы. В площадке под лесом площадь петли гистерезиса по ОВП меньше, чем на пашне. Степень нестационарности состояния, оцениваемая по ОВП ($n_1 - n_2$) в лесу, достоверно отличается от ее значения на пашне. Интересно отметить, что в нижних горизонтах площадь гистерезиса меньше, а значения $\frac{\max - \min}{\min}$ и $n_1 - n_2$ часто больше, чем в верхних горизонтах. Это свидетельствует о меньшей буферности нижних горизонтов и о большей нестационарности их состояния.

Как видно из данных табл. 4, для всех почв, за исключением подзола глееватого, характерна тенденция к уменьшению gH_2 при их эволюции, что соответствует увеличению степени гумусированности этих почв или оторфяелости верхнего горизонта. Подзол глееватый под

нестационарности состояния почв. Зная два параметра — буферность и гистерезис почв, можно оценить и степень нестационарности состояния.

Зависимости в почве не всегда прямолинейны и вычисляемый коэффициент корреляции несколько условен, что указывает на условность в ряде случаев показателя $r_2 - r_1$. При установлении зависимости Eh от содержания Fe^{2+} , Fe^{3+} , NO_3 , NH_4 , Mn^{2+} , pH в дерново-подзолистой почве [6] выяснилось, что если пара изучаемых компонентов не является потенциалоопределяющей, то изменение указанных компонентов

Величины гистерезиса и необратимых изменений по данным сезонной динамики γH_2 за 4 года для почв южной тайги

Почва	r^*	Площадь гистерезиса, см^2	$\frac{\text{max} - \text{min}}{\text{min}}$	
			на весну	на осень
Сильнопodzолистая под ельником	-0,28	18,5	0,24	0,05
Подзол глееватый под смешанным лесом	+0,13	11,0	0,45	0,11
Дерново-сильнопodzолистая глееватая под лугом	-0,33	9,2	0,08	0,17
Дерново-среднеpodzолистая под травянистым лесом	-0,60	9,0	0,12	0,16

* r — коэффициент корреляции для альтернативных признаков изменения γH_2 за 4 года

смешанным лесом характеризуется слабой тенденцией к увеличению γH_2 , что, видимо, указывает на несоответствие почвы и почвенного покрова. Поскольку гистерезис коррелирует с буферными свойствами почв, можно ожидать при равной степени нестационарности состояния почв и большем гистерезисе меньшую величину $\frac{\text{max} - \text{min}}{\text{min}}$. Отсюда следует, что дерново-подзолистые почвы в меньшей степени нестационарны по отношению к климатическим факторам, а подзолистые почвы более нестационарны (учитывая $\frac{\text{max} - \text{min}}{\text{min}}$ на весну). Это соответствует тому общеизвестному факту, что для южной тайги подзолы не являются зональными почвами. На основании значений гистерезиса и $\frac{\text{max} - \text{min}}{\text{min}}$ на осень можно заключить, что в большем равновесии с растительностью находится сильнопodzолистая почва под ельником.

Таким образом, данные о гистерезисе и необратимых изменениях (табл. 3) позволили оценить степень нестационарности состояния и буферность некоторых почв. С нашей точки зрения, несмотря на необходимость ряда допущений, постановка вопроса о рассмотрении почвообразования как циклов гистерезиса, остаточного гистерезиса и необратимых изменений целесообразна. Для решения этого вопроса необходимо располагать многолетними данными о динамике E_h при хорошей оценке варьирования свойств почв в пространстве и проводить статистическую обработку материала. Возможна такая оценка и по другим параметрам почв, которые являются характеристическими для почвообразовательных процессов.

Заключение

1. Сезонные изменения свойств почв, в том числе и ОВ процессов, связанные с варьированием влажности и температуры, складываются из обратимых гистерезисных изменений, временно необратимых изменений (остаточного гистерезиса) и полностью необратимых изменений. Из таких циклов изменений складывается в конечном итоге весь почвообразовательный процесс.

2. По виду петли гистерезиса, построенной на основании данных многолетних исследований, можно судить о буферных свойствах почв и степени нестационарности состояния почвы.

Если петля гистерезиса получается замкнутой, то почва находится в полностью стационарном состоянии, а площадь петли пропорциональ-

на буферным свойствам почв и наличию реакционных центров с медленной константой скорости протекания реакций.

По величине разомкнутости петли, вычисляемой по данным многолетней динамики, можно судить о степени нестационарности состояния, что соответствует наличию необратимых изменений в почве, которые произошли за год.

3. Эволюция почв во времени может рассматриваться как кинетика изменения свойств почв. Фактор кинетики определяет скорость процесса и степень нестационарности состояния. В разные периоды эволюции в реакцию вступают новые реагенты, степень нестационарности изменяется, изменяется и величина кинетической константы. При эволюции почвы до состояния климакса ряд изменений ее свойств в течение нескольких лет должен подчиняться экспоненциальному закону $A_t = A_\infty(1 - e^{-rt})$, где A — величина параметра почвы; r_x — кинетическая константа; t — время, или в общем виде $y = ab$.

Степень нестационарности почвы в целом может быть оценена по величине x или r и является функцией степеней нестационарности отдельных параметров почв в их взаимодействии. Степень нестационарности отдельного свойства почвы в данный момент эволюции определяется величиной кинетической константы в одном из уравнений формальной кинетики, которое лучше других описывает изучаемую кинетику процесса (как правило, для процесса, лимитирующего скорость данной реакции, скорость элементарного акта данного почвообразовательного процесса).

4. В результате изучения установлены следующие закономерности:

а) сезонное варьирование значений E_h и особенно γ_{H_2} менее значительное, чем варьирование содержания FeO , Fe_2O_3 влажности и температуры; б) изменение E_h отстает по времени от изменения влажности и температуры, совпадает по времени с изменением $\frac{Fe_2O_3}{FeO}$ и опережает изменение $\frac{NO_3}{NH_4}$; в) выводы о значении гистерезиса и степени нестационарности состояния неоднозначны, если они основаны на изучении динамики разных свойств почв, динамики различных почвенных горизонтов. Для получения достоверных выводов должны сравниваться данные за несколько лет при соответствующем учете пространственного варьирования свойств почв.

5. В подзоне южной тайги нестационарность состояния пахотных свойств значительнее, чем целинных, подзолистых почв больше, чем дерново-подзолистых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боул С., Хоул Ф., Марк-Крекен Р. Генезис и классификация почв. М., «Прогресс», 1977. — 2. Глобус А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л., Гидрометеониздат, 1969. — 3. Дюшофур Ф. Основы почвоведения. М., «Прогресс», 1970. — 4. Инишева Л. Н. Режимы почв реки Томи. Автореф. канд. дис. М., 1977. — 5. Кауричев И. С. Особенности генезиса почв временного избыточного увлажнения. Автореф. докт. дис. М., 1965. — 6. Латфуллина Г. Г. Буферность почв в окислительно-восстановительном интервале. Автореф. канд. дис. М., 1975. — 7. Орлов Д. С., Джиндил А. Р. Окислительно-восстановительный режим некоторых почв дерново-подзолистой зоны. — Агрехимия, 1974, № 3, с. 63—72. — 8. Панов Н. П., Шардаков А. Н., Кокурина Э. И. Сравнительная характеристика окислительно-восстановительных процессов в почвах солонцовых комплексов степной зоны. — В кн.: Мелиорация солонцов. ТСХА, 1968, с. 192—206. — 9. Поддубный Н. Н. Развитие современного почвообразовательного процесса в автоморфных почвах и изменение их вещественного состава под влиянием сельскохозяйственного использования. Автореф. докт. дис. М., 1973. — 10. Савич В. И., Лазарева Т. Ф. Остаточный гистерезис почв. — Докл. ТСХА, 1971, вып. 169, с. 100—104. — 11. Савич В. И., Котелева В. В. и др. Гистерезис физико-химических свойств почв. — Изв. ТСХА, 1977, вып. 1, с. 87—97. — 12. Савич В. И. Комплексная оценка подвижности ионов в почве. — В сб.: Особенности почвенных процессов дерново-

подзолистых почв. ТСХА, 1977, с. 84—101. — 13. Т а р а р и н а Л. Ф. Сезонная динамика окислительно-восстановительного

потенциала и подвижных форм некоторых элементов в серой лесной почве. Автореф. канд. дис. М., 1971.

Статья поступила 11 апреля 1979 г.

SUMMARY

Experimental data on hysteresis of the redox-state of a number of soils obtained in perennial stationary field experiments are presented in the paper.

The whole soil formation process is considered to consist of cycles of hysteresis variations, temporarily irreversible variations (residual hysteresis) and completely irreversible variations. It is accepted that evolution of soils to the state of climax in the first approximation is subject to exponential law. It is suggested to estimate the degree of non-stationary condition by the extent of disengagement of the hysteresis loop with regard for space variation and climatic cycles. Seasonal dynamics of Eh and rH_2 values is less pronounced than that of Fe_2O_3 and FeO content, moisture and temperature. The Eh value varies more slowly than humidity and temperature, coincides in time with variation of Fe_2O_3/FO and outstrips variations of NO_3/NH_4 . Non-stationary condition is more pronounced in arable soils than in virgin lands, as well as in lower horizons more than in upper ones.