

УДК 631.4:007:504.064

30-летние изменения вероятностных и информационных характеристик содержания гумуса в черноземах южных Западной Сибири

Михеева Ирина Викторовна, Оплеухин Алексей Александрович

Аннотация

Анализ трансформации вероятностно-статистических распределений (ВСП) содержания гумуса в черноземах южных в целом на исследуемой территории на Прииртышском увале за 30-летний период выявил наличие тенденций к снижению содержания гумуса в поверхностном слое и его увеличению в нижележащих слоях почвы. Трансформация ВСП содержания гумуса сопровождается весьма существенным уменьшением статистической энтропии на 60% от исходного значения, что говорит о существенном изменении состояния черноземов, несмотря на то, что таксономически почвы не изменяются. Анализ информационной дивергенции показал, что выявленные тенденции в легкосуглинистой разновидности выражены сильнее, чем в среднесуглинистых почвах. Причем наибольшая трансформация ВСП содержания гумуса за исследуемый период произошла в слое 30-50 см за счет увеличения нижней границы интервала варьирования. Выявленные трансформации ВСП интерпретируются с точки зрения взаимодействия почвенных, климатических и ландшафтно-экзогенных процессов.

Ключевые слова: мониторинг, климат, чернозем, гумус, вероятностные распределения, трансформация, энтропия, дивергенция

30 years' Changes of Probabilistic and Information Characteristics of the Humus Content in Southern Chernozems in Western Siberia

I.V. Mikheeva¹, A.A. Opleuhin

Abstract

The analysis of transformation of the probabilistic-statistical distributions (PSD) of the humus content in southern chernozems at the studied territory in the whole, situated on the Priirtyshsky uval for the 30-year period revealed existence of the tendency to decrease in the humus content in the top layer and its increase in underlying layers of soil. Transformation of PSD of the humus content is followed by very essential reduction of statistical entropy up to 60% of initial value that speaks about essential change of a condition of chernozems in spite of the fact that taxonomically soils don't change. The analysis of information divergence showed that the revealed tendencies in a sandy loam version are expressed more strongly, than in the loamy soils. And the greatest transformation of PSD of the humus content for the studied period happened in a layer 30-50 cm due to increasing of the low boundary of the interval of variation. The revealed transformations of PSD are interpreted from the point of view of interaction of soilforming, climatic and landscape and exogenous processes.

Key words: climate, chernozem, humus, probabilistic distributions, transformation, entropy, divergence

Введение

Точные знания о состоянии почв и их изменениях необходимы для решения конкретных проблем, в том числе продовольственной и экологической безопасности России. Для этого важно проведение повторных мониторинговых исследований почв сельскохозяйственных территорий. Согласно современной методологии, необходимо определение надежных индикаторов для количественной оценки деградации земель под действием антропогенных и естественных причин, включая изменения климата, которые могут иметь как характер тренда, так и цикличности.

В трудах основателя почвоведения В.В. Докучаева была всесторонне развита и детализирована теория широтной, а затем и вертикальной географической зональности, в том числе климатической зональности поверхности суши. В настоящее время понятие климат определяется как статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой (КС) океан-суша-атмосфера за периоды времени в несколько десятилетий [10]. Сглаживание данных климатических наблюдений, а также анализ исторических источников, свидетельствует о наличии временных трендов и цикличности изменений КС (ЦКС). Существуют несколько гипотез происхождения ЦКС на различных иерархических временных уровнях, но во всех из них она рассматривается как неопровержимый научный факт.

Почвы и почвенный покров формируются, как правило, по сложным генетическим моделям, простые модели встречаются редко [15]. В почвенном профиле целесообразно различать: (а) профиль «почвы-памяти» из устойчивых реликтовых признаков; (б) профиль «почвы-отражения», образованный устойчивыми современными признаками; (в) профиль «почвы-жизни», образованный динамическими свойствами, отражающими современные условия. Поскольку климатический фактор является одним из почвообразующих факторов, то циклические изменения его показателей, безусловно, влияют на почвы, их свойства и режимы («почва-отражение», «почва-жизнь»).

Изменения свойств почв в очень длительных циклах изучаются путем палеоклиматических, геологических исследований. Изменения свойств почв в циклах небольшой длительности от двух до нескольких десятков лет могут быть отслежены путем мониторинга современного текущего состояния почв и соотнесения его с подобными данными предыдущих лет, что позволяет рассмотреть временную цепь состояний почвы, последовательно сменяющих друг друга (рис.1). Выделение антропогенной и климатической составляющей в изменениях свойств почв важно для оценки современных и прогноза будущих состояний и трансформаций почв.



Рис. 1. Временная цепь состояний почвы

ЦКС, проявляющаяся в периодических изменениях количества тепла и влаги, поступающих в почву, приводит к колебаниям энергии почвообразовательных процессов [2]. Это, очевидно, влияет на колебания скорости почвообразовательных процессов, которые, по-видимому, должны приводить к характерной «порционности» почвообразования, связанной с ЦКС. В связи с этим, целью данного исследования является оценить изменения свойств почв за достаточно короткий (приблизительно 30 лет) интервал, в котором проявляются особенности ЦКС на юге Западной Сибири.

В настоящее время в научной литературе развивается общесистемный подход к управлению техническими, природными и социальными системами на основе энтропийных закономерностей, таких как, обратная взаимосвязь энтропии в системе и окружающем ее пространстве, и другие [12]. Вероятностные и информационные характеристики свойств системы позволяют оценить ее изменения даже в случаях, когда средние значения параметров не информативны. Поэтому вероятностные и информационные характеристики свойств почвы могут являться надежными индикаторами для количественной оценки изменений почв под действием антропогенных и естественных причин.

Объект исследований

Территория, на которой проводились исследования, расположена $53^{\circ}15'С - 53^{\circ}47'С$; $75^{\circ}05'В - 77^{\circ}01'В$. С запада район исследований отделён рекой Иртыш, с севера граничит с Омской областью, с северо-востока — с Новосибирской областью. В геоморфологическом отношении территория исследований представляет собой центральную и восточную часть Прииртышского увала, который слагается породами супесчаного и легкосуглинистого гранулометрического состава, сменяющимися по его склону на восток средними суглинками, а затем глинами. При общем равнинном рельефе на поверхности

имеется много замкнутых впадин, в наиболее глубоких из которых лежат озёра или заболоченные участки (в восточной части).

Климат района резко континентальный с сухим жарким летом и холодной малоснежной зимой, характеризуется засушливостью весенне-летнего периода, максимумом осадков в середине лета, высокими летними и низкими зимними температурами, поздними весенними и ранними осенними заморозками. Среднее годовое количество осадков – 275,5 мм, иногда до 300—400мм.

Среднемноголетний коэффициент увлажнения, являющийся общим показателем соотношения тепла и влаги равен 0,4—0,6 – что характерно для засушливой степи. Северная часть территории исследования относится к засушливому умеренно-теплому агроклиматическому району с гидротермическим коэффициентом по Селянинову ГТК = 0,8—0,9 и суммой температур выше 10°C равной 2200°C. Южная часть – к засушливому теплому агроклиматическому району с ГТК = 0,7—0,8 и суммой температур 2200—2350°C [1].

Почвы в основном чернозёмные, встречаются солонцово-солончаковые комплексы. Растут полынь, типчак, ковыль; из древесных пород преобладают мягко-лиственные лесные породы (береза, осина, ветла, тополь); около 18 % площади занимают берёзовые колки. Чернозёмные степи, перемежающиеся берёзовыми колками, создают довольно живописный ландшафт.

При анализе результатов исследований нами использовались климатические данные по метеостанциям, расположенным в непосредственной близости от изучаемых почв, архивные данные климатических наблюдений¹, а также данные отчетов ФГРУ Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН². В этих отчетах обобщены результаты многолетних климатических наблюдений по России в целом, в том числе по Западной Сибири.

В нашей работе взят временной отрезок 60—90-годы прошлого столетия. По данным указанных источников на исследуемом временном отрезке отмечался рост суммарных температур, в том числе за вегетационные периоды, по годам, что согласуются с общей тенденцией к потеплению в последние несколько десятков лет, выявленной также и на юге Западной Сибири.

ЦКС на юге Западной Сибири, выражается в ритмическом изменении характеристик увлажнения через определенные промежутки времени, что отмечалось в работах известных исследователей агроклиматических ресурсов юга Сибири [14]. На основе данных почти векового хода изменения весенне-летнего режима увлажнения были выявлены несколько ритмов увлажнения с периодичностью 11, 16, 32 года и более. В 1966 году после глубокой депрессии началась фаза улучшения режима увлажнения. Анализ трендов показывает, что по сумме осадков и по коэффициенту увлажнения в рассматриваемый период наблюдалось превышение над среднемноголетними значениями, с выраженным

¹<http://en.tutiempo.net/climate>

²<http://climatechange.su>

максимумом в середине 80-х годов. Это позволяет предположить, что рассматриваемые годы являются половиной приблизительно 32-летнего климатического цикла, проявившегося таким образом на данной территории на протяжении предыдущего столетия.

Методы исследования

В данной работе использовались архивные данные результатов изучения почв стандартными методами почвенных исследований при крупномасштабном картографировании и мониторинге почв, лабораторными методами определения почвенных свойств [11]. В нашей работе исходными данными послужили материалы крупномасштабных (1:25000) почвенных обследований проведенных на исследуемой территории в разное время по стандартным методикам³. Все полученные данные послужили для создания банка данных. Проводилось формирование баз данных, группировка и анализ данных методами статистического анализа. Объемы полученных статистических выборок составляли $n = 40—130$, что было достаточно для проведения вероятностного анализа, заключающегося в оценке параметров и выборе наиболее подходящего теоретического вероятностного распределения на основе новой методики проверки статистических гипотез [4].

Мониторинговые исследования состояния почв и других природных объектов поднимают ряд важных методологических и методических вопросов, в том числе вероятностно-статистического анализа накапливаемых данных и их использования для верификации количественных оценок природных процессов. Вследствие значительной природной вариабельности почвенных свойств существует проблема достоверной оценки состояния почвенных систем и их трансформаций под действием природопользования и изменений климата.

С позиций фундаментальной науки, почвенные свойства и процессы априорно проявляются стохастически, так как являются результатом функционирования почвы как открытой сложной системы [18]. Целостное изменение системы складывается из набора индивидуальных хаотических и совместимых изменений в отдельных точках. Поэтому, для ее адекватной оценки необходимо количественно охарактеризовать изменения, как дифференцировано, так и в целом. Для этого логично использовать вероятностные распределения, которые отражают два структурных уровня – внутреннего строения из элементов с разной выраженностью свойств и детерминации системы. Поэтому мы предложили метод оценки изменений почв по изменению вероятностных распределений их свойств [7]. Это особенно важно при оценке трансформаций почв на небольших временных интервалах, поскольку за это время, как правило, не происходит резких изменений почв. Однако изменения даже в небольшой части всего пространственно распределенного объема почвы свидетельствует о начальной

³ Материалы по мониторингу почв. Павлодарский филиал ГосНПЦзем, 1995.

стадии процесса, который затем может привести к существенным изменениям качества почв.

Проведенный нами ранее анализ динамики свойств показал, что в пределах даже однородных почвенных объектов эти изменения в разных точках различны по величине и даже могут отличаться по знаку, то есть одновременно идет и возрастание, и убывание свойства [7]. Вариантов для количественного проявления одной или другой тенденции – достаточно много: выделено 10 типических случаев изменения вероятностных распределений свойств: по пять разных вариантов количественного возрастания и убывания свойств [9]. Поэтому в концепции целостной оценки состояния и изменений почв с учетом их вариабельности было предложено использовать вероятностные индикаторы [16]. При этом вероятностными индикаторами состояния этих объектов являются вероятностные распределения и статистическая энтропия почвенных свойств. А индикаторами изменений – приращение статистической энтропии и величина информационной дивергенции свойств почвы в разные моменты времени или при разных состояниях объекта (табл.1) .

Таблица 1

Вероятностные индикаторы состояния и изменений почвенного объекта за период времени Δt

Категория	Индикатор	Вычисление
Состояние почвы в моменты времени $t1$ и $t2$	Вероятностные распределения $W(x)$ свойств почвы в моменты времени $t1$ и $t2$	$W1(x) = W^{t1}(x, \theta_0^{t1}, \theta_1^{t1}, \theta_2^{t1}, \theta_3^{t1})$ $W2(x) = W^{t2}(x, \theta_0^{t2}, \theta_1^{t2}, \theta_2^{t2}, \theta_3^{t2})$
	Статистическая энтропия, h в моменты времени $t1$ и $t2$	$h_{t1} = -k \int_{-\infty}^{+\infty} W1(x) \ln W1(x) dx + h_0$ $h_{t2} = -k \int_{-\infty}^{+\infty} W2(x) \ln W2(x) dx + h_0$
Изменение почв за период времени $\Delta t = (t2 - t1)$	Приращение статистической энтропии, Δh за период времени $\Delta t = (t2 - t1)$	$\Delta h = h_{t2} - h_{t1}$
	Информационная дивергенция, $d = \Delta W(x)$ за период времени $\Delta t = (t2 - t1)$	$d = \int_{-\infty}^{+\infty} (W1(x) - W2(x)) \ln \left(\frac{W1(x)}{W2(x)} \right) dx$

Результаты исследований показали сложное поведение статистической энтропии почвенных систем, тем не менее, критерием их устойчивости является малое изменение статистической энтропии свойств [6]. Величина

информационной дивергенции является количественной мерой различий вероятностных распределений случайных величин, в нашем случае – почвенных свойств в разные моменты времени или в разном состоянии почвенной системы. Информационная дивергенция позволяет выделять наиболее уязвимые и измененные почвенные разности, а также ранжировать естественные и антропогенные воздействия соответственно степени их влияния на почвенные свойства [8]. Оценка информационной дивергенции свойств почв в почвенных горизонтах (слоях) позволяет выделить те горизонты (слои), в которых изменения вероятностных распределений происходят наиболее сильно, а в которых – минимально. Это дает возможность относительной оценки интенсивности процессов в горизонтах, не сопоставимых по абсолютным количественным выражениям свойств.

Результаты и их обсуждение

Группа процессов поступления, преобразования и минерализации органического вещества в почвах является одной из основных групп элементарных почвенных процессов [3]. Они определяют как формирование почвенного профиля, так и функционирование, и плодородие почв. Поэтому содержание гумуса выступает важным фактором в качественной оценке почв, и является одним из обязательных показателей при их мониторинге.

Наиболее распространены на исследуемой территории черноземы южные маломощные глубокосолонцеватые легкосуглинистые (35650 га) и среднесуглинистые (42750 га), поэтому состояние этих почвенных разновидностей оценивается в статье на начало периода (1963 г.) и на конец периода (1989 г.). Количественная модель состояния почвы представляет собой совокупность вероятностных распределений почвенных свойств в пределах исследуемого объекта (табл. 2).

Таблица 2

Вероятностно-статистические распределения содержания гумуса в черноземах южных (Прииртышский увал)

Слой почвы, см	Распределение	Параметры *	Вероятность p соответствия теоретическому распределению согласно критерию согласия				средняя p
			Колмогорова	Смирнова	ω^2 Мизеса	Ω^2 Мизеса	
Легкосуглинистые 1963 год (n= 59)							
0-20	Ln-нормальное	0,22; 0,85	0,74	0,92	0,73	0,74	0,78
20-30	Максимального значения	0,42; 1,22	0,54	0,34	0,34	0,19	0,35
30-50	Максимального значения	0,32; 0,63	0,67	0,83	0,87	0,96	0,83
50-100	Коши	0,09; 0,13	-	0,74	0,05	0,04	0,21

		1989 год (n= 91)					
0-20	Двойное экспоненциальное	1,25; 0,34; 2,24	0,55	-	0,74	0,59	0,62
20-30	Нормальное	0,51; 1,77	0,65	0,70	0,54	0,42	0,58
30-50	Максимального значения	0,16; 0,83	0,69	0,48	0,67	0,77	0,65
50-100	Максимального значения	0,16; 0,24	0,52	0,62	0,56	0,36	0,51

		Среднесуглинистые					
		1963 год (n= 40)					
0-20	Lп-нормальное	1,02; 0,21	0,58	0,49	0,49	0,34	0,50
20-30	Lп-нормальное	0,34; 0,50	0,30	0,20	0,26	0,27	0,26
30-50	Лапласа	0,16; 0,88	0,03	0,86	0,01	-	0,30
50-100	Коши	0,09; 0,09	-	0,51	0,01	0,01	0,13

		1989 год (n= 127)					
0-20	Lп-нормальное	0,98; 0,15	0,17	0,17	0,18	0,11	0,20
20-30	Лапласа	0,42; 1,93	0,10	0,94	0,09	0,06	0,30
30-50	Максимального значения	0,18; 0,92	0,70	0,66	0,78	0,85	0,75
50-100	Логистическое	0,08; 0,34	0,29	-	0,45	0,54	0,43

Как видно из таблицы, основные типы распределений содержания гумуса в почвенных слоях – *Lп-нормальное*, *максимального значения* – распределения, характеризующиеся существенной правой асимметрией и более или менее широким центром. Другая группа распределений: *нормальное*, *двойное экспоненциальное*, *логистическое*, *Лапласа*, *Коши* – относятся к симметричным распределениям, с различной степенью выраженности центральной части – от широкой центральной части у нормального распределения до очень узкого центра у распределений *Лапласа* и *Коши* (рис. 2).

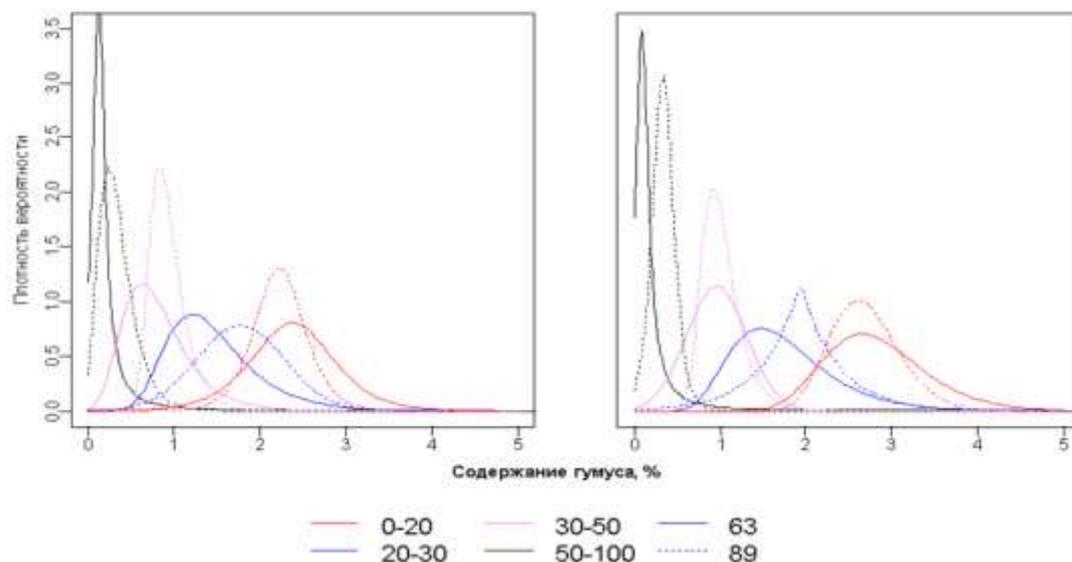


Рисунок 2. Вероятностно-статистические распределения (дифференциальные) содержания гумуса в черноземе южном в 1963 и 1989 годы:

а) легкосуглинистые; б) среднесуглинистые

В легкосуглинистой разновидности в слое 0—20 см в 1963 году распределение было *Ln-нормальным*, а к концу 80-х годов оно трансформировалось в *двойное экспоненциальное*. Трансформация ВСП заключалась в уменьшении практически до нуля вероятности повышенных значений содержания гумуса (>3%), имевших место в 60-х годах, и смещении центральной части распределения влево при неизменной нижней границы интервала варьирования, что и привело к сужению центра и появлению симметрии ВСП содержания гумуса в слое 0—20 см через 30 лет.

Произошедшая трансформация ВСП содержания гумуса характеризует тенденцию к уменьшению содержания гумуса в поверхностном слое почвы в целом на почвенном покрове, представленном черноземами южными легкосуглинистыми. В черноземах южных среднесуглинистых изменения ВСП содержания гумуса аналогичны, но выражены в меньшей степени, так как тип распределения в 89 году сохранился таким же, каким был в 63-м – *Ln-нормальный*, изменения коснулись только параметров распределения.

Основная количественная профильная закономерность практически для всех нормальных почв (при отсутствии погребенных слоев) – плавное снижение содержания гумуса вниз по профилю. Данная закономерность в случае изучения ВСП содержания гумуса выражается в относительном смещении функций распределения влево по оси абсцисс в более глубоких слоях (рис. 2).

В слое 20—30 см в легкосуглинистой разновидности в 1963 г. распределение содержания гумуса было *максимального значения*, а к 1989 году оно трансформировалось в *нормальное*. При этом практически в постоянном

интервале варьирования произошло увеличение вероятности более высоких значений содержания гумуса, чем в 63-м году. Это и привело к перестройке распределения и замене правой асимметрии ВСП на симметричность функции распределения с более широким центром. В целом изменения функции распределения диагностирует заметно выраженную тенденцию к повышению содержания гумуса в слое 20—30 см за 30 лет. В среднесуглинистой разновидности эта тенденция также выражена, но изменения ВСП здесь несколько другие. Здесь повышение содержания гумуса приводит к трансформации Ln-нормального распределения в *распределение Лапласа*, характеризующееся острым точечным центром и широкопадающими, симметричными ветвями функции распределения.

В слое 30—50 см трансформации ВСП содержания гумуса за 30 лет характеризуются не только перестройкой вероятностей значений, как в вышележащих слоях. Очень важно, что здесь происходит существенное изменение интервалов варьирования, как в легкосуглинистой, так и в среднесуглинистой разновидности, выраженное в существенном росте нижней границы интервала варьирования. Несмотря на это, тип вероятностного распределения в легкосуглинистой почве не меняется, он остается *максимального значения* при значительном изменении параметров распределения. В среднесуглинистой разновидности, несмотря на менее выраженные изменения, тип ВСП трансформируется с симметричной функции Лапласа на распределение с правой асимметрией – *максимального значения*.

В силу региональных особенностей черноземы южные в Западной Сибири, как правило, маломощные, то есть органическое вещество в почве в основном концентрируется в верхней части профиля, а в нижних слоях содержание гумуса невелико. Не являются исключением и исследуемые почвы. Наиболее вероятные значения содержания гумуса в них в слое 50—100 см меньше 0,5%. В 1963 году тип вероятностного распределения в обеих разновидностях – *распределение Коши*, которое обычно подходит для описания вероятностей значений в узких интервалах варьирования. Через 30 лет ВСП содержания гумуса в данном слое легкосуглинистой разновидности трансформировалось в распределение *максимального значения*, при этом перестройка распределения заключалась в основном в увеличении вероятности значений содержания гумуса в диапазоне 0,5%-1,0%. В среднесуглинистой разновидности аналогичная тенденция выражена более сильно. Здесь тип ВСП в 89-м году стал *логистическое*, причем его центральная часть заметно смещена вправо относительно ВСП в 1963 году, что диагностирует выраженную тенденцию к увеличению содержания гумуса в слое 50-100 см к концу 80х годов относительно начала исследуемого периода.

Описанные выше тенденции в изменении ВСП содержания гумуса могут быть оценены количественно при помощи таких вероятностных индикаторов, определение которых приведено в табл. 1. Данные таблицы 3 показывают, что статистическая энтропия содержания гумуса в почвенных слоях и в целом по

профилю черноземов южных легко и среднесуглинистых невелика, а в слое 50-100 см вообще принимает отрицательные величины, что теоретически и математически вполне допустимо.

Статистическая энтропия является аддитивной величиной, поэтому энтропия почвенного профиля равняется сумме энтропий в отдельных слоях. Суммарный показатель статистической энтропии по почвенному профилю легко- и среднесуглинистых черноземов близок по величине и равен 1,6 —1,7. Данный показатель характеризует черноземы южные, как системы с низким разнообразием состояний по содержанию гумусированного органического вещества. За исследуемый тридцатилетний период статистическая энтропия содержания гумуса еще уменьшилась, причем, весьма значительно: в профиле легкосуглинистой почвы на 63%, а в среднесуглинистой на 66% от исходного значения. Это говорит о том, что состояние черноземов существенно изменилось, несмотря на то, что сами абсолютные величины содержания гумуса практически не вышли за пределы интервалов варьирования на начало исследуемого периода.

Таблица 3

Вероятностные индикаторы изменения вероятностно-статистических распределений содержания гумуса в черноземах южных

Слой почвы, см	Статистическая энтропия		Приращение энтропии (1989)-(1963)	Информационная дивергенция (1989)-(1963)
	1963	1989		
Легкосуглинистые				
0-20	0,80	0,34	-0,46	0,45
20-30	0,69	0,74	0,05	0,55
30-50	0,42	-0,23	-0,65	4,49
50-100	-0,31	-0,25	0,06	1,22
Σ по профилю	1,60	0,6	-1,0	6,71
Среднесуглинистые				
0-20	0,75	0,48	-0,27	0,18
20-30	0,81	0,78	-0,03	0,53
30-50	0,35	-0,14	-0,49	2,50
50-100	-0,25	-0,56	-0,31	2,18
Σ по профилю	1,66	0,56	-1,1	5,39

С точки зрения физики сложных систем, статистическая энтропия – важная системная характеристика, являющаяся мерой разнообразия микросостояний системы. С другой стороны, с позиций теории информации, статистическая энтропия является мерой количества информации. В нашем случае, под системой понимается пространственно распространенный почвенный слой, а под микросостояниями – отдельные точки этого почвенного пространства с теми или иными значениями содержания гумуса. Таким образом, статистическая энтропия

в данной работе имеет смысл величины внутреннего разнообразия почвы по содержанию гумуса.

Графический анализ и сравнение ВСР содержания гумуса в 63-м и 89-м годах, выполненные выше, наглядно показали наличие положительной тенденции, заключающейся в увеличении содержания гумуса в слоях 20—30, 30—50 и 50—100 см. Но существенное уменьшение статистической энтропии свидетельствует об уменьшении разнообразия состояний почвы. Это является следствием произошедшей трансформации вероятностных распределений содержания гумуса.

Количественную оценку трансформации вероятностного распределения в целом можно дать при помощи величины дивергенции ВСР [8], или как принято эту величину называть в теории информации – *информационной дивергенции* (табл. 1). Эта величина не зависит от размерности [17] и абсолютных величин исследуемых свойств, поэтому она дает возможность относительной оценки интенсивности процессов в объектах, не сопоставимых по абсолютным количественным выражениям свойств, что важно при оценке интенсивности изменений почвенных свойств в профиле, так как их абсолютные значения в профиле существенно различаются. Различие ВСР (в интегральной форме) наглядно показывает изменение вероятностей значений в разных интервалах варьирования (рис. 3).

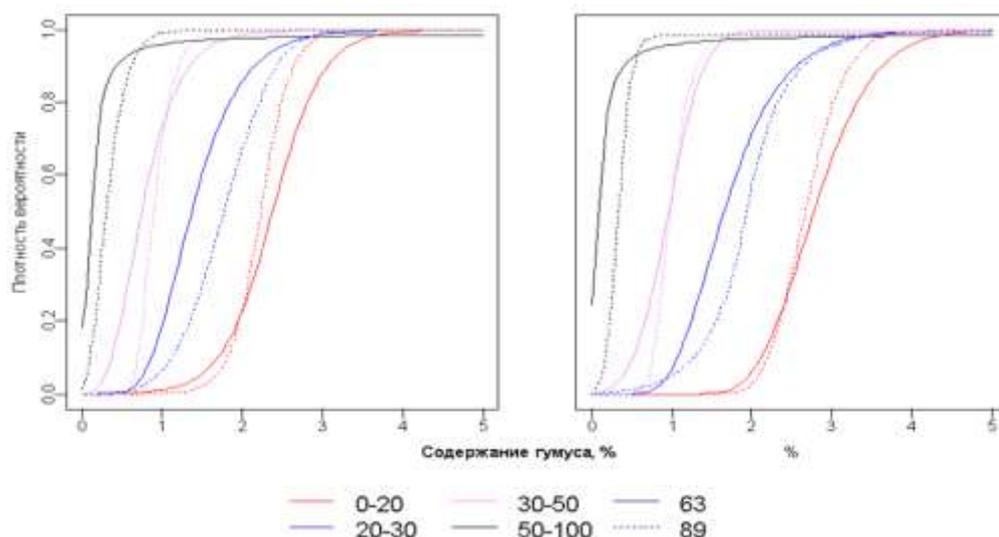


Рисунок 3. Вероятностно-статистические распределения (интегральные) содержания гумуса в черноземе южном в 1963 и 1989 гг :
а) легкосуглинистые; б) среднесуглинистые

Данные табл.3 показывают, что информационная дивергенция содержания гумуса за исследуемый период в почвенных слоях существенно различается. Если в пределах тридцатисантиметровой толщи информационная дивергенция за исследуемый период умеренная, равная по величине от 0,18 до 0,55, то в более глубоких слоях, особенно в слое 30-50 см весьма значительная до 4,5.

Наибольшая величина информационной дивергенции в этом слое объясняется существенным изменением интервала варьирования (рис. 2, 3).

В легкосуглинистых черноземах суммарная по профилю информационная дивергенция содержания гумуса за исследуемый период равна 6,71. Здесь она заметно больше, чем в среднесуглинистых почвах, где она равна 5,39. Это говорит о том, что за исследуемый тридцатилетний период, состояние легкосуглинистых черноземов южных, расположенных в основном на самой возвышенной части Прииртышского увала изменилось относительно более сильно, чем состояние среднесуглинистой разновидности, расположенной преимущественно на пологом восточном склоне увала.

В настоящее время в современной педологии парадигма почвообразования исключительно под действием только почвенных процессов сменяется на представления о полигенетичности формирования почвенных горизонтов и слоев, и, следовательно, почвенного профиля. Это означает, что формирование почвенного профиля происходит при одновременном действии как почвенных, так и геоморфологических, ландшафтно-экзогенных и других процессов [15]. При интерпретации приведенных в статье результатов с точки зрения почвообразования и современной эволюции, можно рассматривать различные гипотезы причин выявленных тенденций, которые, скорее всего, нужно рассматривать как действующие одновременно.

Смягчение климатических условий, хотя бы временно, в пределах наиболее благоприятных периодов климатической цикличности (больше тепла и осадков) способствует лучшим условиям почвообразования, с точки зрения его энергетики. Возникают лучшие условия для произрастания растительности, развития корневых систем, активности микроорганизмов, и их проникновения глубже в почву. Это способствует повышению содержания гумуса в почве. Однако при пахотном земледельческом использовании происходит снижение содержания гумуса в поверхностном слое почвы, что является закономерным следствием изменения его физического состояния и более интенсивного выноса веществ с урожаем. Так называемое выпахивание, приводящее к снижению содержания и запасов гумуса в поверхностном слое, является одной из основных закономерностей пахотного использования почвы.

На данной территории часты засушливые годы, а также очень высока повторяемость сильных ветров западного, юго- и северо-западного направления. На прилегающих с запада территориях России и особенно Казахстана, засушливость и повышенный ветровой режим способствует развитию там ветровой эрозии [13]. Развеваемый материал с этих территорий частично поступает на исследуемые почвы. Ветровой привнос на поверхность и аккумуляция мелкозема в отдельных точках на исследуемых почвах приводит к тому, что исходные гумусовые горизонты в них относительно «заглубляются». Это приводит к тому, что в поверхностном слое содержание гумуса по факту

относительно уменьшается, а в более глубоких слоях – относительно увеличивается.

Детальное изучение «процессов-механизмов» в почве под действием указанных возможных причин не являлось целью данного исследования. Проведенное статистическое исследование вероятностных и информационных характеристик позволило наиболее точно оценить суммарный эффект различных процессов-механизмов. Они могут быть как почвенными, антропогенными, так и климатогенными и геоморфологическими. Их сочетание приводит к реальному «процессу-результату» современной эволюции почвы, вероятностные и информационные оценки которого были получены в данной статье.

Выводы

1. В статье рассматриваются изменения почв за период 60-90 годы двадцатого столетия, который на юге Западной Сибири представлял собой почти полный внутривековой климатический цикл по величине атмосферных осадков.

2. Предлагаемая количественная модель состояния почвы представляет собой совокупность вероятностных распределений почвенных свойств в пределах исследуемого объекта.

3. Основные типы распределений содержания гумуса в почвенных слоях – *Ln-нормальное, максимального значения* – распределения, характеризующиеся существенной правой асимметрией и более или менее широким центром. Другая группа распределений: *нормальное, двойное экспоненциальное, логистическое, Лапласа, Коши* – относятся к симметричным распределениям, с различной степенью выраженности центральной части.

4. Графический анализ трансформации вероятностных распределений за исследуемый период выявил две тенденции – уменьшения содержания гумуса в поверхностном слое и увеличение его количества в более глубоких слоях.

5. Суммарный показатель статистической энтропии по почвенному профилю в черноземах южных равен 1,6 — 1,7, что характеризует эти почвы, как системы с низким разнообразием состояний по содержанию гумусированного органического вещества. За исследуемый период статистическая энтропия содержания гумуса уменьшилась на 65% от исходного значения, что свидетельствует об уменьшении разнообразия состояний почвы.

6. В пределах тридцатисантиметровой толщи информационная дивергенция за исследуемый период умеренная, равная по величине от 0,18 до 0,55. В более глубоких слоях, особенно в слое 30—50 см, она весьма значительная – до 4,5. Наибольшая величина информационной дивергенции в этом слое объясняется изменением интервала варьирования.

7. В легкосуглинистых черноземах суммарная по профилю информационная дивергенция содержания гумуса равна 6,7, а в среднесуглинистых почвах 5,4, следовательно, за исследуемый период состояние легкосуглинистых черноземов южных, расположенных в основном на самой возвышенной части Прииртышского увала, изменилось относительно более сильно, чем состояние

среднесуглинистой разновидности, расположенной преимущественно на пологом восточном склоне увала.

Список литературы

1. Агроклиматические ресурсы Павлодарской области: Справочник ред. Э.С. Зарембо. – Алма-Ата: Управление гидрометеорологической службой КазССР, 1971. – 178 с.
2. Волобуев В.Р. Введение в энергетику почвообразования. М.: Наука, 1974. – 127 с.
3. Герасимов И.П. Элементарные почвенные процессы как основа для генетической диагностики почв // Почвоведение, 1981. № 5. – С. 102—113.
4. Лемешко Б.Ю. Статистический анализ одномерных наблюдений случайных величин: Программная система, Новосибирск: НГТУ, 1995. – 125 с.
5. Михеева И.В. Вероятностно-статистические модели свойств почв (на примере каштановых почв Кулундинской степи), Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 200 с. ??
6. Михеева И.В. Статистическая энтропия как критерий оценки эволюции и динамики почвенного покрова // Сиб. экол. журн. 2004 в. № 3. – С. 445—454
7. Михеева И.В. Мониторинг и вероятностно-статистическая оценка устойчивости и изменчивости природных объектов при современных процессах (на примере каштановых почв Кулундинской степи). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 103 с.
8. Михеева И.В. Дивергенция вероятностных распределений свойств почв как количественная характеристика трансформации почвенного покрова // Сибирский экологический журнал, 2009, № 2. – С. 231—236. [Mikheeva I.V. 2009. Divergence of Probability Distribution of the Soil Properties as a Quantitative Characteristic of the Soil Cover Transformation // Contemporary Problems of Ecology. Vol. 2. N 6. P. 231-236.]
9. Михеева И.В., Кузьмина Е.Д. Анализ изменений свойств почвы по изменению их статистического распределения: Методические рекомендации. Новосибирск: ИПА СО РАН; «ЦЭРИС», 2000. – 23 с.
10. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физических наук, том 170, № 4. – С. 419—445.
11. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных карт землепользования. М., Колос, 1973. – 94 с.
12. Прангишвили И.В. Общесистемные закономерности и проблемы управления природными и социальными системами. Синергетика и проблемы управления. Ред. А.А. Колесников. М.: Физматлит, 2004. – с. 398—419.
13. Рейнгард Я.Р. Деградация почв юга Западной Сибири. Лодзь-Польша, 2009. – 636 с.
14. Сенников В.А., Сляднев А.П. Агроклиматические ресурсы юго-востока Западной Сибири и продуктивность зерновых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 150 с.
15. Соколов И.А. Почвообразование и экзогенез. М.: Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 1997. – 244 с.
16. Irina Mikheeva. Probabilistic Indicators for Soil Status Evaluation/ Land Quality and Land Use Information in the European Union. Gergely Toth and Tamas Nemeth (Eds). Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2011. – 399 pp. ISSN 1018-5593. ISBN 978-92-79-17601-2. doi: 10.2788/40725 (p. 45-55)
17. Kanamori Takafumi, 2014. Scale-Invariant Divergences for Density Functions// Entropy, 16. P. 2611—2628; doi: 10.3390/e16052611.
18. Phillips J.D. Chaotic evolution of some coastal plain soils // Physical Geography. 1993. 14: 566—580.

Spisok literatury

1. Agroklimaticheskie resursy Pavlodarskoj oblasti: Spravochnik red. E'.S. Zarembo. – Alma-Ata: Upravlenie gidrometeorologicheskoy sluzhboj KazSSR, 1971. -178 s.
2. Volobuev V.R. Vvedenie v e'nergetiku pochvoobrazovaniya. - Moskva, Nauka, 1974. – 127 s.
3. Gerasimov I.P. E'lementarnye pochvennye processy kak osnova dlya geneticheskoy diagnostiki pochv // Pochvovedenie, 1981. № 5, s. 102-113.
4. Lemeshko B.Yu. Statisticheskij analiz odnomernyx nablyudenij sluchajnyx velichin: Programmnyaya sistema, Novosibirsk, NGTU, 1995.-125 s.
5. Mikheeva I.V. Veroyatnostno-statisticheskie modeli svojstv pochv (na primere kashtanovyx pochv Kulundinskoj stepi), Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2001. -200 s.
6. Mikheeva I.V. Statisticheskaya e'ntropiya kak kriterij ocenki e'voljucii i dinamiki pochvennogo pokrova //Sib. e'kol. zhurn. 2004 v. № 3. S. 445-454
7. Mikheeva I.V. Monitoring i veroyatnostno-statisticheskaya ocenka ustojchivosti i izmenchivosti prirodnyx ob"ektov pri sovremennyx processax (na primere kashtanovyx pochv Kulundinskoj stepi). - Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2005. –103 s.
8. Mikheeva I.V. Divergenciya veroyatnostnyx raspredelenij svojstv pochv kak kolichestvennaya xarakteristika transformacii pochvennogo pokrova //Sib.e'kol.zhurn.2009 v. № 2. S. 231-236. [Mikheeva I.V. 2009. Divergence of Probability Distribution of the Soil Properties as a Quantitative Characteristic of the Soil Cover Transformation // Contemporary Problems of Ecology. Vol. 2. N 6. P. 231-236.]
9. Mikheeva I.V., Kuz'mina E.D. Analiz izmenenij svojstv pochvy po izmeneniyu ix statisticheskogo raspredeleniya: Metodicheskie rekomendacii.- Novosibirsk: IPA SO RAN; «CE'RIS», 2000. – 23 s.
10. Monin A.S., Shishkov Yu.A. Klimat kak problema fiziki / Uspexi fizicheskix nauk, tom 170, № 4, s. 419-445.
11. Obshhesoyuznaya instrukciya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnyx kart zemlepol'zovaniya, Moskva, Kolos, 1973.-94 s.
12. Prangishvili I.V. Obshhesistemnye zakonomernosti i problemy upravleniya prirodnymi i social'nymi sistemami. Sinergetika i problemy upravleniya. Red. A.A. Kolesnikov. Moskva: Fizmatlit, 2004. –s. 398-419.
13. Rejngard Ya.R. Degradaciya pochv yuga Zapadnoj Sibiri. Lodz'-Pol'sha, 2009. – 636 s.
14. Sennikov V.A., Slyadnev A.P. Agroklimaticheskie resursy yugo-vostoka Zapadnoj Sibiri i produktivnost' zernovyx kul'tur. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 150 s.
15. Sokolov I.A. Pochvoobrazovanie i e'kzogenez. - Moskva: Pochvennyj institut imeni V.V. Dokuchaeva, 1997. – 244 s.
16. Irina Mikheeva. Probabilistic Indicators for Soil Status Evaluation/ Land Quality and Land Use Information in the European Union. Gergely Toth and Tamas Nemeth (Eds). Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2011. -399 pp. ISSN 1018-5593. ISBN 978-92-79-17601-2. doi: 10.2788/40725 (p. 45-55)
17. Kanamori Takafumi , 2014. Scale-Invariant Divergences for Density Functions// Entropy, 16. P- 2611-2628; doi: 10.3390/e16052611.
18. Phillips J.D. Chaotic evolution of some coastal plain soils // Physical Geography. 1993. 14: 566-580.