

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ИЛА И ФИЗИЧЕСКОЙ ГЛИНЫ В ПАХОТНЫХ ЧЕРНОЗЕМАХ ПРИИРТЫШСКОЙ РАВНИНЫ

© 2022 И. В. Михеева , А. А. Оплеухин 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: [mikheeva@issa-siberia.ru](mailto:mikheeva@issa-siberia.ru)

**Цель исследования:** количественно оценить изменения гранулометрического состава черноземов южных под влиянием длительного пахотного использования. Определить информационные эталоны содержания ила и физической глины в пахотных почвах в различные моменты времени.

**Место и время проведения.** Юг Западной Сибири, центральная часть Прииртышской равнины, период 60-90 годы 20-го столетия.

**Методы.** Используемая количественная модель состояния почвы представляет собой совокупность вероятностно-статистических распределений ее свойств в почвенных горизонтах. Произведены расчеты и графический анализ информационной энтропии и дивергенции почвенных свойств.

**Основные результаты.** За исследуемый период в черноземах южных на территории Прииртышской равнины в верхнем слое (0–20 см) произошло увеличение центральных значений и уменьшение вариабельности содержания ила и физической глины. Выявленные изменения произошли за счет модификации вероятностно-статистических распределений этих показателей, заключающейся в уменьшении вероятностей пониженных значений. Аналогичные тенденции выявлены также в слоях 20–30 и 30–50 см, но выражены они в меньшей степени, а глубже по профилю – минимальны. Эта перестройка вероятностно-статистических распределений содержания ила и физической глины осуществлялась в пределах интервалов варьирования, присущих изученным литологическим разновидностям.

**Заключение.** Для количественной оценки состояния и изменений почв в целом необходимо использовать информационные характеристики. Полученные вероятностно-статистические распределения содержания ила и физической глины являются информационными эталонами этих показателей на территории Прииртышской равнины. Они могут служить для сравнения с результатами прошедших, текущих и будущих мониторинговых исследований почв на изучаемой и соседних территориях. Величины информационной энтропии и дивергенции являются скалярными показателями для характеристики вариабельности и трансформаций вероятностно-статистических распределений свойств почв.

**Ключевые слова:** чернозем южный; гранулометрический состав; память почв; вероятностные распределения; информационная энтропия; дивергенция

**Цитирование:** Михеева И.В., Оплеухин А.А. Информационная оценка изменений содержания ила и физической глины в пахотных черноземах Прииртышской равнины // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. с.186. DOI: [10.31251/pos.v5i4.186](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.186)

### ВВЕДЕНИЕ

Гранулометрический состав считается одним из важнейших твердофазных свойств почвы, выступающих в качестве носителей почвенной (педо- и лито-) памяти, и может служить индикатором изменений среды (носителем памяти) геосистем (Память почв, 2008; Targulian, Bronnikova, 2019). Трансформации почв – процесс неизбежный вследствие глобальных и региональных природно-климатических изменений, а также антропогенного влияния. Антропогенные воздействия, включая пахотное использование почв, вызывают существенные изменения почвенного профиля, особенно его верхней части, при этом значительно изменяются характеристики почвы. Агрогенез весьма разнообразно влияет на различные почвообразовательные процессы, в том числе вызывает трансформацию глинистых минералов, при этом происходит разрушение и/или вынос смектитов из пахотной толщи, усиливается выветривание первичных слюд и хлоритов и другое. В почвенном профиле усиливается миграция твердого вещества, представляющая собой комплекс двух сложных взаимосвязанных процессов: элювиирования суспензий из верхних горизонтов и их иллювиирования в более глубокие слои почвы. Эти процессы происходят и в естественных почвах, но в пахотных они приобретают

ускоренный природно-агрогенный характер и приводят к необратимым результатам, которые можно рассматривать как память почв (Караева, 2008).

Некоторые авторы утверждают, что сельское хозяйство оказывает огромное влияние на деградацию почв (Lal, 2015), поэтому необходимо создание объединяющей теории почвообразования в рамках сельскохозяйственной практики, агропедогенеза (Kuzuakov, Zamanian, 2019). Для этого классическая концепция почвообразования должна быть расширена: факторы → процессы → свойства → функции, вместе с их обратными связями с процессами, при этом предлагается новая концепция аттракторов деградации почвы, для чего необходим выбор и анализ основных свойств почвы. Изменения свойств почв, в том числе гранулометрического состава, под влиянием длительного пахотного использования с применением удобрений, уже много лет являются предметом изучения в различных природно-климатических зонах и регионах. Результаты показывают, что в разных почвах степень их выраженности различна. В Европейской части России наиболее существенные изменения гранулометрического состава отмечены в дерново-подзолистых почвах, в пахотном слое которых содержание ила и физической глины убывает в процессе элювирования, а в черноземах выщелоченных обнаружены небольшие по величине изменения гранулометрического состава, имеющие характер тенденции (Байбеков, 2003). В Северном Зауралье в старопашотных черноземах выщелоченных проявляются процессы миграции фракций физической глины вглубь профиля, а перевод в залежное состояние не повлиял на восстановление антропогенных изменений гранулометрического состава (Еремин, 2012). В Западной Сибири наиболее выраженные изменения гранулометрического состава под влиянием длительного пахотного использования с применением удобрений отмечены также в дерново-подзолистых почвах, а черноземы и каштановые почвы представляют собой довольно устойчивую систему, по сравнению с дерново-подзолистыми (Кенжегулова, 2008). В Курганской области, при длительном использовании черноземов выщелоченных на овощном сортоиспытательном участке, отмечено весьма существенное увеличение содержания ила и физической глины в пахотном слое (Человечкова, 2022). При статистическом анализе данных крупномасштабных почвенных обследований юго-западной части Кулундинской степи выявлено статистически достоверное увеличение содержания ила в пахотном горизонте каштановых среднесуглинистых почв, а при орошении слабоминерализованными водами супесчаных и легкосуглинистых каштановых почв увеличение содержания ила в пахотном слое весьма существенное (Mikheeva, 2010).

Большая часть проведенных исследований выполнена на основе многолетних полевых опытов на небольших по площади участках почвенного покрова. В то же время свойства почв обладают существенной вариабельностью. Процессы, происходящие в отдельных почвенных профилях, приводят к более или менее количественно выраженным изменениям свойств в разных точках пространства, что приводит к трансформации варьирования. На вариабельность содержания частиц гранулометрического состава верхних горизонтов почвы могут оказывать влияние эрозионные процессы, как водные, так и ветровые, вследствие которых в пространстве возникают участки сноса и накопления частиц физической глины и/или физического песка. Вследствие этого для целостной оценки изменений почв на значительных по площади территориях необходимо применение статистических, вероятностно-статистических и информационных методов анализа данных крупномасштабных обследований почв. При этом для надежного установления трансформации почв на территории за короткое (<100 лет) время, свойственное периодам интенсивного земледельческого использования, необходимы новые характеристики, позволяющие оценивать и регистрировать небольшие по величине изменения свойств объекта с учетом их вариабельности, так как такие изменения диагностируют проявление возможных тенденций. Методика, предложенная ранее (Михеева, 2017), позволяет количественно оценивать результаты трансформации почв по информационному анализу изменений, произошедших в вероятностных распределениях почвенных свойств.

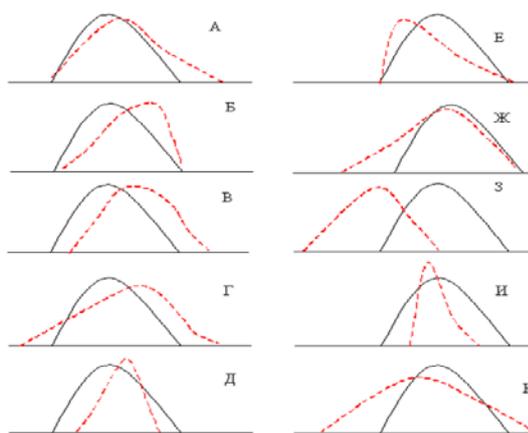
Многие физические, физико-химические и химические свойства почв зависят и статистически коррелируют с содержанием физической глины, и, в особенности, с наиболее дисперсной ее составляющей – с содержанием илистой фракции. Глинистые минералы участвуют в формировании структуры почвы и способности к катионному обмену через взаимодействие с органическим веществом почвы. Благодаря этим взаимодействиям глинистые минералы способствуют функционированию почв и выполнению ими экосистемных функций. Хотя глинистые минералы считаются стабильными в течение длительных периодов времени, недавние исследования показали, что кристаллографические структуры и типы глинистых минералов могут

подвергаться самопроизвольной модификации и трансформации в связи с изменениями условий окружающей среды (Liu et al, 2017). Вследствие этого даже небольшие по величине, но выраженные на обширной территории, сдвиги в содержании ила и физической глины могут иметь значительное влияние на многие свойства, а, следовательно, на экологические и утилитарные функции почв. Поэтому большую практическую значимость представляет достоверная оценка изменений этих показателей почвы в результате длительного пахотного использования агроландшафтов, в том числе в Западной Сибири, что и определило основную цель данной статьи.

Последние годы в России правительством взят курс на информатизацию и цифровизацию для совершенствования управления всех областях деятельности. В области почвоведения увеличилось количество работ по созданию региональных банков данных почвенной информации, почвенных дата-центров, в том числе по гранулометрическому составу почв (Болдырева, 2022). Возникла потребность в новых информационных теоретических и методологических подходах для анализа состояния и изменений почв. В этой связи важно иметь информационные эталоны свойств почв на территориях исследования в разные моменты времени, что является основой методологии информационного анализа. Поэтому практически и методологически важной, с точки зрения информационного анализа, было определение и анализ информационных эталонов содержания ила и физической глины в пахотных почвах Прииртышской равнины, являющихся объектом данного исследования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Методология информационного анализа.** Обычно при анализе изменений свойств почв используют статистическую оценку различий средних значений признаков, реже характеристик варьирования, таких как стандартные отклонения. Коэффициент вариации не всегда адекватно отражает закономерности различий варьирования, поскольку средние значения и стандартные отклонения почвенных свойств могут изменяться неоднозначно в результате протекания процессов трансформаций почв. Проведенные нами ранее исследования показали, что количественно изменения почв заключаются в трансформации структуры варьирования их свойств, что может отражаться или не отражаться в существенных различиях средних значений (рис. 1).



**Рисунок 1.** Типы изменений вероятностных распределений свойств почв за короткое время: а) пять типов возрастания (А–Д); б) пять типов убывания (Е–К). Обозначения: сплошная – исходное состояние, штриховая – измененное состояние.

При этом происходит перестройка вероятностей количественной выраженности значений свойств, увеличение или уменьшение разброса, появление или устранение асимметрии и (или) эксцесса статистического распределения. Функции вероятностно-статистических распределений дают наиболее полную информацию о количественной выраженности изучаемых свойств и их изменениях в результате как антропогенных, так и природных процессов, чем отдельные статистические показатели. Методика идентификации вероятностно-статистических распределений почвенных свойств на основе статистических выборок фактических данных о свойствах почвы была изложена в более ранних публикациях (Михеева, 2017; Михеева, Оплеухин,

2018). В данной методике характеристика вероятностного распределения дается с помощью информационной энтропии (Колмогоров, 1987):

$$(1) \quad s = -\int f(x) \ln f(x) dx$$

Изменения вероятностных распределений оценивают с помощью информационных показателей - относительного изменения энтропии  $\Delta s$ , % и информационной дивергенцией  $d$ :

$$(2) \quad \Delta s = \frac{s_1 - s_2}{s_1} \times 100, \text{ где } s_1 \text{ и } s_2 \text{ значения информационной энтропии в моменты}$$

времени  $t_1$  и  $t_2$ ;

$$(3) \quad d = \int (W1(x) - W2(x)) \ln \left( \frac{W1(x)}{W2(x)} \right) dx, \text{ где } W1(x) \text{ и } W2(x) - \text{сравниваемые функции}$$

вероятностных распределений.

Для идентификации распределений нами было использовано ППП «ISW» (Лемешко, 1995), и для расчета информационных показателей использовали программную среду «R».

**Территория исследования.** В статье представлены результаты вероятностно-статистической и информационной оценки свойств почв значительной территории юга Западной Сибири, расположенной на  $53^{\circ}15'-53^{\circ}47'$  с.ш. и  $75^{\circ}05'-77^{\circ}01'$  в.д. В геоморфологическом отношении территория является центральной частью Прииртышской равнины, сложенной породами супесчаного, легкосуглинистого и среднесуглинистого гранулометрического состава. Климат территории резко континентальный с сухим жарким летом и холодной малоснежной зимой; характеризуется сухостью весенне-летнего периода с максимумом осадков в середине лета. Годовое количество осадков составляет в среднем 275,5 мм, иногда до 400 мм, а коэффициент увлажнения равен 0,4–0,6, что характерно для засушливой степи.

Почвы преимущественно черноземы южные (Классификация..., 1977) или *Naptic Chernozem Pachic* по классификации IUSS Working Group WRB (2015), с небольшими участками комплексов засоленных и солонцеватых почв. Основную площадь использовали и продолжают интенсивно использовать под пахотное земледелие для выращивания пшеницы, кукурузы, многолетних трав. На изученной территории черноземы южные легко- и среднесуглинистого гранулометрического состава являются наиболее распространенными почвами, поэтому в статье дана оценка состояния этих почв в начале шестидесятых (1963) и в конце восьмидесятых (1989) годов двадцатого столетия.

В начале этого периода значительно расширились площади пахотных территорий в рамках государственной программы Советского Союза по освоению целинных и залежных земель. Как известно, вследствие тотальной распашки, совпавшей во времени с высокой ветровой активностью, на больших площадях пахотных почв активизировались дефляционные процессы. Однако на изучаемой территории на черноземах южных легко- и среднесуглинистого гранулометрического состава процессы ветровой эрозии были не выражены, поскольку данные почвы проявляли устойчивость к развеванию (Mikheeva, Kuzmina, 2000). Кроме того, при обработке почвы широко использовали безотвальные технологии и другие противоэрозионные мероприятия.

Временной интервал 60-90-годов прошлого столетия для климатологов мира и России является базовым для построения трендов и выявления климатической аномалий. Начиная с середины восьмидесятых годов на изученной территории отмечают тренд на потепление. Это выражается в повышении среднегодовых и 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 в других районах юга Западной Сибири и России<sup>1, 2</sup>.

**Методы и исходные данные.** Предложенная нами количественная модель состояния почвы представляет собой набор вероятностно-статистических распределений (ВСП) свойств почвы в пределах исследуемого объекта (Михеева, 2017). В статье проанализированы и оценены изменения ВСП содержания ила и физической глины (по Качинскому) в слоях почвы 0–20, 20–30, 30–50 и 50–100 см в начале шестидесятых и конце восьмидесятых годов двадцатого столетия.

<sup>1</sup><http://en.tutiempo.net/climate>

<sup>2</sup><http://climatechange.su>

Исходными данными послужили материалы крупномасштабных (1:25000) почвенных исследований, проведенных на исследуемой территории в разное время стандартными методами (Общесоюзная инструкция..., 1973).

Все полученные данные по этой территории служили для создания банка данных. Построение базы данных, группирование и анализ данных проводили с использованием методов статистического анализа. Каждая информационная строка в базах данных характеризует такие параметры почвы, как глубина слоя, содержание гумуса, pH, содержание гранулометрических фракций и др. Первым обязательным этапом обработки данных была их группировка по почвенно-генетическому принципу. Каждая группа относится к одному моменту времени, одному подтипу и литологической разновидности почвы. Объем полученных статистических выборок составлял 39-130 почвенных разрезов, в зависимости от распространенности конкретной группы почв и возможностей проведения исследований, что было достаточно для проведения вероятностно-статистического и информационного анализа. Правильность и достоверность группировки была доказана унимодальностью полученных вероятностных распределений и высоким уровнем значимости (табл. 2).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приведены статистические характеристики содержания ила и физической глины в черноземах южных, используемых в пахотном земледелии, на начало и конец исследуемого тридцатилетнего периода. Данные показывают, что как в легкосуглинистой, так и в среднесуглинистой разновидности черноземов южных существенно увеличились средние значения содержания ила, в меньшей степени физической глины, что особенно выражено в поверхностном слое. С другой стороны, данные показывают существенное уменьшение стандартного отклонения, что выражено весьма значительно в верхнем полуметре в обеих проанализированных в статье разновидностях черноземов южных.

**Таблица 1**

Статистические характеристики содержания ила и физической глины в черноземах южных, %

Глубина слоя, см	Ил		Физическая глина	
	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Легкосуглинистые почвы				
1963 год (n = 53)				
0-20	12,16	2,05	24,84	3,11
20-30	15,62	3,24	26,75	4,30
30-50	15,20	3,73	25,00	6,26
50-100	14,93	3,53	23,10	5,38
1989 год (n = 65)				
0-20	15,97	1,70	26,41	2,48
20-30	16,59	1,95	26,48	2,66
30-50	16,90	2,50	25,12	3,66
50-100	15,17	3,03	23,01	5,13
Среднесуглинистые почвы				
1963 год (n = 39)				
0-20	15,63	3,09	32,58	2,46
20-30	19,93	3,59	34,60	4,59
30-50	20,46	3,95	32,85	6,71
50-100	19,20	5,38	30,57	9,35
1989 год (n = 130)				
0-20	20,72	1,99	34,56	2,60
20-30	21,94	2,14	34,61	3,29
30-50	21,54	3,06	31,73	6,01
50-100	19,54	3,74	32,43	6,38

Взаимное действие всех факторов, влияющих на формирование почвенной вариабельности, суммарно отражается в вероятностях проявления тех или иных значений изучаемых показателей.

При анализе этих вероятностей определение функций вероятностных распределений основных свойств почв или грунтов и их параметров по наблюдаемым данным является критическим начальным шагом, поскольку от этих оценок зависят последующий анализ состояния почв или грунтов, что имеет большое значение как в сельском хозяйстве, так и для оценки рисков и надежности геотехнических применений (Deng, 2022).

В таблице 2 для каждого слоя почвы приведены тип функции вероятностного распределения и параметры, полученные в результате статистической процедуры идентификации ВСП. Количество параметров для различных функций изменяется от двух до четырех, при этом с целью унификации они приведены в следующем порядке: параметр сдвига, или смещения (аналог среднего значения), параметр масштаба (аналог дисперсии), затем, если необходимо параметр(ы) формы. В таблице 2 приведены значения достигнутой вероятности в соответствии со статистиками четырех непараметрических критериев – Колмогорова, Смирнова, двух модификаций критерия Мизеса, а также средняя достигнутая вероятность по совокупности критериев. Необходимость использования совокупности критериев объясняется тем, что в ряде случаев значения статистических критериев могут значительно различаться, так как они характеризуют разные меры близости теоретического вероятностного распределения и фактического статистического распределения (Лемешко, 1995).

Достигнутая вероятность  $p$  по статистикам ряда непараметрических критериев довольно высока во всех слоях как легкосуглинистых, так и среднесуглинистых почв (см. табл. 2). Это означает, что: 1) набор функций вероятностных распределений, выбранных для моделирования варибельности гранулометрического состава, соответствует фактическим данным о почвах; 2) набор ВСП, полученный в результате процедуры идентификации ближайших по совокупности критериев функций вероятностных распределений, может рассматриваться как информационная вероятностно-статистическая модель содержания ила и физической глины в изученных почвах.

Полученные функции ВСП относятся к двум группам (см. табл. 2) – симметричные с разной выраженностью концентрации центральной части (нормальное, логистическое, Коши, Лапласа, двойное экспоненциальное) и несимметричные, обладающие в той или иной степени выраженной правой асимметрией и более или менее выраженной центральной частью (Ln-нормальное, максимального значения, Su-Джонсона).

**Содержание ила.** Вероятностно-статистические распределения содержания ила (ВСП СИ) в легкосуглинистой разновидности в начале 60-х годов в слоях верхней полуметровой толщи характеризовались симметричными функциями (нормальное, логистическое, Коши) и только во втором полуметре ВСП СИ обладало небольшой асимметрией (Ln-нормальное) (см. табл. 2). За исследуемый период ВСП СИ в легкосуглинистой разновидности сместилось вправо в сторону повышенных значений (рис. 2). Среднее значение, которое, в случае нормального распределения является параметром сдвига, увеличилось на 3,8%, при небольшом уменьшении параметра масштаба, в данном случае дисперсии (см. табл. 1, 2). Тип ВСП при этом не изменился, сохранилось нормальное распределение, однако вероятность пониженных значений содержания ила 5–10% уменьшилась практически до нуля, зато значительно увеличилась вероятность значений 15–20% (см. рис. 2).

В слоях 20–30 и 30–50 см перестройка ВСП СИ также заключается в уменьшении вероятностей пониженных для данных горизонтов значений содержания ила и небольшом увеличении вероятностей повышенных значений, что больше выражено в слое 30–50 см (см. рис. 2). Эта тенденция выражена в этих слоях намного менее значительно, чем в поверхностном горизонте и не привела к существенным смещениям ВСП, несмотря на выявленные изменения средних значений (см. табл. 1). Однако перестройка структуры вероятностей привела к изменению типов распределений исходно симметричных логистического и Коши в Ln-нормальное, с небольшой степенью выраженности правой асимметрии. В слое 50–100 см перестройка ВСП СИ аналогична, но выражена в гораздо меньшей степени, чем в более высоких горизонтах, при этом его тип и параметры существенно не изменились.

Содержание ила в среднесуглинистой разновидности исследованных черноземов южных в среднем по отдельным горизонтам на 3,5–5,0% выше, чем в легкосуглинистой разновидности (см. табл. 1). Дисперсия содержания ила в поверхностном горизонте и слое 50–100 см тоже существенно выше в более легкой разновидности почвы, а в слоях 20–30 и 30–50 см она в обеих разновидностях почв примерно одинакова.

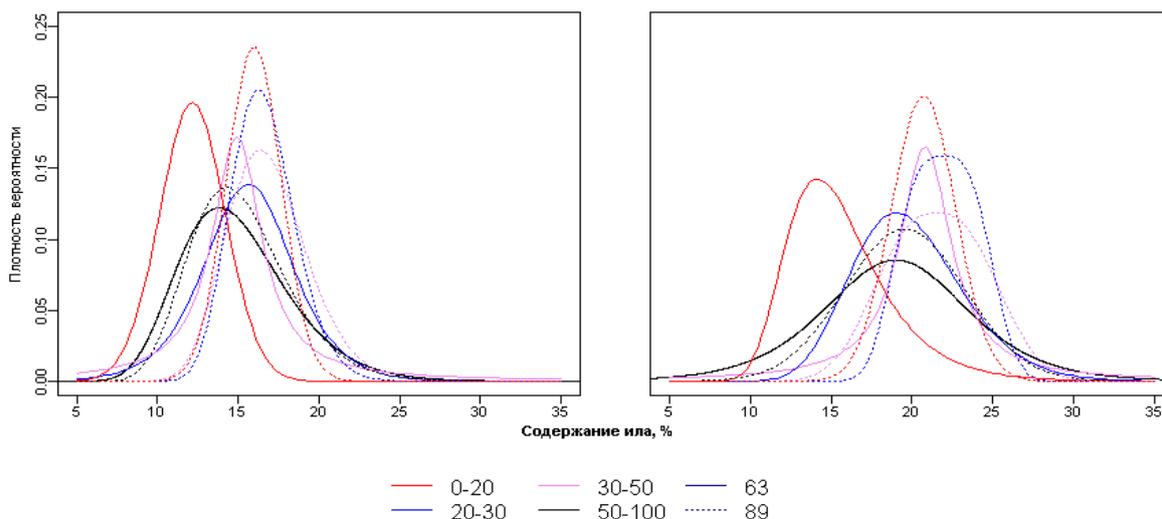
Таблица 2

Вероятностно-статистические распределения содержания ила и физической глины в черноземах южных

Слой, см	Функция <sup>а</sup>	Параметры <sup>б</sup> $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$	Достигнутая вероятность $p$ по критериям				$p$ сред.
			Колмогорова	Смирнова	$\omega_2$	$\Omega_2$	
<b>Легкосуглинистые почвы</b>							
Содержание ила (%), 1963-1967 годы (n = 53)							
0-20	N	12,16; 2,03	0,22	0,44	0,26	0,35	0,32
20-30	Логист.	15,63; 1,8	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99
30-50	Коши	14,91; 1,85	0,61	0,53	0,54	0,34	0,51
50-100	Лп-норм.	2,68; 0,23	0,65	0,88	0,70	0,82	0,76
1989 год (n = 65)							
0-20	N	15,97; 1,69	0,59	0,36	0,45	0,49	0,47
20-30	Лп-норм.	2,80; 0,12	0,35	0,70	0,59	0,51	0,54
30-50	Лп-норм.	2,81; 0,15	0,80	0,94	0,94	0,90	0,89
50-100	Лп-норм.	2,70; 0,20	0,90	0,56	0,84	0,82	0,78
Содержание физической глины (%), 1963-1967 годы (n = 53)							
0-20	ДЭ	24,80; 4,88; 2,69	0,46	0,00	0,64	0,50	0,4
20-30	N	26,75; 4,27	0,72	0,81	0,66	0,78	0,75
30-50	Макс.	22,11; 4,95	0,80	0,69	0,60	0,41	0,62
50-100	Лапласа	22,48; 3,78	0,79	0,74	0,86	0,63	0,75
1989 год (n = 65)							
0-20	N	26,40; 2,46	0,36	0,40	0,08	0,04	0,22
20-30	ДЭ	26,36; 4,44; 3,48	0,47	0,00	0,53	0,45	0,36
30-50	Макс.	23,41; 3,0	0,73	0,92	0,71	0,77	0,78
50-100	Лп-норм.	3,11; 0,22	0,72	0,48	0,75	0,70	0,66
<b>Среднесуглинистые почвы</b>							
Содержание ила (%), 1963-1967 годы (n = 30)							
0-20	Макс.	14,17; 2,58	0,63	0,81	0,75	0,81	0,75
20-30	Лп-норм.	3,00; 0,17	0,71	0,81	0,76	0,71	0,75
30-50	Коши	20,82; 1,93	0,30	0,16	0,33	0,32	0,28
50-100	Логист.	18,99; 2,93	0,77	0,62	0,80	0,83	0,75
1989 год (n = 95)							
0-20	N	20,72; 1,99	0,47	0,57	0,73	0,85	0,66
20-30	ДЭ	21,93; 3,52; 3,10	0,85	0,00	0,95	0,93	0,68
30-50	ДЭ	21,54; 4,75; 2,52	0,40	0,00	0,56	0,58	0,39
50-100	N	19,54; 3,72	0,78	0,53	0,83	0,92	0,76
Содержание физической глины (%), 1963-1967 годы (n = 30)							
0-20	Макс.	31,43; 1,99	0,92	0,76	0,60	0,52	0,7
20-30	Su-Джонс.	31,60; 3,09; -0,79; 1,22	0,76	0,00	0,54	0,70	0,5
30-50	Логист.	32,99; 3,70	0,73	0,90	0,67	0,62	0,73
50-100	Логист.	30,21; 5,26	0,81	0,67	0,68	0,53	0,67
1989 год (n = 95)							
0-20	Лп-норм.	3,54; 0,075	0,31	0,19	0,19	0,08	0,20
20-30	ДЭ	34,56; 5,19; 2,67	0,65	0,00	0,74	0,74	0,53
30-50	N	31,73; 5,98	0,51	0,58	0,59	0,34	0,51
50-100	N	29,71; 6,35	0,34	0,18	0,65	0,69	0,46

Примечания.

<sup>а</sup> Обозначения функций: Макс. – максимального значения, Лп-норм – логарифмически нормальное, Логист. – логистическое, N – нормальное (Гаусса), ДЭ – двойное экспоненциальное.<sup>б</sup> Порядок параметров:  $\theta_0$  – сдвига,  $\theta_1$  – масштаба,  $\theta_2(\theta_3)$  – формы. $\omega_2$  – критерий Крамера–Мизеса–Смирнова;  $\Omega_2$  – критерий Андерсона–Дарлингга.



**Рисунок 2.** Функции вероятностно-статистического распределения содержания ила в черноземах южных в 1963 и 1989 годах: слева – легкосуглинистый; справа – среднесуглинистый.

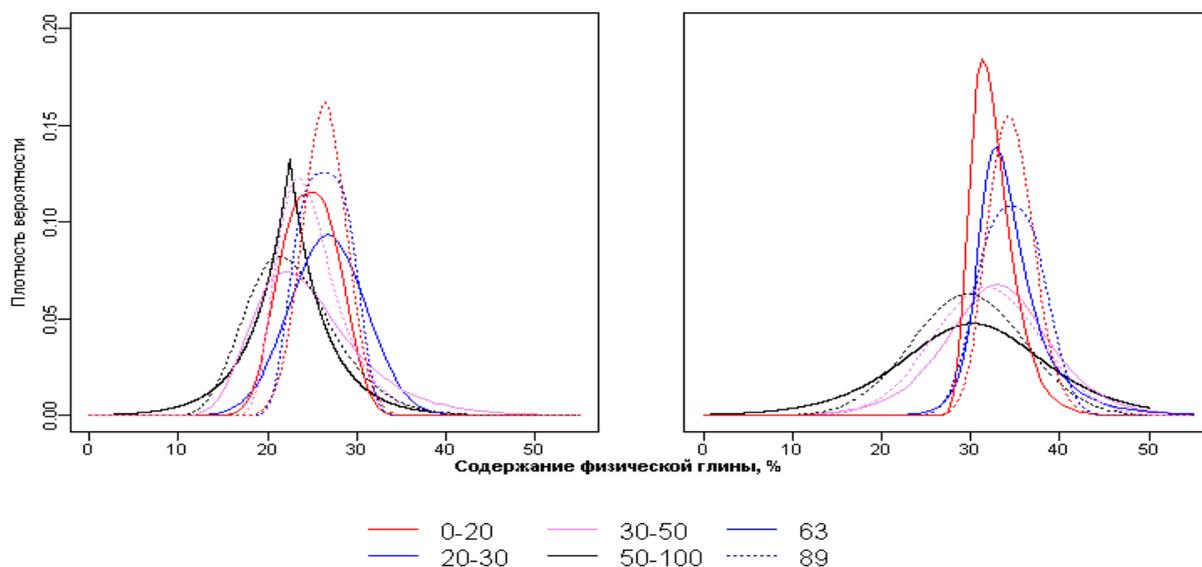
Закономерности ВСР СИ в среднесуглинистой разновидности несколько отличаются от рассмотренных выше для легкосуглинистой почвы (см. рис. 2). Исходно в начале 60-х годов двадцатого столетия ВСР СИ в слоях 0–20 и 20–30 см обладали выраженной правой асимметрией, в большей степени в поверхностном горизонте. В начале 60-х годов в слоях 30–50 и 50–100 см ВСР СИ были симметричны, причем в слое 30–50 см оно отличалось более узким центром, здесь тип ВСР СИ был – Коши, а в слое 50–100 см – логистическим.

В конце исследуемого периода во всех горизонтах среднесуглинистых черноземов южных ВСР СИ являлись симметричными: в поверхностном горизонте и в слое 50–100 см тип ВСР СИ – нормальное, а в слоях 20–30 и 30–50 см – двойное экспоненциальное. Перестройка ВСР в слоях 0–20 и 20–30 см заключалась в существенном уменьшении вероятности пониженных и увеличении вероятности повышенных значений, что привело к уменьшению интервала варьирования, выраженному сдвигу и изменению типа функций. В слоях 30–50 и 50–100 см изменения ВСР СИ аналогичные, но выражены в гораздо меньшей степени, что не привело к изменениям интервалов варьирования и смещению, тем не менее, тип функций изменился вследствие расширения центральной части распределений.

**Содержание физической глины.** Содержание физической глины (СФГ) отражает суммарное содержание в почве элементарных частиц с диаметром менее 0,01 мм. Помимо илстых частиц с диаметром менее 0,001 мм, в этот показатель входят также содержание мелкой и средней пыли с диаметрами, соответственно 0,001–0,005 мм и 0,005–0,01 мм. В изученных почвах доля мелкой и средней пыли в СФГ составляет 40–50%. Доля СИ в СФГ в начале 60-х годов составляла от 48–49% в поверхностном горизонте и 57–60% – в иллювиальном горизонте. За исследованный 30-летний период доля СИ в СФГ в поверхностном горизонте увеличилась до 60%, а в иллювиальном – до 63%, таким образом, относительное СИ в СФГ заметно возросло.

ВСР СФГ в легкосуглинистой разновидности в слоях 0–20 и 20–30 см в начале 60-х годов были симметричны с более или менее выраженным центром, двойное экспоненциальное и нормальное, соответственно (табл. 2, рис. 3). В слое 30–50 см отмечается правая асимметрия ВСР СФГ, которое характеризуется типом максимального значения, а в слое 50–100 см ВСР симметричное с очень узким центром – типом Лапласа.

Через 30 лет ВСР СФГ в верхних слоях легкосуглинистых черноземов южных сохранило симметричность, однако изменения, заключающиеся в уменьшении вероятности пониженных значений и увеличении вероятности значений выше центральных, привели к изменениям типов ВСР на нормальное и двойное экспоненциальное, соответственно. Эти изменения отразились и на статистических характеристиках: в слое 0–20 см среднее значение возросло на 1,6%, в 20–30 см оно практически не изменилось, однако стандартное отклонение СФГ весьма существенно уменьшилось в обоих слоях.



**Рисунок 3.** Функции распределения содержания физической глины в черноземах южных в 1963 и 1989 годах: слева – легкосуглинистый; справа – среднесуглинистый.

В слое 30–50 см сохранилась правая асимметрия ВСР, тип ВСР максимального значения не изменился, однако перестройка ВСР все-таки произошла. При изменении параметра сдвига на 1,3%, что, впрочем, не отражает среднее значение, очень сильно уменьшился параметр рассеяния, характеризующий значительное суживание варьирования, что отражается также весьма выраженным снижением стандартного отклонения.

В слое 50–100 см снижение вероятности пониженных и рост вероятности центральных значений привел к расширению центральной части ВСР, возникновению небольшой правой асимметрии, изменению типа распределения Лапласа на Ln-нормальное. Однако изменения статистических характеристик эти изменения практически не отражают, что лишний раз убеждает, что анализ динамики ВСР более информативен в случае изучения изменений объекта.

В среднесуглинистой разновидности черноземов южных ВСР СФГ в начале 60-х годов в слоях 0–20 и 20–30 см обладали правой асимметрией, более выраженной в поверхностном слое, где характеризуется типом максимального значения, в нижележащем слое – распределение Су-Джонсона. В слоях 30–50 и 50–100 см ВСР СФГ симметричны и идентифицированы как логистические.

За 30 лет в слое 0–20 см произошла перестройка ВСР СФГ вследствие уменьшения вероятностей пониженных и роста вероятностей центральных значений, что привело к расширению центра распределения и изменению типа ВСР на Ln-нормальный. В результате произошел некоторый сдвиг ВСР СФГ, что также отражается увеличением среднего значения на 2%, однако величина стандартного отклонения не отражает произошедших изменений.

Аналогичные изменения ВСР произошли и в слое 20–30 см, однако здесь они не привели к изменению среднего значения, хотя изменение типа распределения произошло. В слоях 30–50 и 50–100 см перестройка ВСР заключалась в расширении центральной части, причем в 30–50 небольшой сдвиг ВСР в сторону уменьшения СФГ на 1,2% и слабо выраженном снижении рассеяния привели к нормальному типу ВСР. Аналогично в слое 50–100 см, однако здесь существенно уменьшился и разброс значений.

**Анализ информационных характеристик.** На основе идентифицированных ВСР СИ и СФГ (см. табл. 2) по формулам 1 и 2 проведены расчеты информационной энтропии  $s$  и ее относительного изменения  $\Delta s$ , %. Эти величины можно использовать для количественной оценки степени варьирования содержания ила и физической глины в исследуемых почвах и ее относительного приращения или убывания в каждом почвенном слое за исследуемый период (табл. 3). Для скалярной информационной оценки перестройки ВСР СИ и СФГ за тридцатилетний период по формуле (3) рассчитана величина информационной дивергенции  $d$  (см. табл. 3).

Таблица 3

Информационные характеристики вероятностно-статистических распределений содержания ила и физической глины в черноземах южных

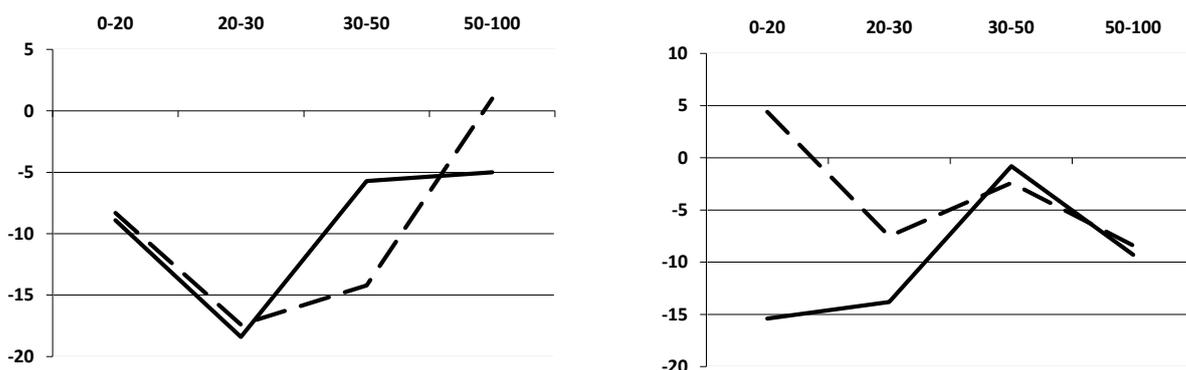
Глубина, см	$s^l$	$\Delta s, \%$	$d$	$s$	$\Delta s, \%$	$d$
	Ил			Физическая глина		
Легкосуглинистые почвы						
1963 год						
0-20	2,13	–	–	2,53	–	–
20-30	2,56	–	–	2,87	–	–
30-50	2,45	–	–	3,11	–	–
50-100	2,62	–	–	2,98	–	–
<b>Σ по профилю</b>	<b>9,76</b>	–	–	<b>11,49</b>	–	–
1989 год						
0-20	1,94	8,9	4,37	2,32	8,3	0,46
20-30	2,09	18,4	1,23	2,37	17,4	1,28
30-50	2,31	5,7	2,99	2,67	14,2	0,95
50-100	2,49	5,0	0,04	3,01	-1,0	0,31
<b>Σ по профилю</b>	<b>8,83</b>	<b>38</b>	<b>8,63</b>	<b>10,37</b>	<b>38,9</b>	<b>3,0</b>
Среднесуглинистые почвы						
1963 год						
0-20	2,46	–	–	2,27	–	–
20-30	2,40	–	–	2,81	–	–
30-50	2,27	–	–	3,29	–	–
50-100	2,68	–	–	3,57	–	–
<b>Σ по профилю</b>	<b>9,81</b>	–	–	<b>11,94</b>	–	–
1989 год						
0-20	2,08	15,4	5,19	2,37	-4,4	0,71
20-30	2,07	13,8	1,83	2,60	7,5	0,42
30-50	2,25	0,8	0,86	3,21	2,4	0,07
50-100	2,43	9,3	0,23	3,27	8,4	0,24
<b>Σ по профилю</b>	<b>8,83</b>	<b>39,3</b>	<b>8,11</b>	<b>11,45</b>	<b>13,9</b>	<b>1,44</b>

Примечание.

$s^l$ ,  $\Delta s$ ,  $d$  – величины информационной энтропии, ее приращения и информационной дивергенции, вычисленные по формулам 1-3. Прочерк – нет данных.

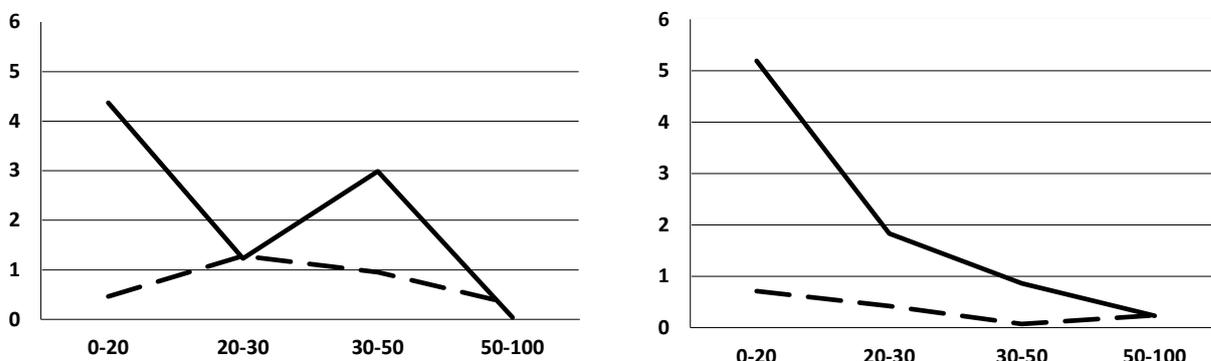
В легкосуглинистых почвах относительное убывание информационной энтропии СИ в наибольшей степени (–18,4%) выражено в слое 20–30 см. В других слоях почвы это убывание совсем невелико (менее 10%). Энтропия СФГ в верхних слоях аналогична энтропии СИ, однако в слое 30–50 см убывание энтропии СФГ выражено сильнее (–15%), чем убывание энтропии СИ. При этом во втором полуметре энтропия СФГ за исследованный период практически не изменилась. В среднесуглинистых почвах относительное убывание энтропии СИ максимально в верхних тридцати сантиметрах (–15%), в слое 30–50 см энтропия СИ практически не изменилась, а глубже по профилю она уменьшилась на 9%. Информационная энтропия СФГ в слое 0–20 см немного увеличилась (на 5%), а глубже по профилю уменьшилась на 5–10%.

Графики, представленные на рисунке 4 показывают, что относительное приращение информационной энтропии содержания ила и физической глины за исследованный период отрицательно практически во всех слоях почвы, что говорит об убывании энтропии, а следовательно, уменьшении варьирования, которое произошло как было показано выше, вследствие перестройки ВСП, а в некоторых случаях сдвига.



**Рисунок 4.** Относительное (%) приращение (убывание) информационной энтропии за период 1963–1989 гг. содержания ила (сплошная линия) и физической глины (штриховая линия) в черноземе южном: слева – легкосуглинистом; справа – среднесуглинистом.

Графики на рисунке 5 показывают, что информационная дивергенция СИ в обеих исследованных разновидностях черноземов южных максимальна в слое 0–20 см и равна 4,5–5,2, в слое 20–30 см – 1,2–1,8, а во втором полуметре совсем невелика, близка к нулю. В слое 30–50 см в легкосуглинистой разновидности наблюдается существенные информационные изменения СИ, что выражается величиной информационной дивергенции равной 3,0. Информационная дивергенция СФГ в обеих разновидностях невелика, она значительно меньше 1,0, и только в легкосуглинистой разновидности в слоях 20–30 и 30–50 см она равна 1,3–1,0.



**Рисунок 5.** Информационная дивергенция за период 1963–1989 гг. содержания ила (сплошная линия) и физической глины (штриховая линия) в черноземе южном: слева – легкосуглинистом; справа – среднесуглинистом.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе выявлено, что за период 1963–1991 годы произошло увеличение содержание ила и физической глины в поверхностном слое пахотных легко- и среднесуглинистых черноземов южных, которые являются наиболее распространенными почвами на исследуемой территории Прииртышской равнины. Возможно, это связано с возникшим в середине восьмидесятых годов прошлого столетия трендом на повышение температур, что могло усилить почвообразовательные процессы. Обнаруженные количественные изменения гранулометрического состава необратимы, поэтому их можно рассматривать природно-агрогенную память почв.

Для реальных сложных систем следствием увеличения степени открытости, то есть при усилении потоков энергии и вещества через их границы, является убывание энтропии их свойств (Прангишвили, 2004). В случае почвенных систем возрастание открытости означает усиление физических, химических и биологических антропогенных воздействий и природно-климатических процессов, вызывающих увеличение потоков вещества и энергии, проходящих через поверхность

почвы, а также через границы почвенных горизонтов, в виде тепла, почвенной влаги, органических и неорганических веществ.

В работе (Smeck et al, 1983), основываясь на общих представлениях термодинамики открытых систем (Prigogine, 1961) теоретически рассмотрены возможные изменения энтропии почвенных систем в зависимости от почвообразовательных процессов. При этом авторами было высказано, что изменения энтропии ( $\Delta S$ ) почвенной системы из-за различных почвообразовательных процессов могут иметь положительные или отрицательные величины, что оценивает изменение хаотичности или беспорядка в почве, вследствие почвообразовательных процессов. По мнению этих авторов физическое перемешивание, выветривание первичных минералов - процессы, приводящие к положительному приращению энтропии, а элювиально-иллювиальный процесс, формирование вторичных минералов, выщелачивание, накопление органического вещества приводят к убыванию энтропии.

Установленное нами убывание энтропии содержания ила и физической глины в пахотных черноземах южных, как и показанное ранее снижение энтропии содержания гумуса, по-видимому, является фундаментальным системным процессом, характерным для почв открытых сложных систем в связи с увеличением их открытости. Убывание энтропии различных почвенных свойств происходит по-разному как в отдельных горизонтах, так и в почвенном профиле в целом: снижение энтропии содержания ила (СИ) составляет в поверхностном горизонте не более 10–15%, а уменьшение энтропии содержания гумуса (СГ) до 60% от начального состояния (Михеева, Оплеухин, 2015).

Анализ полученных результатов показал, что в черноземах южных за тридцать лет интенсивного пахотного использования на исследуемой территории наиболее существенные изменения ВСР СИ произошли в верхнем двадцатисантиметровом слое почвы; в слое 20–30 см эти изменения выражены менее значительно. Трансформация ВСР заключается в убывании вероятностей пониженных и росте вероятностей центральных и повышенных значений (вариант Б возрастания свойства на рис. 1). Именно, произошедшие изменения ВСР СИ являются причиной роста средних значений и уменьшения стандартных отклонений этого показателя. Вследствие произошедших изменений ВСР, при том, что верхний предел практически не изменился, варьирование содержания ила сократилось, что отражается весьма существенным снижением стандартного отклонения – на 20–40% от исходной величины. Уменьшение информационной энтропии менее чем на 10–15% от начального состояния дает более умеренное восприятие убывания варьирования СИ, и эта оценка более обоснована, так как она учитывает трансформацию ВСР, поэтому для оценки изменений варьирования свойств предпочтительна информационная энтропия.

Информационная оценка изменений свойств почвы проведена нами с помощью скалярной, независимой от единиц измерения, величины информационной дивергенции. Ее преимущество в том, что она применима для количественной оценки различий ВСР свойств всякого рода, в различных интервалах варьирования, объектах, горизонтах и т.п. В данной статье проведено сравнение одних и тех же свойств (СИ и СФГ) в пределах одного объекта (черноземы южные Прииртышской равнины) в разные моменты времени (начало 60-х и конец 80-х годов 20 столетия), поэтому информационная дивергенция дает количественную оценку изменений ВСР изучаемых свойств произошедших в данных почвах за рассматриваемый период.

Величина информационной дивергенции позволяет ранжировать свойства, горизонты, почвы, объекты по степени различий, а также по степени уязвимости при антропогенных воздействиях и климатических изменениях (Михеева, 2009). Так, максимальная информационная дивергенция СИ в черноземах южных за 30 лет достигает 4,5–5,2 в слое 0–20 см. В более глубоких горизонтах черноземов южных изменения ВСР СИ, так же как и в поверхностном слое, заключались в существенном уменьшении вероятности пониженных значений. Наиболее сильно это проявилось в слое 30–50 см легкосуглинистых почв (информационная дивергенция равна 3,0), при этом вероятность пониженных значений СИ снизилась практически до нуля, и вследствие этого отмечен рост нижнего предела интервала варьирования. В среднесуглинистой разновидности аналогичная тенденция наблюдается в слое 20–30 см (информационная дивергенция равна 1,8).

Информационная дивергенция содержания гумуса (СГ) в поверхностном слое, при упомянутом выше драматическом уменьшении энтропии, за этот период намного меньше и равна 0,2–0,5 (Михеева, Оплеухин, 2015). Таким образом, произошедшие за исследуемый период

информационные изменения СИ в поверхностном слое значительно сильнее, чем СГ, хотя уменьшение энтропии, наоборот, более выражено для СГ, что было вызвано существенным убыванием вероятности повышенных значений СГ (см. вариант Е убывания свойства на рис. 1). Информационная дивергенция СИ и СГ внутри почвенного профиля сопоставима: для СГ в слое 30-50 в легкосуглинистых черноземах южных – 4,5, в среднесуглинистых – 2,5 (Михеева, Оплеухин, 2015). Перестройка ВСП этих почвенных характеристик внутри профиля вызвана существенным ростом нижних пределов варьирования СИ и СГ (см. варианты Д и И на рис. 1).

Такая тенденция, вероятно, вызвана внутрипрофильным перемещением илистых частиц из верхних горизонтов почвы в более глубокие слои. Данный процесс можно оценить как слабый или умеренный, поскольку он отразился только на нижней части интервала варьирования и не привел к смещению верхнего предела варьирования СИ. По всей видимости, эти изменения произошли вследствие увеличения количества влаги, поступающей в пахотную почву в течение длительного времени, на что указывает разница в проявлении трансформаций в литологических разновидностях почвы: в легкосуглинистых почвах они выявлены в более глубоком слое, что, скорее всего, вызвано большей влагопроводностью легкосуглинистых почв, в силу их более легкого гранулометрического состава (Панфилов, Сенькова, 1988).

Энтропия является аддитивной величиной, поэтому энтропия почвенного профиля равна сумме энтропий в отдельных слоях. Суммарная энтропия СИ в почвенном профиле легкосуглинистых и среднесуглинистых почв практически одинакова (9,8), а через тридцать лет уменьшилась до 8,8 в обеих разновидностях. При этом сумма различий энтропий по слоям больше, чем различие суммарных энтропий за прошедший период, что свидетельствует о том, что произошедшие изменения затрагивают в большей степени отдельные слои почвы, тогда как почвенный профиль в целом сохраняет достаточную устойчивость к изменениям.

Суммарные по почвенному профилю значения энтропии СФГ в легкосуглинистой и среднесуглинистой почве в начале периода близки по величине 11,5 и 11,9. В конце периода суммарная по профилю энтропия в легкосуглинистой почве уменьшилась до 10,4, но в среднесуглинистой почве практически не изменилась. Наиболее существенные изменения ВСП СФГ произошли в легкосуглинистой разновидности в слое 20–30 см (дивергенция 1,28), несколько менее они выражены в слое 30–50 см (дивергенция 0,95), при этом произошло увеличение нижнего предела варьирования и небольшое снижение вероятности повышенных значений.

## ВЫВОДЫ

Изменения в составе твердой фазы почвы необратимы, поэтому они сохраняются и формируют длительную "память" почвы. В связи с этим достоверная количественная оценка изменений гранулометрического состава, особенно содержания мелких частиц, очень важна для выяснения значимости современных процессов трансформации почвы, суммарный результат которых будет сохраняться в почвенном профиле и, в дальнейшем, влиять на экологические и утилитарные функции почв.

Выявлено, что на изучаемой территории Прииртышской равнины за период 1963–1989 гг. в пахотных почвах произошло увеличение среднего значения содержания ила в поверхностном слое, соответственно, на 3,8–5,1% в легко- и среднесуглинистой разновидностях черноземов южных. Увеличение среднего содержания физической глины составило 1,5–2,0%, что не вывело значения этого показателя из пределов, присущих литологическим разновидностям. Увеличение средних значений содержания ила и физической глины, сопровождалось убыванием их стандартных отклонений, что наиболее существенно выражено для содержания ила в верхнем полуметре.

Доля содержания ила в физической глине в начале 60-х годов составляла 48–49% в поверхностном горизонте и 57–60% – в иллювиальном горизонте. За исследованный 30-летний период она увеличилась до 60% в поверхностном горизонте и 63% – в иллювиальном. Таким образом, относительное содержание ила в физической глине заметно возросло. Трансформации затрагивают отдельные слои почвы, тогда как почвенный профиль в целом сохраняет устойчивость.

Выявленные количественные изменения произошли вследствие существенной перестройки вероятностно-статистических распределений содержания ила, которая в поверхностном слое оценивается высокими значениями информационной дивергенции 4,4–5,2. Сущность этих трансформаций заключается в выраженной тенденции к увеличению нижнего предела

варьирования, что и привело к росту среднего содержания ила и уменьшению стандартного отклонения. В слое 30–50 см легкосуглинистых почв и в слое 20–30 см среднесуглинистых почв тенденция к увеличению нижнего предела варьирования содержания ила выражена, но в меньшей степени, а в слое 50–100 см существенных количественных изменений не выявлено.

Перестройка вероятностно-статистических распределений содержания физической глины за исследуемый период в пахотных черноземах южных выражена в меньшей степени и оценивается невысокими значениями информационной дивергенции 0,5–0,7. Сущность изменений вероятностно-статистических распределений содержания физической глины заключается в уменьшении вероятности пониженных и увеличении вероятности значений выше центральных, что привело к изменению типов вероятностных распределений, несмотря на малые изменения статистических характеристик.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для количественной оценки состояния и изменений почв в целом на территории необходимо использовать информационные характеристики. Полученные вероятностно-статистические распределения содержания ила и физической глины являются информационными эталонами этих показателей на территории Прииртышской равнины. Они могут служить для сравнения с результатами прошедших, текущих и будущих мониторинговых исследований почв на изучаемой и соседних территориях. Величины информационной энтропии и дивергенции являются скалярными показателями для характеристики вариабельности и трансформаций вероятностно-статистических распределений свойств почв.

### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700316-9).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Байбеков Р.Ф. *Влияние длительного применения удобрений на агроэкологическое состояние подзолистых и черноземных почв Европейской части России*. Автореф. дисс. ... д.с.-х.н. М., 2003. 36 с.
2. Болдырева В.Э. *Принципы интерпретации данных гранулометрического состава черноземов по материалам почвенных дата-центров Ростовской области*. Автореф. дисс. ... к.б.н. Ростов-на-Дону, 2022. 23 с.
3. Еремин Д.И. *Агрогенная трансформация чернозема выщелоченного Северного Зауралья*. Автореф. дисс. ... д.б.н. Тюмень, 2012. 35 с.
4. Караваева Н.А. *Агрогенная память почв // Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропосферных взаимодействий / Отв. ред.: Таргульян В.О., Горячкин С.В. М.: Издательство ЛКИ, 2008. С. 578–614.*
5. Кенжегулова С.О. *Изменение свойств различных типов почв Западной Сибири под влиянием длительного сельскохозяйственного использования*. Автореф. дисс. ... к.с.-х.н. Барнаул, 2008. 15 с.
6. *Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос. 1977. 224 с.*
7. Колмогоров А.Н. *Теория информации и теория алгоритмов*. М.: Наука, 1987. 304 с.
8. Лемешко Б.Ю. *Статистический анализ одномерных наблюдений случайных величин: Программная система*. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 1995. 125 с.
9. *Михеева И.В. Дивергенция вероятностных распределений свойств почв как количественная характеристика трансформации почвенного покрова // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. № 2. С. 231–236.*
10. *Михеева И.В. Вероятностно-статистическая и информационная оценка современных процессов в природных объектах на основе данных почвенного мониторинга // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2017. Т. 22. № 4. С. 220–236.*
11. *Михеева И.В., Оплеухин А.А. 30-летние изменения вероятностных и информационных характеристик содержания гумуса в черноземах южных Западной Сибири // Живые и биокосные системы. 2015. № 13. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-13/article-9>*
12. *Михеева И.В., Оплеухин А.А. Идентификация вероятностно-статистических моделей свойств экологических систем и их информационная оценка // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2018. Т. 23. № 4. С. 226–248.*
13. *Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупно-масштабных карт землепользования. М.: Колос, 1973.*

14. *Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропоферных взаимодействий* / Отв. ред.: Таргульян В.О., Горячкин С.В. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 692 с.
15. Панфилов В.П., Сенькова Л.А. *Особенности поведения влаги в черноземах южных легкосуглинистых и ее доступность растениям* // Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Новосибирское отделение "Наука", 1988. С. 167–181.
16. Прангишвили И.В. *Общесистемные закономерности и проблемы управления природными и социальными системами* // Синергетика и проблемы управления. М.: Физматлит, 2004. С. 398–419.
17. Человечкова А.В. *Использование гидрофизических свойств для характеристики почв Курганской области*. Дисс. ... к.б.н. Курган, 2021. 137 с.
18. Deng J. Probabilistic characterization of soil properties based on the maximum entropy method from fractional moments: Model development, case study, and application // *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 219. P. 108218. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108218>
19. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
20. Kuzyakov Y., Zamanian K. Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation // *Biogeosciences*. 2019. Vol. 16. P. 4783–4803. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019>
21. Lal R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation // *Sustainability*. 2015. Vol. 7 (5). P. 5875–5895. DOI:10.3390/su7055875
22. Liu Y.-L., Yao S.-H., Han X.-Z., Zhang B., Banwart S.A. Soil Mineralogy Changes With Different Agricultural Practices During 8-Year Soil Development From the Parent Material of a Mollisol // *Advances in Agronomy*. 2017. Vol. 142. Ch. 6. P. 143–179.
23. Mikheeva I.V. Changes in the probability distributions of particle size fractions in chestnut soils of the Kulunda steppe under the effect of natural and anthropogenic factors // *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 12. P. 1351–1361.
24. Mikheeva I.V., Kuzmina E.D. Statistical characteristics of soil particle-size composition formula // *Eurasian Soil Science*. 2000. Vol. 33. No. 7. P. 713–722.
25. Prigogine I. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. New York: Willey-Interscience, 1999 p.
26. Smeck N.E., Runge E.C.A. Mackintosh E.E. *Dynamics and genetic modelling of soil systems*. In book: Pedogenesis and soil Taxonomy. 1983. New York: Elsevier. P.51–81.
27. Targulian V.O., Bronnikova M.A. Soil memory: theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 3. P. 229–243. DOI: 10.1134/S1064229319030116

Поступила в редакцию 15.09.2022

Принята 03.11.2022

Опубликована 21.11.2022

#### Сведения об авторах:

**Михеева Ирина Викторовна** – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); [mikheeva@issa-siberia.ru](mailto:mikheeva@issa-siberia.ru)

**Оплеухин Алексей Александрович** – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); [opleuhin@issa-siberia.ru](mailto:opleuhin@issa-siberia.ru)

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**INFORMATIONAL ASSESSMENT OF CHANGES IN SILT AND PHYSICAL CLAY CONTENT IN ARABLE CHERNOZEMS OF THE IRTYSH PLAIN**

© 2022 I. V. Mikheeva , A. A. Opleuhin 

*Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: [mikheeva@issa-siberia.ru](mailto:mikheeva@issa-siberia.ru)*

**The aim of the study** was to quantify changes in particle size distributions of southern chernozems under the influence of long-term arable use and to determine information standards for silt and physical clay content in arable soils at different time points.

**Location and time of the study.** The south of West Siberia, the central part of the Irtysh Plain, the period 60-90 years of the 20th century.

**Methods.** The quantitative soil status model, used in the study, is a set of probabilistic-statistical distributions of soil properties in soil horizons. Calculations and graphic analysis of information entropy and divergence of soil properties were performed.

**Results.** During the study period there was an increase in central values and a decrease in variability in the silt and physical clay content in the southern chernozems on the territory of the Irtysh plain in the upper 0-20 cm soil layer. The revealed changes occurred due to the restructuring of probability-statistical distributions of these indicators, which consisted in reducing the probabilities of the lower values. Similar trends, albeit less expressed, were also identified in 20-30 and 30-50 cm layers, but deeper in profile they were minimal. Changes in the probability-statistical distributions of silt and physical clay content occurred within the ranges of variation inherent to the studied lithological varieties.

**Conclusions.** To assess the condition and general changes in soils on a territory, it is necessary to use information characteristics. The obtained probabilistic-statistical distributions of silt and physical clay content represent the informational standards for these indicators of the soils of the Irtysh plain. They can be used for comparison with the results of past, current and future monitoring studies of soils in the studied and neighboring territories. The values of information entropy and divergence are scalar indicators for characterizing variability and transformations of probability-statistical distributions of soil properties.

**Keywords:** Haplic Chernozem; particle size distribution; soil memory; probabilistic distributions; information entropy; divergence

**How to cite:** Mikheeva I.V., Opleuhin A.A. Informational assessment of changes in silt and physical clay content in arable chernozems of the Irtysh plain // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e186. DOI: [10.31251/pos.v5i4.186](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.186) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Baybekov R.F. *Effect of long-term application of fertilizers on the agroecological state of podzolic and chernozem soils of the European part of Russia*, Abstract of Dissertation ... Dr. of Agric. Sci. Moscow, 2003, 36 p. (in Russian)
2. Boldyreva V.E. *Principles of interpretation of granulometric composition of chernozems based on materials of soil data centers of Rostov Oblast*, Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Rostov-on-Don, 2022, 23 p. (in Russian)
3. Eremin D.I. *Agrogenic transformation of leached chernozem in the Northern Trans-Urals*, Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Tyumen, 2012, 35 p. (in Russian)
4. Karavaeva N.A. *Agrogenic soil memory*. In book: *Soil memory: soil as a memory of biosphere-geosphere-anthroposphere interactions* / Ed.: Targulyan V.O., Goryachkin S.V. Moscow: LKI Publ., 2008, p. 578–614. (in Russian)
5. Kenzhegulova S.O. *Changes in the properties of different types of soils of Western Siberia under the influence of long-term agricultural use*, Abstract of Dissertation ... Cand. of Agric. Sci. Barnaul, 2008, 15 p. (in Russian)
6. *Classification and diagnostics of Soils of the USSR* / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moscow: Kolos Publ., 1977, 224 p. (in Russian)
7. Kolmogorov A. N. *Information theory and theory of algorithms*. Moscow: Nauka Publ., 1987, 304 p. (in Russian)
8. Lemeshko B.Yu. *Statistical analysis of one-dimensional observations of random variables: A program system*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 1995, 125 p. (in Russian)
9. Mikheeva I.V. Divergence of the probabilistic distributions of soil properties as a quantitative characteristic of the transformation of soil cover, *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2009, Vol. 16, No. 2, p. 231–236. (in Russian)
10. Mikheeva I.V. Probabilistic-statistical and information assessment of contemporary processes in natural objects on the basis of data of soil monitoring, *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2017, Vol. 22, No. 4, p. 220–236. (in Russian)

11. Mikheeva I.V., Opleuhin A.A. 30 years' Changes of Probabilistic and Information Characteristics of the Humus Content in Southern Chernozems in Western Siberia, *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2015, No. 13. (in Russian) URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-13/article-9>
12. Mikheeva I.V., Opleuhin A.A. Identification of probabilistic and statistical models of properties of ecological systems and their information assessment, *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2018, Vol. 23, No. 4, p. 226–248. (in Russian)
13. *All-Union Instruction on Soil Surveys and Large-Scale Land Use Maps*. Moscow: Kolos Publ., 1973. (in Russian)
14. *Soil memory: soil as a memory of biosphere-geosphere-anthroposphere interactions* / Ed.: Targulyan V.O., Goryachkin S.V. Moscow: LKI Publ., 2008, 692 p. (in Russian)
15. Panfilov V.P., Senkova L.A. Features of moisture behavior in southern light loamy chernozems and its availability to plants. In book: *Chernozems: properties and characteristics of irrigation*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988, p. 167–181. (in Russian)
16. Prangishvili I.V. *General System Regularities and Control Problems of Natural and Social Systems*. In book: *Synergetics and Control Problems*. Moscow: Fizmatlit Publ., 2004, p. 398–419. (in Russian)
17. Chelovechkova A.V. *The use of hydrophysical properties to characterize the soils of Kurgan region*. Diss. Cand. of Biol. Sci. Kurgan, 2021, 137 p. (in Russian)
18. Deng J. Probabilistic characterization of soil properties based on the maximum entropy method from fractional moments: Model development, case study, and application, *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, Vol. 219, p. 108218. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108218>
19. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
20. Kuzyakov Y., Zamanian K. Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation, *Biogeosciences*, 2019, Vol. 16, p. 4783–4803. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019>
21. Lal R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation, *Sustainability*, 2015, Vol. 7 (5), p. 5875–5895. DOI:10.3390/su7055875
22. Liu Y.-L., Yao S.-H., Han X.-Z., Zhang B., Banwart S.A. Soil Mineralogy Changes With Different Agricultural Practices During 8-Year Soil Development From the Parent Material of a Mollisol, *Advances in Agronomy*, 2017, Vol. 142, Ch. 6, p. 143–179.
23. Mikheeva I.V. Changes in the probability distributions of particle size fractions in chestnut soils of the Kulunda steppe under the effect of natural and anthropogenic factors, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 12, p. 1351–1361.
24. Mikheeva I.V., Kuzmina E.D. Statistical characteristics of soil particle-size composition formula, *Eurasian Soil Science*, 2000, Vol. 33, No. 7, p. 713–722.
25. Prigogine I. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. New York: Willey-Interscience, 199 p.
26. Smeck N.E., Runge E.C.A., Mackintosh E.E. *Dynamics and genetic modelling of soil systems*. In book: *Pedogenesis and soil Taxonomy*. New York: Elsevier, 1983, p. 51–81.
27. Targulian V.O., Bronnikova M.A. Soil memory: theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, p. 229–243. DOI: 10.1134/S1064229319030116

Received 15 September 2022

Accepted 03 November 2022

Published 21 November 2022

#### About the author(s):

**Mikheeva Irina Victorovna** – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); [mikheeva@issa-siberia.ru](mailto:mikheeva@issa-siberia.ru); [pulya80@ngs.ru](mailto:pulya80@ngs.ru)

**Opleuhin Alexey Alexandrovich** – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); [plybym@rambler.ru](mailto:plybym@rambler.ru)

*The authors read and approved the final manuscript*



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)