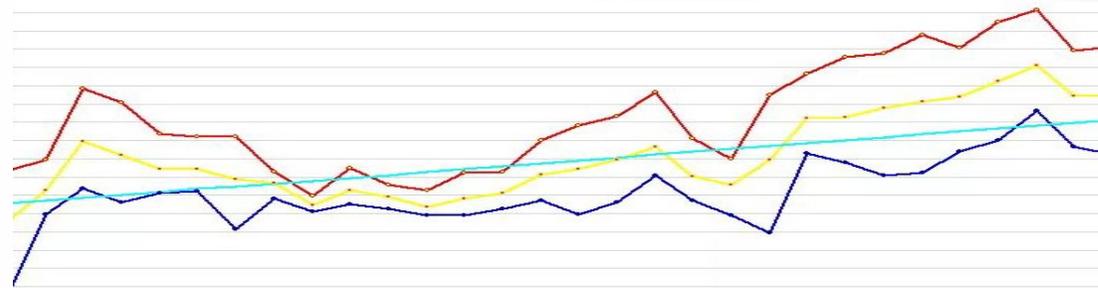
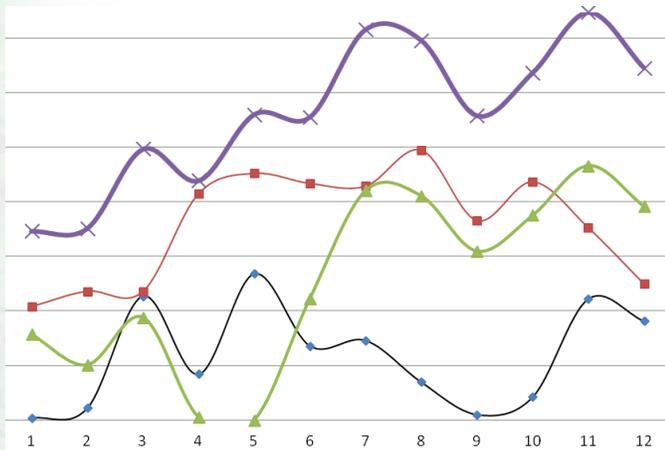


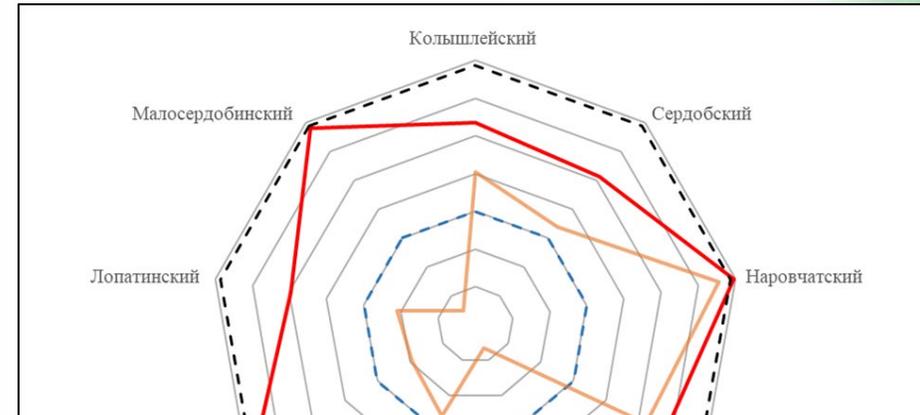
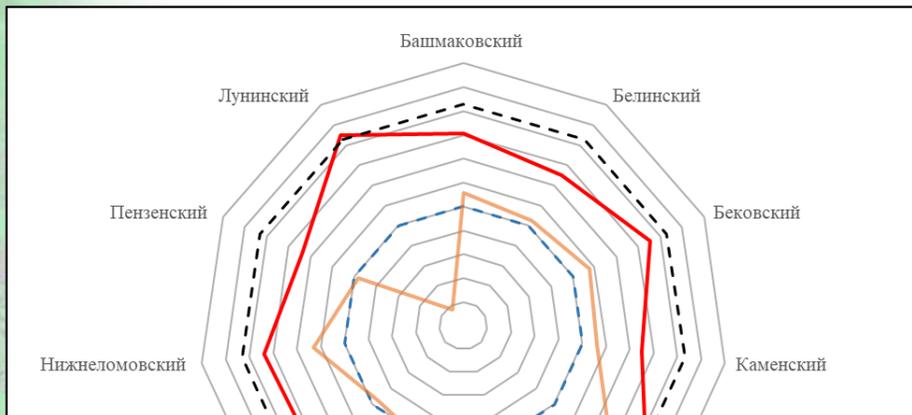


## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ОСНОВЕ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI В УСЛОВИЯХ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ



Докладчик: аспирант кафедры «Общее земледелие и землеустройство»  
ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ

Щербаков А.С.



Целью исследований являлось изучение статистических взаимосвязей между урожайностью озимой пшеницы, метеорологическими факторами и значениями вегетационного индекса NDVI для создания методических основ прогнозирования урожайности и оценки состояния озимой пшеницы в динамике.

В исследованиях применялись общепринятые методы математической статистики (кластеризация, корреляционно-регрессионный анализ, дисперсионный анализ, вариационный анализ), специализированное программное обеспечение (MS Excel, QGIS) и информационный сервис анализа спутниковых данных «BEGA-Science». Исследуемый период 2015-2023 гг.

Земетчинский	17,61	12,91	30,3	29	22,6	31	39,8	29,9	29	41,7	21,3	43,4	26,4	34,91	-0,31	4,57
Иссинский	21,54	10,78	31,5	32,5	30,6	38,8	36,3	31,1	17,4	42,8	29,8	47,7	48,9	34,75	-0,16	4,41
Каменский	10,97	12,4	34	32	25,9	39,6	42,5	33,2	21,1	50,8	27,7	51,5	45,1	34,65	-0,10	4,31
Камешкирский	9,9	7,96	12,4	21,5	17,4	16,1	31,7	20,2	9	22,8	18,4	35,6	31,9	33,15	-1,50	2,81
Колышлейский	5,82	6,88	18,4	25,2	16,7	36	38,6	26,7	28,1	46,1	22,9	50,2	42,9	31,98	-1,16	1,65
Кузнецкий	12,2	8,14	20,3	23,3	13,7	16,1	21,9	23,2	18,3	31,4	17,9	30,2	30,8	31,55	-0,44	1,21
Лопатинский	9,77	9,08	18,6	26,5	17,2	29,5	37,2	22,8	21,8	47,4	21,4	41,6	35,5	31,51	-0,04	1,17
Лунинский	18,3	13,59	30,5	26	21,4	37,3	35,6	29,1	20,7	42,9	28,7	48,3	44,1	31,49	-0,02	1,16
Малосердобинский	4,52	6,16	17	27	9,3	35,3	37,5	20,4	20,5	39,1	16,6	40,7	36,9	31,31	-0,18	0,97
Мокшанский	15,05	9,69	21	29,8	20,4	33,4	38,7	27,3	20,6	39,4	23,4	43,8	40,9	30,79	-0,52	0,46
Наровчатский	13,35	11,71	19	19,1	24,6	30,6	35,3	30,3	21,3	51,7	28,4	45,8	40,5	30,53	-0,26	0,19
Нижнеомский	0,16	6,43	13,6	21,3	11	16,3	22,6	18,5	15,1	23,3	12	25,0	27,4	20,05	1,18	1,36

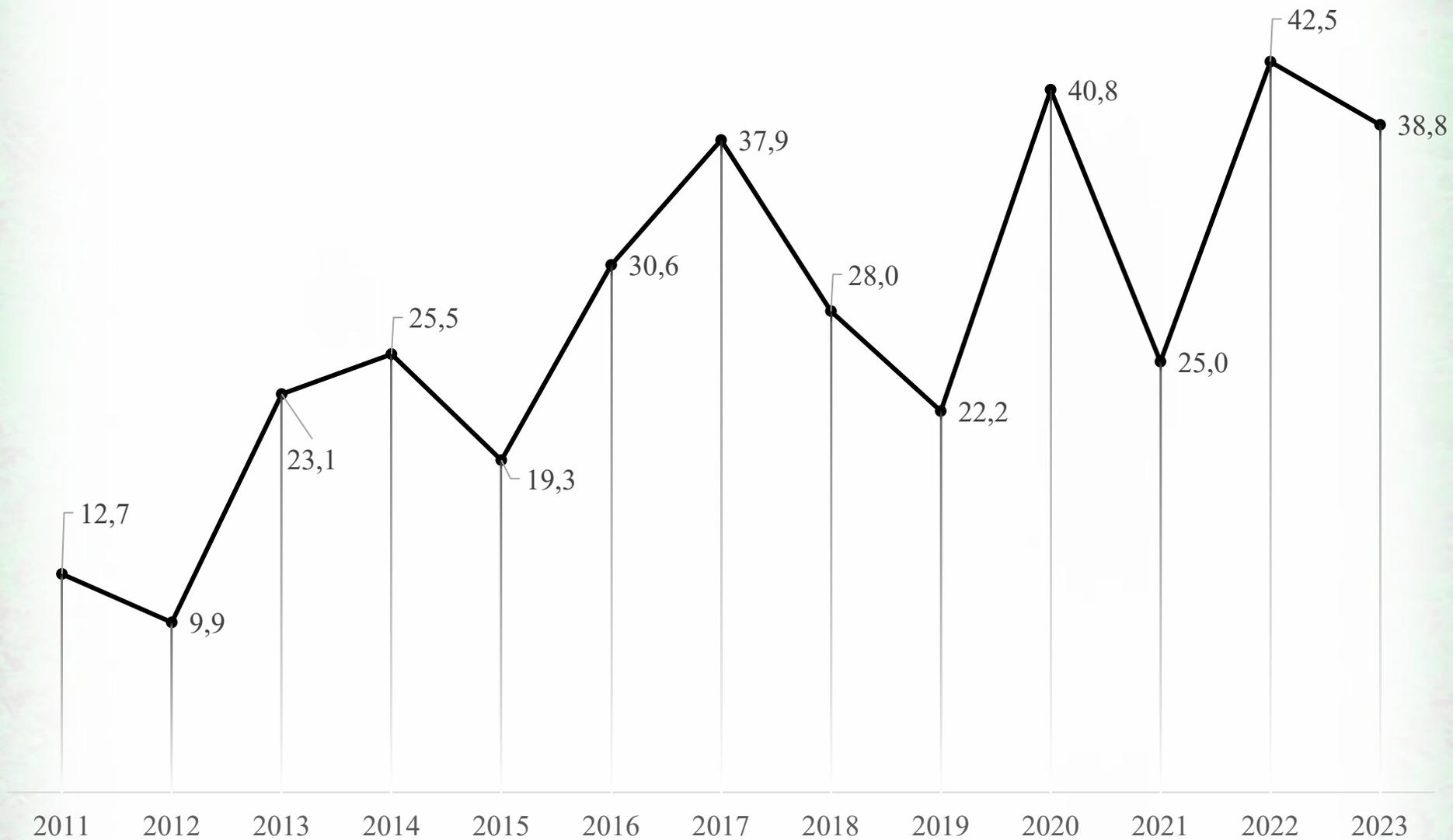
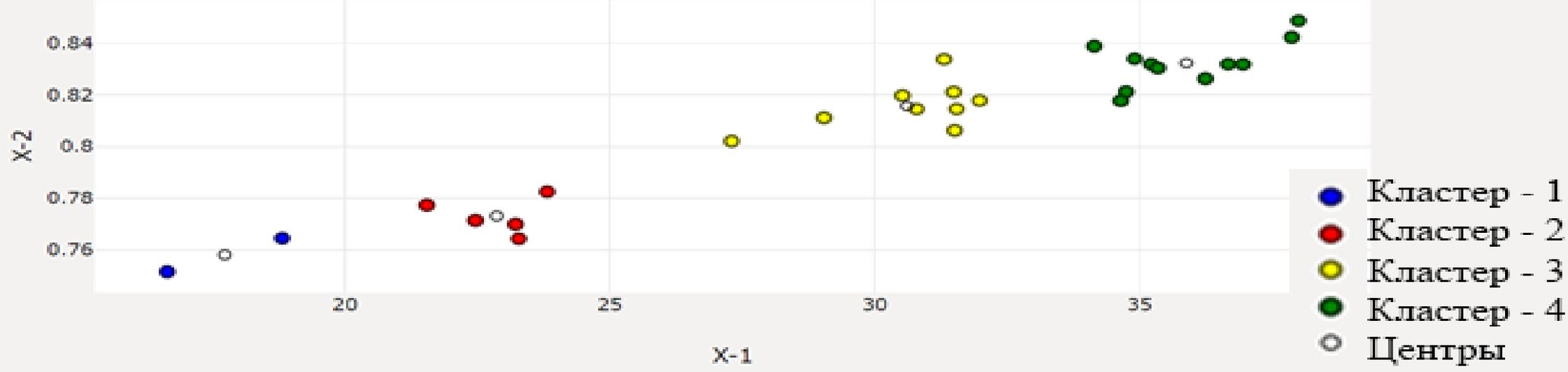
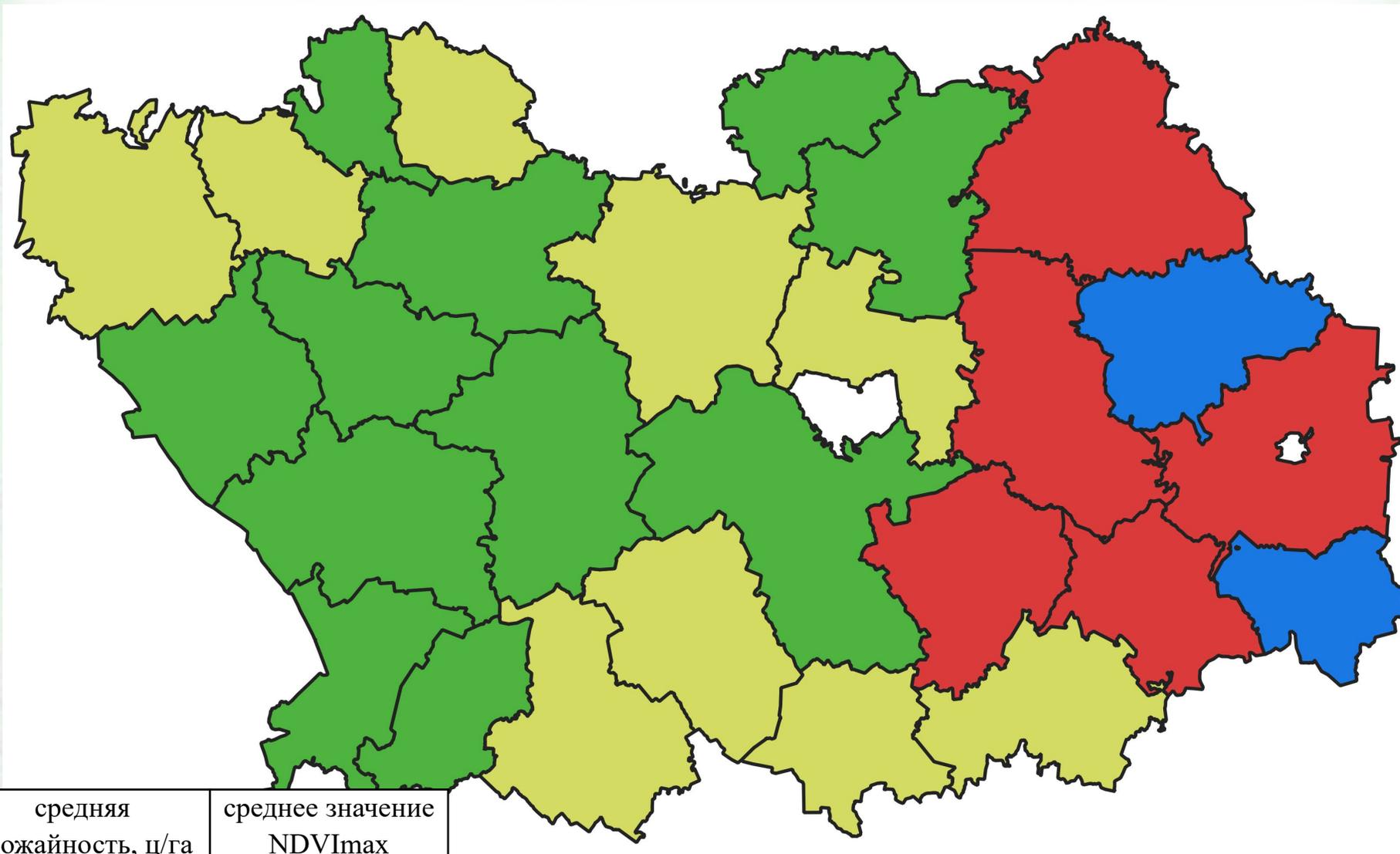


Рисунок 1. Динамика урожайности озимой пшеницы в Пензенской области, ц/га



Район	NDVI <sub>max</sub>	урожай
Сосновоборский	0,75	16,6
Неверкинский	0,76	18,8
Камешкирский	0,78	21,5
Кузнецкий	0,77	22,5
Городищенский	0,77	23,2
Никольский	0,76	23,3
Шемшейский	0,78	23,8
Малосердобинский	0,80	27,3
Лопатинский	0,81	29,0
Бессоновский	0,82	30,5
Мокшанский	0,81	30,8
Земетчинский	0,83	31,3
Вадинский	0,82	31,5
Наровчатский	0,81	31,5
Сердобский	0,81	31,5
Кольшлейский	0,82	32,0
Лунинский	0,84	33,1
Пензенский	0,82	34,6
Нижнеломовский	0,82	34,7
Пачелмский	0,83	34,9
Иссинский	0,83	35,2
Тамалинский	0,83	35,3
Спасский	0,83	36,2
Каменский	0,83	36,7
Бековский	0,83	37,0
Белинский	0,84	37,9
Башмаковский	0,85	38,0



	средняя урожайность, ц/га	среднее значение NDVI <sub>max</sub>
Кластер 1	16,6-18,8	0,75-0,76
Кластер 2	21,5-23,8	0,78
Кластер 3	27,3-32,0	0,80-0,82
Кластер 4	33,1-38,0	0,84-0,85

Рисунок 2. Кластеризация районов Пензенской области по средним значениям NDVI<sub>max</sub> и урожайности озимой пшеницы

Экспериментальными методами определены следующие переменные для построения уравнения множественной линейной регрессии:

- $x_1$  количество осадков за август-октябрь, мм;
- $x_2$  количество осадков за май, мм;
- $x_3$  количество дней со среднесуточной температурой в диапазоне 4-7 С, в осенний период вегетации;
- $x_4$  количество дней со среднесуточной температурой в диапазоне 6-10 С, в весенний период вегетации;
- $x_5$  максимальная мощность снежного покрова в зимний период, м;
- $x_6$  средняя мощность снежного покрова в зимний период, м;
- $x_7$  среднее значение проективного покрытия снежным покровом посевных площадей озимой пшеницы в зимний период, %;
- $x_8$  количество дней со средней температурой почвы менее -10 С в слое 0-10 см за зимний период;
- $x_9$  минимальная температура почвы в слое 0-10 см за зимний период, С;
- $x_{10}$  максимальное значение NDVI.

### Кластер 1

$$y = x_1 \times 0,02 + x_2 \times 0,72 - x_3 \times 11,55 - x_4 \times 0,39 + x_5 \times 116,98 - 74,64$$

где:

$x_1$  - количество осадков за август-октябрь, мм;

$x_2$  - количество дней со среднесуточной температурой в диапазоне 6-10 С, в весенний период вегетации;

$x_3$  - максимальная мощность снежного покрова в зимний период, м;

$x_4$  - минимальная температура почвы в зимний период в слое 0-10 см, С;

$x_5$  - максимальное значение NDVI за вегетационный период.

### Кластер 2

$$y = x_1 \times 0,02 - x_2 \times 0,01 + x_3 \times 0,74 - x_4 \times 11,35 + x_5 \times 109,98 - 65,98$$

где:

$x_1$  - количество осадков за август-октябрь, мм;

$x_2$  - количество осадков за май, мм;

$x_3$  - количество дней со среднесуточной температурой в диапазоне 6-10 С, в весенний период вегетации;

$x_4$  - максимальная мощность снежного покрова в зимний период, м;

$x_5$  - максимальное значение NDVI за вегетационный период.

### Кластер 3

$$y = x_1 \times 0,02 - x_2 \times 0,05 + x_3 \times 0,13 - x_4 \times 12,84 + x_5 \times 123,97 - 61,90$$

где:

$x_1$  - количество осадков за август-октябрь, мм;

$x_2$  - количество осадков за май, мм;

$x_3$  - количество дней со среднесуточной температурой в диапазоне 6-10 С, в весенний период вегетации;

$x_4$  - максимальная мощность снежного покрова в зимний период, м;

$x_5$  - максимальное значение NDVI за вегетационный период.

### Кластер 4

$$y = x_1 \times 0,02 + x_2 \times 0,72 - x_3 \times 11,55 - x_4 \times 0,39 + x_5 \times 98,79 - 35,19$$

где:

$x_1$  - количество осадков за август-октябрь, мм

$x_2$  - количество осадков за май, мм

$x_3$  - количество дней со среднесуточной температурой в диапазоне 6-10 С, в весенний период вегетации

$x_4$  - максимальная мощность снежного покрова в зимний период, м

$x_5$  - максимальное значение NDVI за вегетационный период

Проверка стохастической зависимости между переменными проводится путем расчета корреляционной матрицы факторов:

Кластер 1					Кластер 2						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_1$	1					$x_1$	1				
$x_2$	-0,06	1				$x_2$	-0,12	1			
$x_3$	-0,1	-0,01	1			$x_3$	0,40	0,29	1		
$x_4$	0,14	-0,23	-0,02	1		$x_4$	-0,42	-0,14	-0,07	1	
$x_5$	0,17	0,63	-0,16	0,16	1	$x_5$	0,39	0,41	0,57	-0,08	1
Кластер 3					Кластер 4						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_1$	1					$x_1$	1				
$x_2$	0,40	1				$x_2$	0,45	1			
$x_3$	0,22	0,24	1			$x_3$	0,05	0,20	1		
$x_4$	-0,42	-0,46	-0,08	1		$x_4$	-0,31	-0,48	0,03	1	
$x_5$	0,44	0,49	0,63	-0,16	1	$x_5$	0,43	0,54	0,49	0,04	1

Для корреляционных пар с наиболее сильным уровнем связи (>0,5), проводится дополнительный анализ коэффициентов детерминации переменных:

Кластер 1		Кластер 2		Кластер 3		Кластер 4	
	$x_2$		$x_3$		$x_3$		$x_2$
$x_5$	$R^2 = 0,40$	$x_5$	$R^2 = 0,33$	$x_5$	$R^2 = 0,39$	$x_5$	$R^2 = 0,30$

*Таблица 1 – Результаты оценки параметров регрессионных моделей*

Уравнение регрессии	R <sup>2</sup>	SE, ц/га	MAE, ц/га	MAPE, %
$y = x_1 \times 0,02 + x_2 \times 0,72 - x_3 \times 11,55 - x_4 \times 0,39 + x_5 \times 116,98 - 74,64$	0,81	4,30	3,14	9,09
$y = x_1 \times 0,02 - x_2 \times 0,01 + x_3 \times 0,74 - x_4 \times 11,35 + x_5 \times 109,98 - 65,98$	0,85	3,86	3,00	10,13
$y = x_1 \times 0,02 - x_2 \times 0,05 + x_3 \times 0,13 - x_4 \times 12,84 + x_5 \times 123,97 - 61,90$	0,71	4,50	3,18	15,16
$y = x_1 \times 0,02 + x_2 \times 0,72 - x_3 \times 11,55 - x_4 \times 0,39 + x_5 \times 98,79 - 35,19$	0,75	3,37	2,03	11,30

Прогнозируемые значения урожайности озимой пшеницы в результате построения прогнозной модели возможно дополнительно скорректировать основываясь на ошибках регрессионного анализа. Таким образом, минимальную прогнозируемую урожайность можно рассчитать по формуле:

$$Y_{\text{мин}} = Y_{\text{рег}} - C_o - (A_o - |C_o|)$$

где:

$Y_{\text{рег}}$  – прогнозируемая урожайность по результатам регрессионного анализа;

$C_o$  – средняя ошибка прогнозной модели;

$A_o$  – абсолютная ошибка прогнозной модели.

Формула для расчета максимального прогноза урожайности имеет следующий вид:

$$Y_{\text{макс}} = Y_{\text{рег}} - C_o + (A_o - |C_o|)$$

где:

$Y_{\text{рег}}$  – прогнозируемая урожайность по результатам регрессионного анализа;

$C_o$  – средняя ошибка прогнозной модели;

$A_o$  – абсолютная ошибка прогнозной модели.

Таблица 2 – Прогнозируемая урожайность озимой пшеницы в Пензенской области, 2024 г.

Район	Урожайность (регрессия), ц/га	Урожайность после корректировки, ц/га	
		минимальная	максимальная
Башмаковский	33,5	31,6	36,6
Бековский	34,6	32,8	37,8
Белинский	36,9	34,9	39,5
Бессоновский	27,8	24,0	29,4
Вадинский	33,8	34,9	37,1
Городищенский	27,1	25,8	28,5
Земетчинский	33,2	29,8	31,9
Иссинский	32,5	30,6	34,9
Каменский	33,7	32,4	36,2
Камешкирский	31,4	27,9	31,2
Кольшлейский	28,7	28,5	31,0
Кузнецкий	24,8	22,0	24,1
Лопатинский	34,7	32,7	34,9
Лунинский	36,5	31,1	33,7
Малосердобинский	25,1	21,3	23,8
Мокшанский	31,6	28,8	33,6
Наровчатский	35,1	37,3	40,1
Неверкинский	30,1	29,0	30,5
Нижнеломовский	35,7	34,9	39,1
Никольский	33,9	35,5	40,0
Пачелмский	33,8	30,6	36,5
Пензенский	33,2	30,8	35,1
Сердобский	29,7	28,4	31,9
Сосновоборский	24,8	22,6	27,8
Спасский	35,9	37,1	41,0
Тамалинский	30,8	29,0	31,6
Шемьшейский	31,5	29,4	33,0
<b>Средняя по региону</b>	<b>31,9</b>	<b>30,1</b>	<b>33,7</b>

Таблица 3 – Фактические ошибки прогноза урожайности после корректировки

Район / кластер	MAE, ц/га			MAPE, %		
	модель	коррект.	$\Delta$	модель	коррект.	$\Delta$
Кластер 1	3,1	2,9	0,2	9,1	8,2	0,9
Кластер 2	3,0	2,6	0,4	10,1	8,3	1,8
Кластер 3	3,2	2,7	0,5	15,2	11,8	3,4
Кластер 4	2,0	2,1	0,0	11,3	11,9	-0,6
Средняя по региону	3,0	2,7	0,3	10,7	9,2	1,6

Таблица 4 – Группировка вариантов дисперсионного анализа

Фактор (условия года)	Средняя ошибка модели, ц/га	Отклонение от контроля, ц/га	Группа достоверности
2015-2023 (контроль)	2,688	-	-
2015	2,520	-0,168	II
2016	2,984	0,296	II
2017	3,201	0,514	II
2018	2,188	-0,500	II
2019	2,629	-0,059	II
2020	2,946	0,258	II
2021	1,957	-0,731	II
2022	2,699	0,011	II
2023	3,065	0,377	II
НСР <sub>05</sub>		0,831	

Показатели вариации отклонений:

дисперсия  $\sigma^2 = 0,01$

среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,101$

Коэффициент вариации  $C_V = 3,74 \%$

коэффициент асимметрии  $A_S = 0,326$

коэффициент эксцесса  $E_K = 10,984$

*Таблица 5 – Прогноз валового сбора урожая озимой пшеницы по годам исследований*

Год прогноза	Вал. сбор прогноз, т	Вал. сбор факт., т	Ошибка прогноза	
			тонна	%
2015	627,8	579,0	-48,8	-8,4
2016	924,3	919,4	-4,9	-0,5
2017	1099,9	1137,2	37,3	3,3
2018	852,0	838,9	-13,1	-1,6
2019	661,4	664,7	3,3	0,5
2020	1229,2	1224,8	-4,5	-0,4
2021	780,2	750,8	-29,5	-3,9
2022	1292,0	1273,8	-18,2	-1,4
2023	1085,4	1163,8	78,4	6,7
Средняя ошибка за исследуемый период			26,4	3,0

## Выводы:

Таким образом, разработанные модели прогноза урожайности озимой пшеницы могут иметь практическое применение в Пензенской области. Они отвечают требованиям достоверности и точности, о чем свидетельствует средняя абсолютная ошибка, которая составила 2,7 ц/га в абсолютных и 9,2% в относительных показателях. Средняя фактическая ошибка прогноза составила 26,4 т, что составляет 3 % от валового сбора. Результаты исследований можно рекомендовать органам муниципальной власти для оперативной оценки планируемого валового сбора озимой пшеницы, при разработке планов развития аграрного производства и оптимизации структуры посевных площадей.

**Спасибо за внимание**