



Параметризация модели **WOFOST** на больших территориях с помощью адаптированных карты почв РСФСР В.М. Фридланда

Д.Е. Плотников, Е.Н. Подгорнова, Ю.Л. Мешалкина
ИКИ РАН
Почвенный факультет МГУ

Проект DWATCH

- ▶ Название: Использование данных спутникового мониторинга для укрепления продовольственной безопасности и повышения устойчивости сельскохозяйственного сектора в условиях изменения климата;
- ▶ Цель: разработка новых методов прогнозирования и оценки состояния сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата

Базовые сценарии изменения климата ИПСС к 2100 году: *RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5*: необходимо обеспечить возможность климат-ориентированного имитационного моделирования развития ключевых с\х культур



Климатические данные FLDAS

- ▶ Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System (FLDAS): https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/FLDAS_NOAH001_G_CA_D_01/summary?keywords=FLDAS
- ▶ Format: netCDF
- ▶ Spatial Coverage: 30.0,21.0, 100.0,56.0
- ▶ Temporal Coverage: 2000-10-01 to 2023-10-01
- ▶ File Size: 1.2 GB per file
- ▶ Data Resolution
- ▶ Spatial: 0.01 ° x 0.01 °
- ▶ Temporal: 1 day

3.2.3 FLDAS Central Asia Model Data: Daily

The FLDAS daily data from the Noah LSM (FLDAS_NOAH001_G_CA_D) contain 23 fields as listed in Table 5c.

Table 5c. Parameters from FLDAS Noah model data for the monthly dataset.

Short Name	Description	Unit
Evap_tavg	Evapotranspiration	kg m-2 s-1
Psurf_f_tavg	Surface pressure	Pa
Qair_f_tavg	Specific humidity	kg kg-1
Qs_tavg	Storm surface runoff	W m-2
Qsb_tavg	Baseflow-groundwater runoff	kg m-2 s-1
Qsm_tavg	Snowmelt	kg m-2 s-1
RadT_tavg	Surface radiative temperature	K
Rainf_f_tavg	Rainfall flux	kg m-2 s-1
Rainf_tavg	Total precipitation rate	kg m-2 s-1
SnowDepth_inst	Snow depth	m
Snowf_tavg	Snowfall rate	kg m-2 s-1
SoilMoi00_10cm_tavg	Soil moisture (0 - 10 cm underground)	m ³ m-3
SoilMoi10_40cm_tavg	Soil moisture (10 - 40 cm underground)	m ³ m-3
SoilMoi100_200cm_tavg	Soil moisture (100 - 200 cm underground)	m ³ m-3
SoilMoi40_100cm_tavg	Soil moisture (40 - 100 cm underground)	m ³ m-3
SoilTemp00_10cm_tavg	Soil temperature (0 - 10 cm underground)	K
SoilTemp10_40cm_tavg	Soil temperature (10 - 40 cm underground)	K
SoilTemp100_200cm_tavg	Soil temperature (100 - 200 cm underground)	K
SoilTemp40_100cm_tavg	Soil temperature (40 - 100 cm underground)	K
SWdown_f_tavg	Surface downward shortwave radiation	W m-2
SWE_inst	Snow water equivalent	kg m-2
Swnet_tavg	Net shortwave radiation flux	W m-2
Tair_f_tavg	Near surface air temperature	K

The short names with “ F” are forcing variables.

Климатические данные NCEP

Источник: National Centers for Environmental Prediction (NCEP), подразделение NOAA (США)

Покрытие: глобальное, на регулярной широтно-долготной сетке

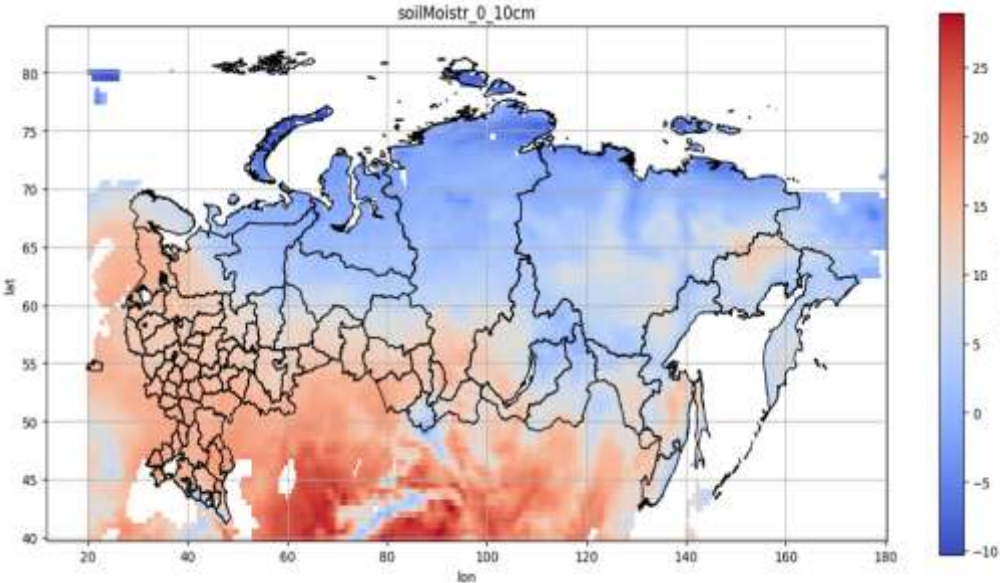
Пространственное разрешение: шаг 0.5° (≈55×30 км в средних широтах) или 0.25°

Тип данных: метеорологические данные реанализа и прогноза

Переменные: температура, давление, влажность, осадки и многие другие — на нескольких уровнях и на поверхности земли

Временное разрешение: каждые 6 часов

Формат данных: GRIB или NetCDF (.grib2 / .nc)



Параметр	Описание
2 metre temperature	температура воздуха на уровне 2 метра над землей
Temperature	приземная температура воздуха
Total Precipitation	кол-во осадков (накопленных с начала временного периода, за 6 часов), в миллиметрах.
Precipitation rate	интенсивность осадков, в kg m-2 s-1 (килограмм на кв.метр в секунду)
Volumetric soil moisture content	влажность почвы 0-10 см
Volumetric soil moisture content	влажность почвы 10-40 см
Volumetric soil moisture content	влажность почвы 40-100 см
Temperature	температура почвы 0-10 см
Temperature	температура почвы 10-40 см
Temperature	температура почвы 40-100 см
Downward short-wave radiation flux	нисходящая коротковолновая радиация
Relative humidity	относительная влажность воздуха 2 метра над землей
Snow depth	толщина снежного покрова

Экспертная ассоциация карты почв Фридланда

Ec1 – coarse

Ec2 – medium

Ec3 – medium fine

Ec4 – fine

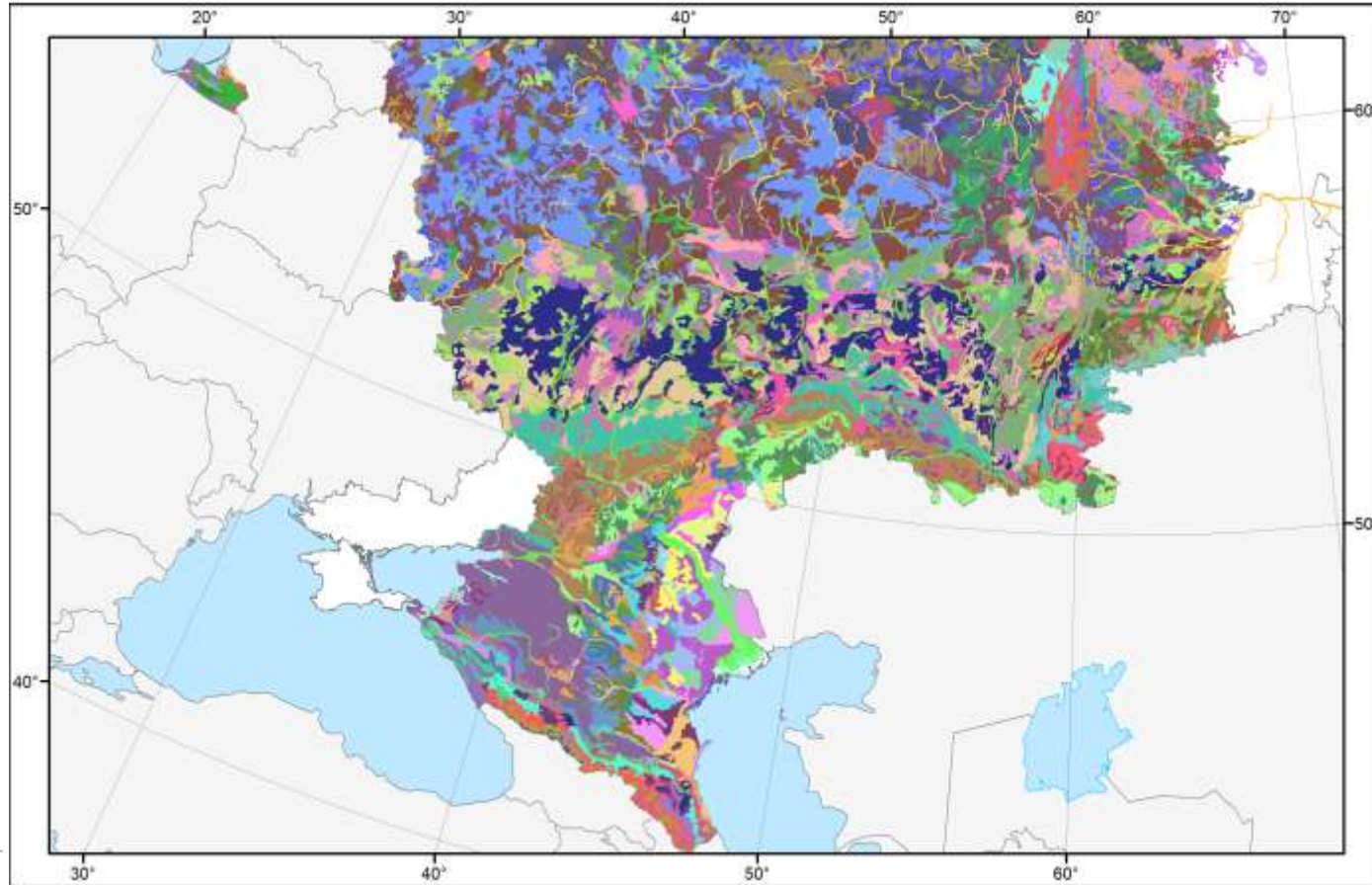
Ec5 – very fine

Ec6 – peat (fine and permeable)

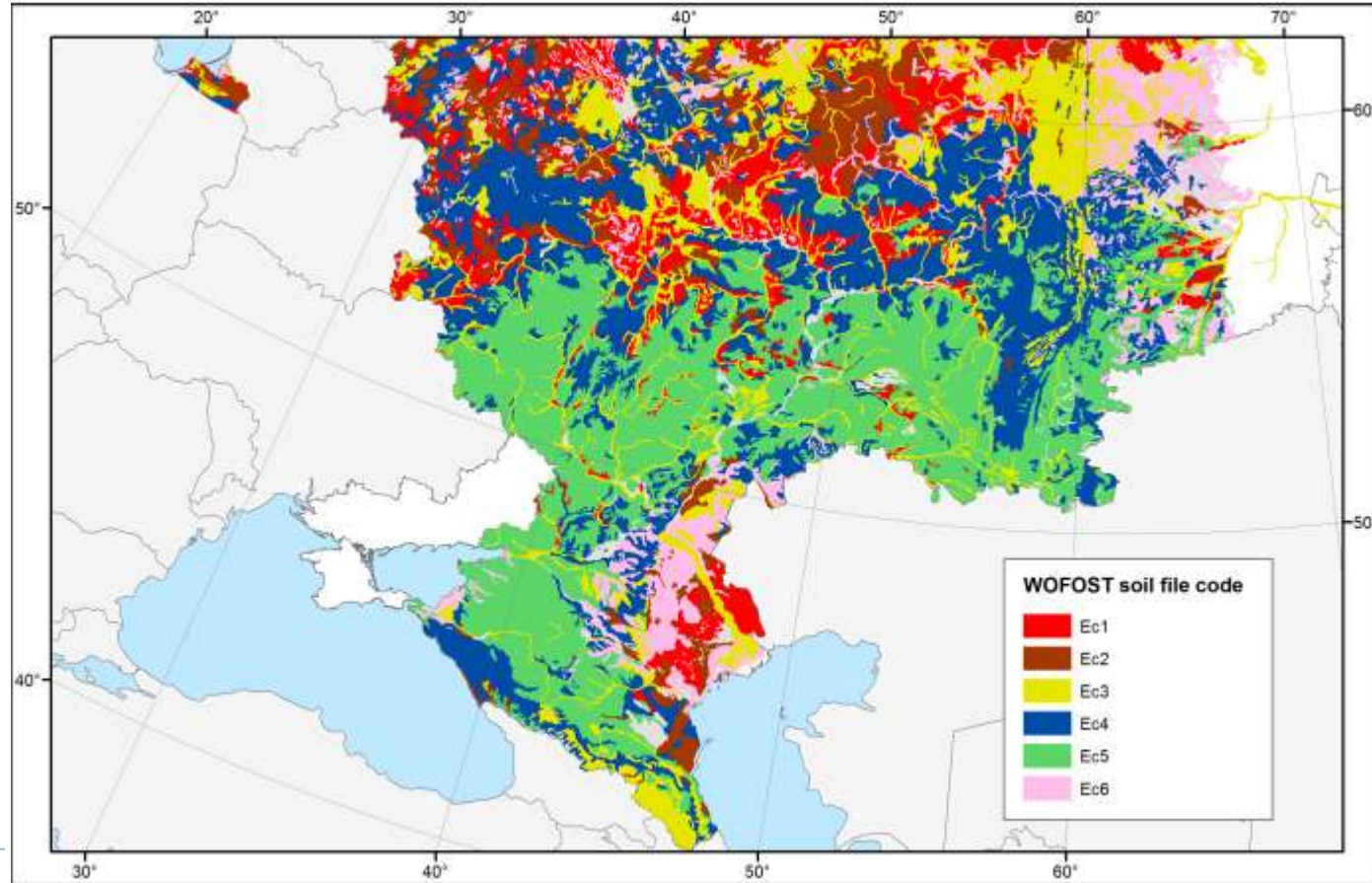
		Гранулометрический состав	Не указа н	Глини стые и тяжел осупи нистые	Глини стые и тяжел осупи нистые щебни стые	Средн есупи нистые	Средн есупи нистые валунн ые и галечн иковы е	Средн есупи нистые щебни стые	Лекос упини стые	Лекос упини стые валунн ые и галечн иковы е	Супесч аные	Супесч аные валунн ые и галечн иковы е	Супесч аные щебни стые	Песча ные	Песча ные валунн ые и галечн иковы е	Песча ные щебни стые	Глини стые и супини стые, подсти лаемы е песчан	Песча ные и супесч аные, подсти лаемы е супин	Супесч аные на спонст ных песчан ых и супесч	Лекос и средне супини стые, подсти лаемы е	Частич ная смена пород разно го механ ическо го
		Выделы легенды		1	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	Г ^с	Тундровые поверхностно-пелые дифференцированные торфянисто- переннойные (пелаземы дифференцированные, в том числе оподзоленные, тундровые)																			
13	ПБт	Подбур тундровые (без разделения)																			
19	Г	Таежные теевые и тееватые недифференцированные (пелаземы таежные)																Ec2			
20	Г ^с	Таежные теево-дифференцированные (пелаземы и слабопелые дифференцированные, в том числе оподзоленные таежные)		Ec3		Ec5															
21	Г ^с	Таежные теево-дифференцированные торфянистые (пелаземы и слабопелые дифференцированные торфянистые, в том числе оподзоленные таежные)		Ec6		Ec6															
23	П ^г	Глее-подзолистые		Ec2		Ec3	Ec3		Ec3									Ec2			
25	П ₁	Подзолистые, преимущественно мелкоподзолистые		Ec2		Ec3	Ec3		Ec3												
26	П ₂	Подзолистые, преимущественно неглубокоподзолистые		Ec3	Ec3	Ec3	Ec3		Ec3	Ec3								Ec2			Ec3
27	П ₃	Подзолистые, преимущественно глубокоподзолистые		Ec3		Ec3	Ec3				Ec1								Ec1		
28	П ₄	Подзолистые, преимущественно сверхглубокоподзолистые		Ec3	Ec3			Ec3													
29	П	Подзолистые (без разделения)		Ec3			Ec3														
30	П ^г	Подзолистые со вторым осветненным горизонтом					Ec3											Ec2			Ec2
33	П ^с	Подзолистые поверхностно-пелые		Ec3	Ec3			Ec3						Ec1				Ec2			
34	П ^т	Подзолистые тубокопелые и теевые (местами с поверхностной тееватостью), преимущественно тубокие и сверхтубокие		Ec3																	

Фрагмент таблицы соотнесения выделов карты Фридланда с использованием
грансостава в терминах модели WOFOST

Карта почв Фридланда, псевдоцвета для выделов



Адаптированная карта почв в терминах модели WOFOST



Агроклиматическая стратификация ЕТР

▶ **$ГТК = (\Sigma \text{Осадков} / \Sigma T > 10^{\circ}\text{C}) * 10$**

▶ **Кластеры:**

- ▶ 1. Северный влажный: $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C} < 1800^{\circ}\text{C}$, $ГТК > 1.6$
- ▶ 2. Северо-западный: $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C} 1800-2200^{\circ}\text{C}$, $ГТК 1.3-1.6$
- ▶ 3. Центральный: $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C} 2200-2600^{\circ}\text{C}$, $ГТК 1.0-1.3$
- ▶ 4. Центрально-чернозёмный: $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C} 2600-3000^{\circ}\text{C}$, $ГТК 0.7-1.0$
- ▶ 5. Южный засушливый: $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C} > 3000^{\circ}\text{C}$, $ГТК < 0.7$



Ключевые культуры России

- ▶ Горох
- ▶ Картофель
- ▶ Кукуруза на зерно
- ▶ Овёс
- ▶ Подсолнечник
- ▶ Просо
- ▶ Пшеница озимая
- ▶ Пшеница яровая
- ▶ Рапс озимый
- ▶ Рапс яровой
- ▶ Рис
- ▶ Рожь озимая
- ▶ Сахарная свёкла
- ▶ Соя
- ▶ Ячмень озимый
- ▶ Ячмень яровой

Культура считается ключевой, если она входит в группу 80% наиболее распространённых по площади сева культур в любом субъекте федерации за последние 5 лет



Статистические данные

- ▶ Собирались данные о площадях и урожайности ключевых культур в интервале ~2005-2020 годы на уровне районов



Агроклиматические условия сева ключевых культур

Пшеница озимая	Т почвы: 12-17 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Пшеница яровая	Т почвы: >6 °С; Вл. почвы: >10% ПВ
Ячмень яровой	Т почвы: >4 °С; Вл. почвы: >10% ПВ
Ячмень озимый	Т почвы: 12-16 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Овёс	Т почвы: >5 °С; Вл. почвы: >12% ПВ
Рожь озимая	Т почвы: 10-15 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Кукуруза на зерно	Т почвы: >9 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Подсолнечник на зерно	Т почвы: >9 °С; Вл. почвы: >12% ПВ
Соя	Т почвы: >10 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Сахарная свёкла	Т почвы: >6 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Рапс озимый	Т почвы: 12-16 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Рапс яровой	Т почвы: >6 °С; Вл. почвы: >15% ПВ
Горох	Т почвы: >4 °С; Вл. почвы: >12% ПВ
Просо	Т почвы: >10 °С; Вл. почвы: >12% ПВ
Рис	Т почвы: >13 °С; Вл. почвы: >90% ПВ
Картофель	Т почвы: >7 °С; Вл. почвы: >15% ПВ

Кроме этого, для каждого агроклиматического кластера был установлен типичный (средненоголетний) интервал дат сева, дат цветения и дат созревания для каждой

▶ ключевой культуры (Агрономия СССР)

Общая логика порайонной оптимизации

- ▶ Фенология: TSUMEM, TSUM1, TSUM2. Алгоритм оптимизации Brent (по 1 параметру), минимизация отклонения от целевого интервала для дат сев-цветение-созревание;
- ▶ Фотосинтез: AMAX, KDIF, EFF, SPAN. Алгоритм оптимизации Differential evolution (4 параметра сразу), минимизация ошибки оценки урожайности;
- ▶ Урожайность: распределение ассимилятов в фазе $DVS=0.2$ и $DVS=1$ (7 параметров сразу), минимизация ошибки оценки урожайности



Модель

WOFOST (World Food Studies) — динамическая имитационная модель роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. Её основная задача — ежедневный расчет прироста биомассы и развития растения от всходов до созревания, в зависимости от погодных условий, характеристик почвы и параметров самой культуры.



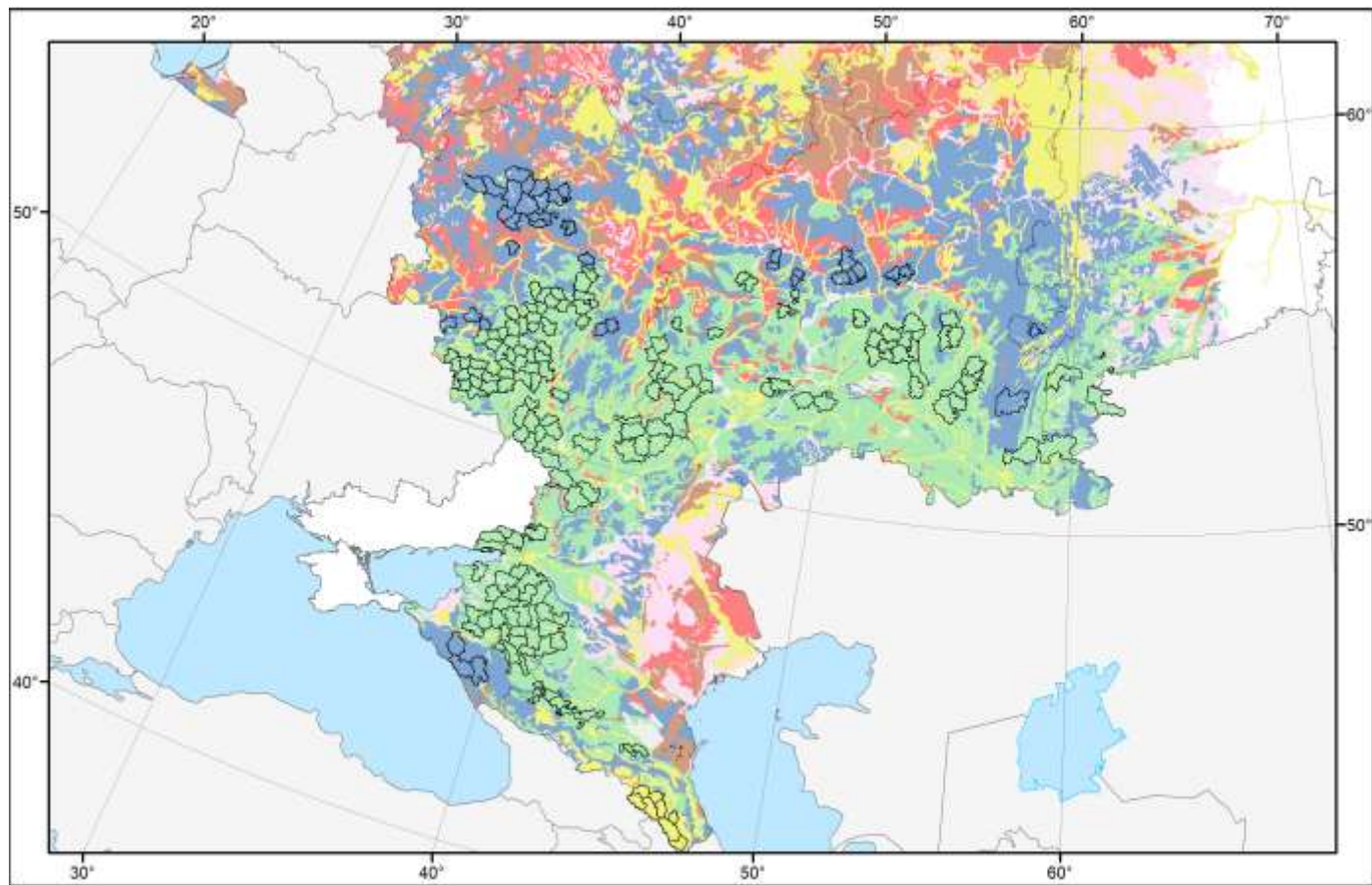
- ▶ Входные данные:
 - ▶ Агроменеджмент;
 - ▶ Дата сева;
 - ▶ Ежедневные агроклиматические характеристики;
 - ▶ Параметры культуры (фенология, фотосинтез, распределение ассимилятов);
 - ▶ Гидрофизические параметры почвы



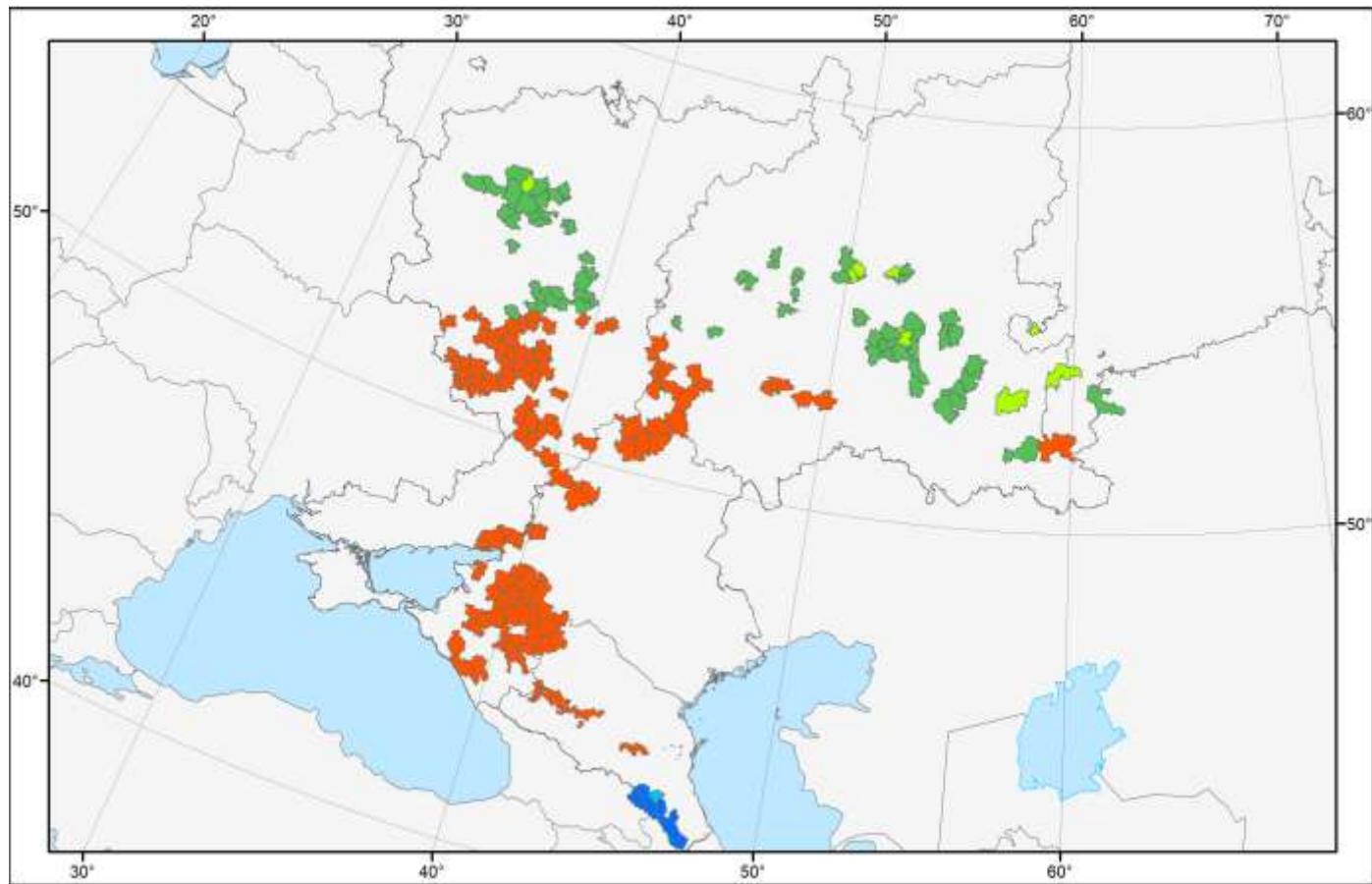
Входные агроклиматические данные для WOFOST

Параметр	Единицы измерения	Название	Описание
IRRAD	кДж/м²/день	Суммарная солнечная радиация	Определяет потенциальный рост за счёт фотосинтеза
TMIN	°C	Минимальная температура воздуха	Влияет на процессы дыхания и связан со стрессом от холода
TMAX	°C	Максимальная температура воздуха	Тепловой стресс. Вместе с TMIN используется для расчета средней температуры.
RAIN	мм	Сумма осадков	Основной источник влаги для почвы в богарных условиях.
WIND	м/с	Скорость ветра на высоте 2 м	Влияет на испаряемость с поверхности почвы и растений.
VAP	кПа	Давление водяного пара	Характеризует влажность воздуха. Используется для расчета дефицита давления пара

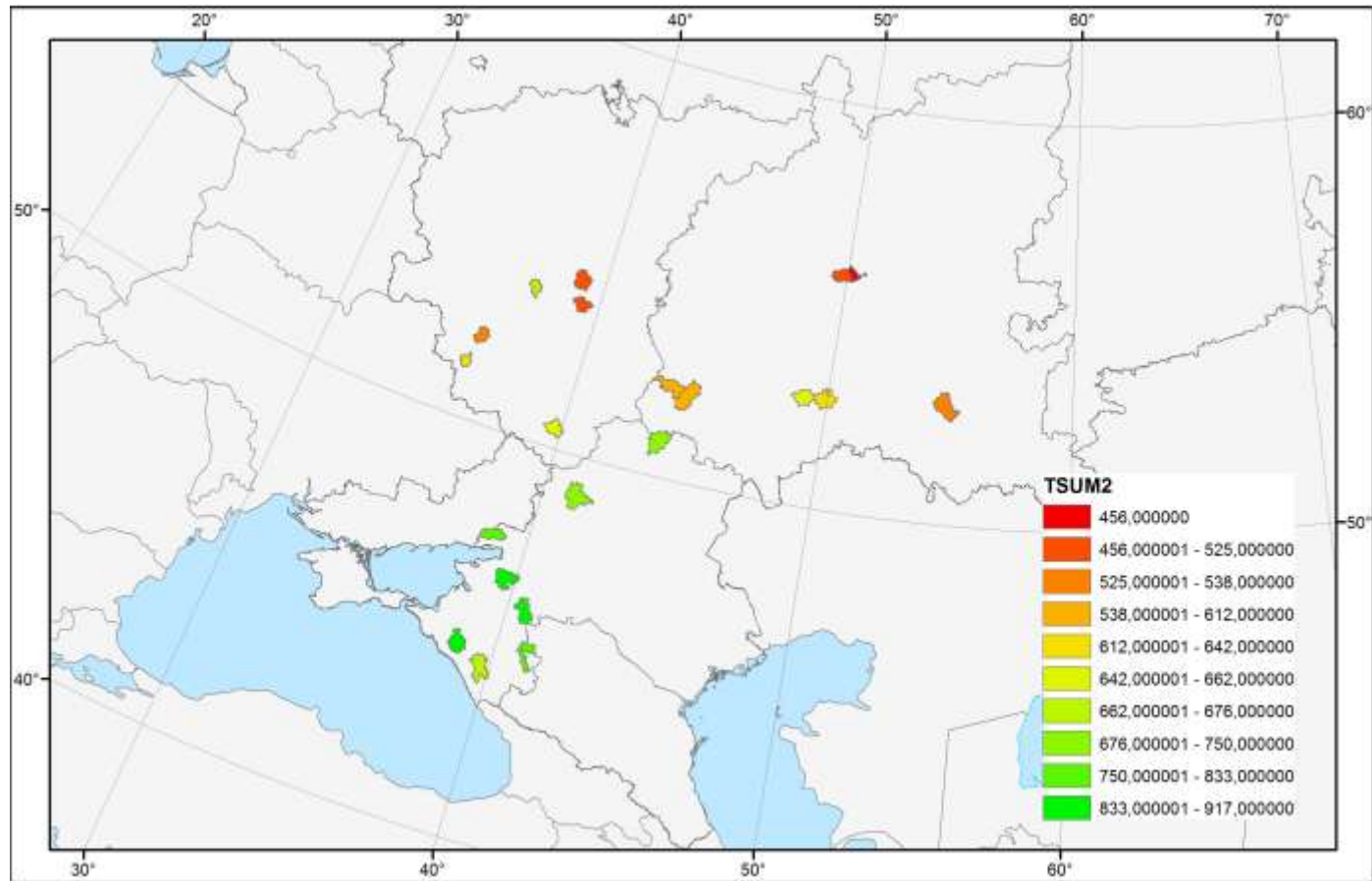
Однородные районы: один тип почвы



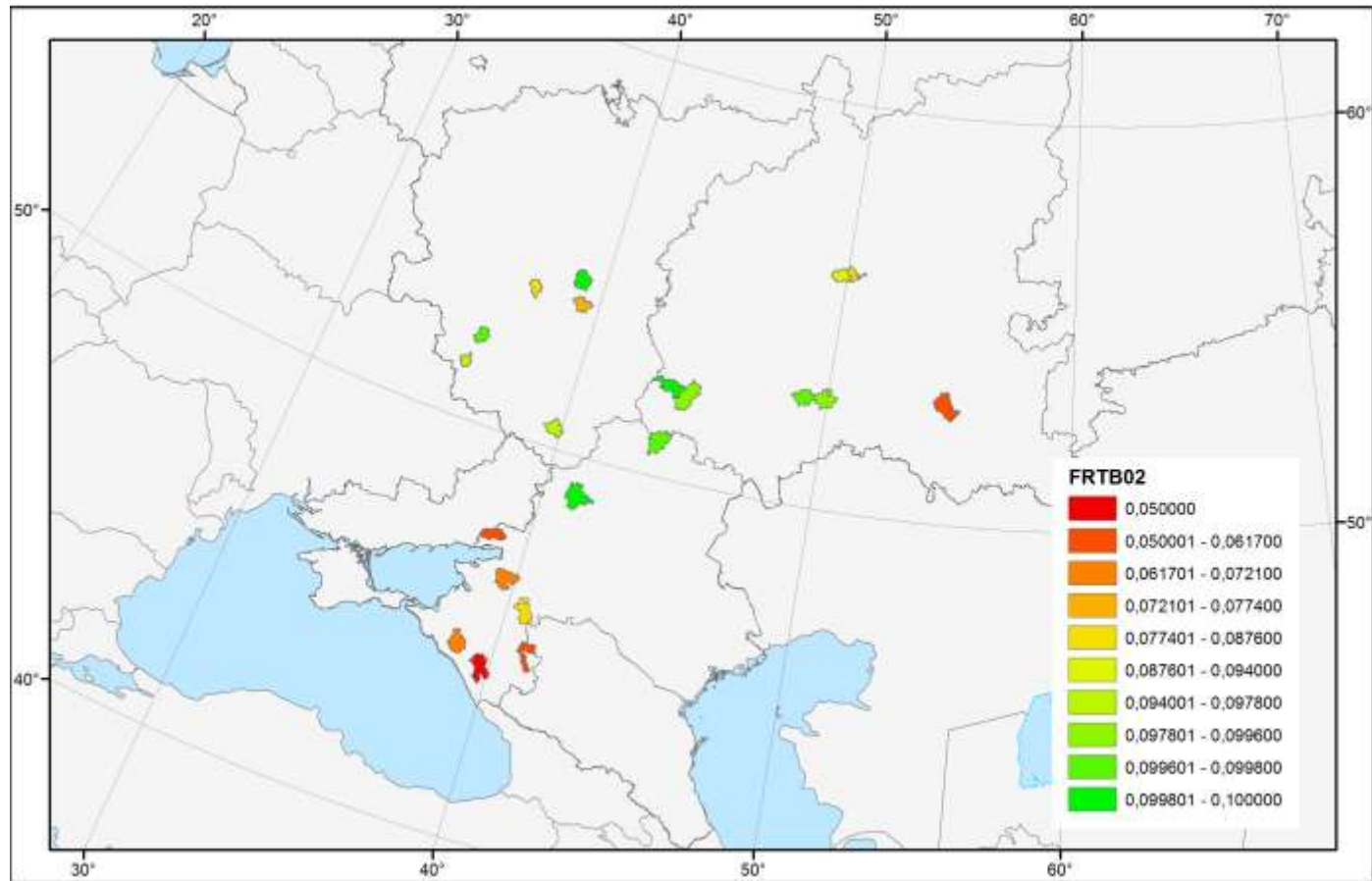
Климатические кластеры для однородных районов



Результаты на примере кукурузы на зерно: TSUM2 (дата цветения-дата созревания)



Результаты на примере кукурузы на зерно: FRTB02 (масса корней на фазе созревания)

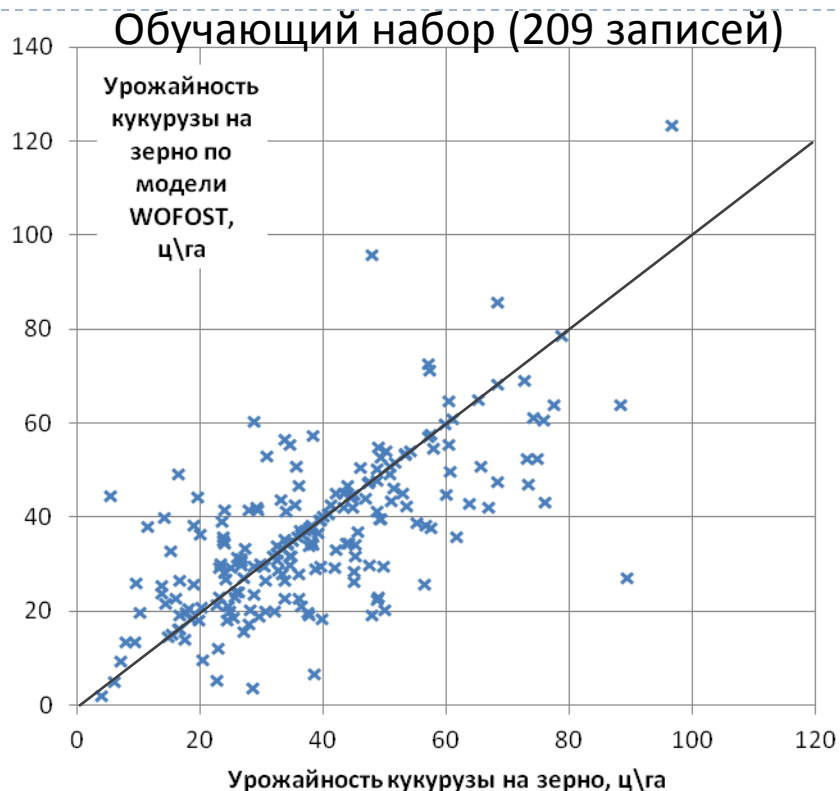


Оценка точности параметризации

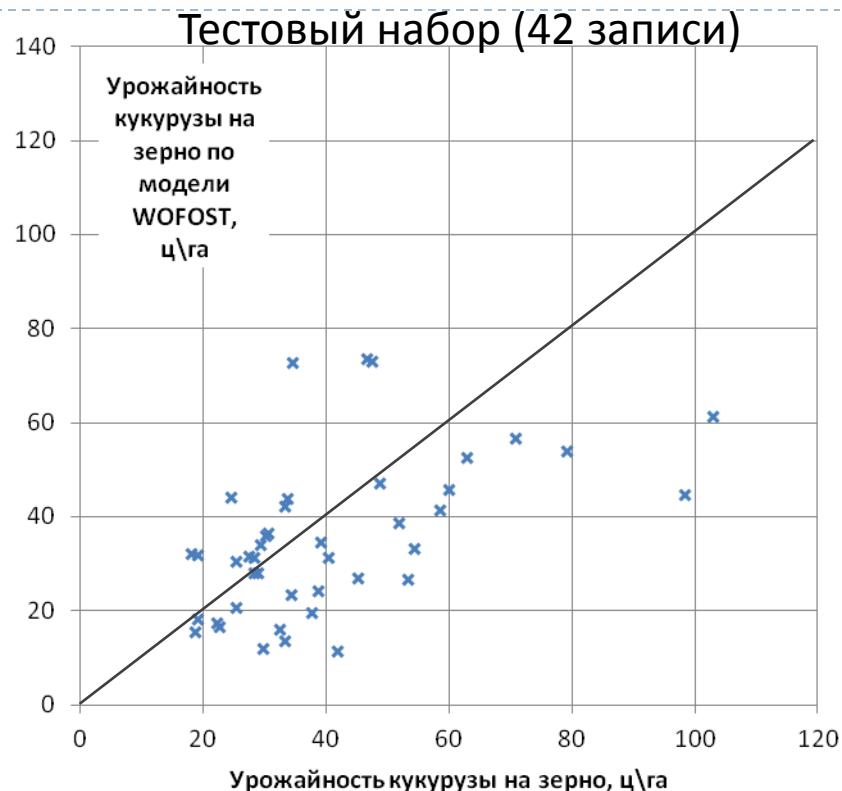
- ▶ Для каждого района из ~15 лет было случайным образом выбрано 2 тестовых года, которые не участвовали в параметризации
- ▶ После окончания порайонной параметризации прогнозирование урожайности осуществлялось для каждого года с разделением «обучающих лет» и «тестовых лет»;
- ▶ Считались знаковые ошибки (Mean) и средний модуль ошибки (MAE) отдельно для «обучающих лет» и «тестовых лет»



Результаты (по 20 районам и ~15 годам)



Mean = 1,8 ц\га, MAE = 9,3 ц\га



Mean = 5,4 ц\га; MAE = 14,3 ц\га

Выводы

- ▶ Разработана технология автоматической параметризации WOFOST на больших территориях, получены файлы культур для каждого района, продолжается параметризация для других районов и культур;
- ▶ Расчётное время работы – несколько дней на одну ключевую культуру для территории ЕТР;
- ▶ Прогнозирование урожайности на примере кукурузы **только за счёт почвенно-климатических индикаторов** даёт ошибку в размере 20-25% (бенчмарк для ДЗЗ);
- ▶ Полученные результаты обеспечивают возможность прогнозирования урожайности на больших территориях с заблаговременностью, зависящей от срочности прогноза (однако ключевое значение имеет прогноз до момента завязывания зёрен);
- ▶ Необходим анализ достоверности используемой статистики по урожайности культур

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-663, уникальный идентификатор 13.2251.21.0264)

