

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПО ДАННЫМ СТАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ, РЕАНАЛИЗА ERA5-LAND И ДАННЫМ АНАЛИЗА МОДЕЛИ ПЛАВ НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РОССИИ

Кланг П.С., Тарасова Л.Л., Хан В.М.

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва, Россия

Адекватное воспроизведение влажности почвы в численных моделях погоды и климата критически важно для повышения качества прогнозов. Однако верификация модельных данных существенно затруднена из-за отсутствия репрезентативных и территориально привязанных рядов инструментальных наблюдений за влажностью почвы. В России наблюдения почвенной влаги на сети Росгидромета ведутся десятилетиями, однако специфика этих данных долгое время ограничивала их использование для валидации климатических моделей и реанализов.

Целью данной работы было сопоставление рядов влажности почвы станционных наблюдений с данными реанализа ERA5-Land, а также с данными влажности почвы долгосрочной модели ПЛАВ, и выявление крупномасштабных особенностей поля влажности почвы по районам Черноземной зоны России.

1. Данные и методы

В работе сопоставлялись данные с апреля по сентябрь 2004–2025 г. в 11, 21 и 30/31 дни месяца по 245-и станциям чернозёмной зоны европейской территории России. Их расположение показано на рис. 1.

В табл. 1 ниже представлены основные особенности данных. Было проведено согласование данных по слоям почвы, слою наблюдений использовались как эталон. Расчет слоя почвы 0-100см для ERA5-Land был получен путем суммирования трех доступных слоев, для получения слоя 0-50см реанализа, например, производилось суммирование слоев I (0-7см) и II (07-28см), “недостающий” слой почвы 28-50см был рассчитан на основе гипотезы о том, что распределение влаги в слое модельных данных гомогенно и в каждом сантиметре слоя почвы располагалось равное количество влаги. Так, слой почвы III (28-100см) делился на толщину всего слоя (0,72), затем проводилось его дальнейшее умножение на толщину искомого слоя (0,23см) [1]. Для модельных данных ПЛАВ применялась аналогичная методика.



Рис. 1 – Расположение станций сети Росгидромета, имеющих наиболее продолжительный ряд наблюдений за влажностью почвы.

Таблица 1. – Описание станционных и начальных модельных данных.

	Данные наблюдательной сети Росгидромета	ECMWF Reanalysis v5 - Land	Данные анализа ПЛАВ
время	оперативные срочные данные	данные в узле сетки в 12:00	осредненные за би часовые периоды декадные данные
горизонтальное разрешение	географические координаты станций	0.1x0.1°	0.90x0.72°
система единиц	запасы <u>продуктивной</u> влаги в почве, [мм водного слоя]	volumetric soil water, <u>объемная</u> влажность почвы, [m³ m⁻³]	<u>весовая</u> влажность почвы, [кг/м³]
слои почвы	I. 0-20 см, II. 0-50 см, III. 0-100 см	I. 0-7 см, II. 07-28 см, III. 28-100 см	I. 0-18 см, II. 0-54 см, III. 0-100 см

Для выявления крупномасштабных аномалий территория исследования была разделена на четыре региона (табл. 2).

Таблица 2. – Регионы европейской части России, участвующие в исследовании.

№	Название региона	Количество станций
1	Центральные чернозёмные области и юг центрального нечерноземья	58
2	Среднее Поволжье	56
3	Юг Урала	55
4	Юг европейской территории	76

Оренбургская область, Республика Башкортостан

Астраханская, Волгоградская, Ростовская области, Респ. Дагестан, Калмыкия, Чечня, Кабардино-Балкария, Крым, Краснодарский и Ставропольский края

2. Описание почвенных моделей

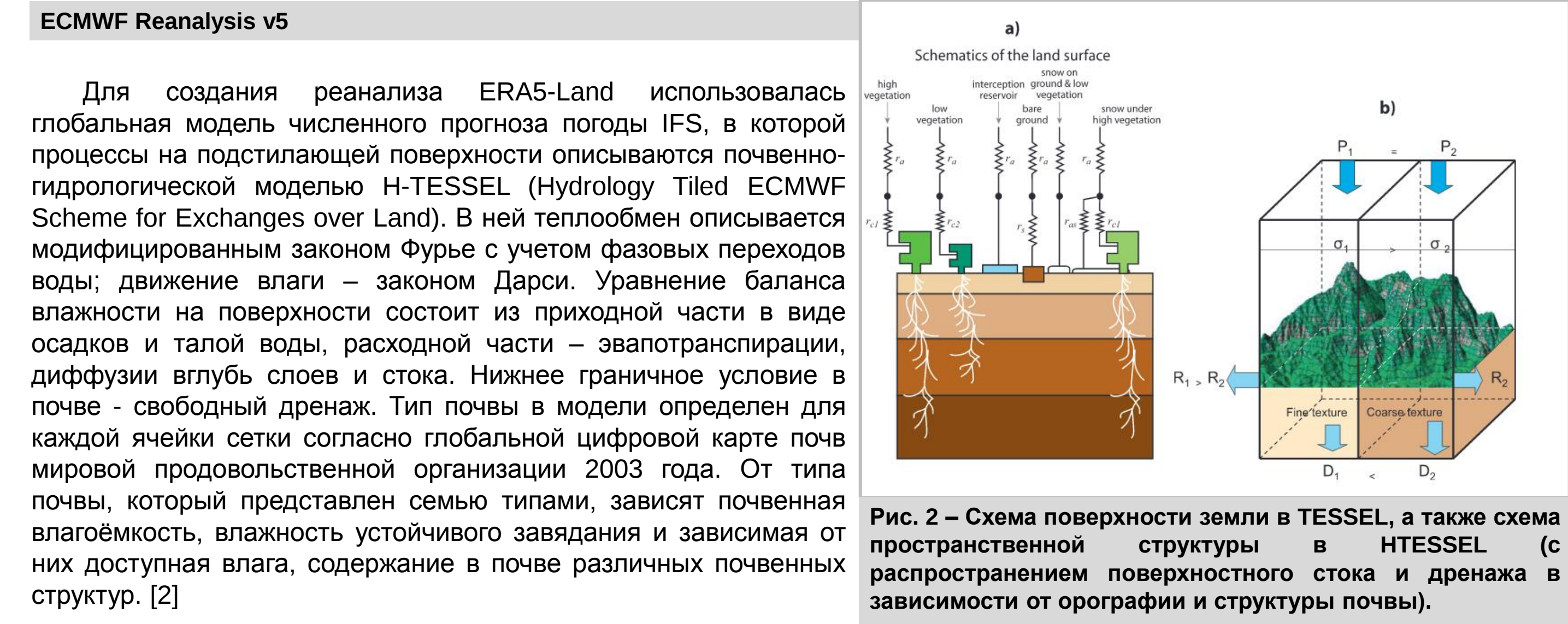


Рис. 2 – Схема поверхности земли в TESSEL, а также схема пространственной структуры в HTESSEL (с распространением поверхностного стока и дренажа в зависимости от орографии и структуры почвы).

Многослойная модель деятельного слоя почвы ИВМ РАН-МГУ

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + L \rho F_i,$$

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_l \frac{\partial W_l}{\partial z} + \frac{\partial y}{\partial z} - F_l - R - E_r,$$

$$\frac{\partial W_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_v \frac{\partial W_v}{\partial z},$$

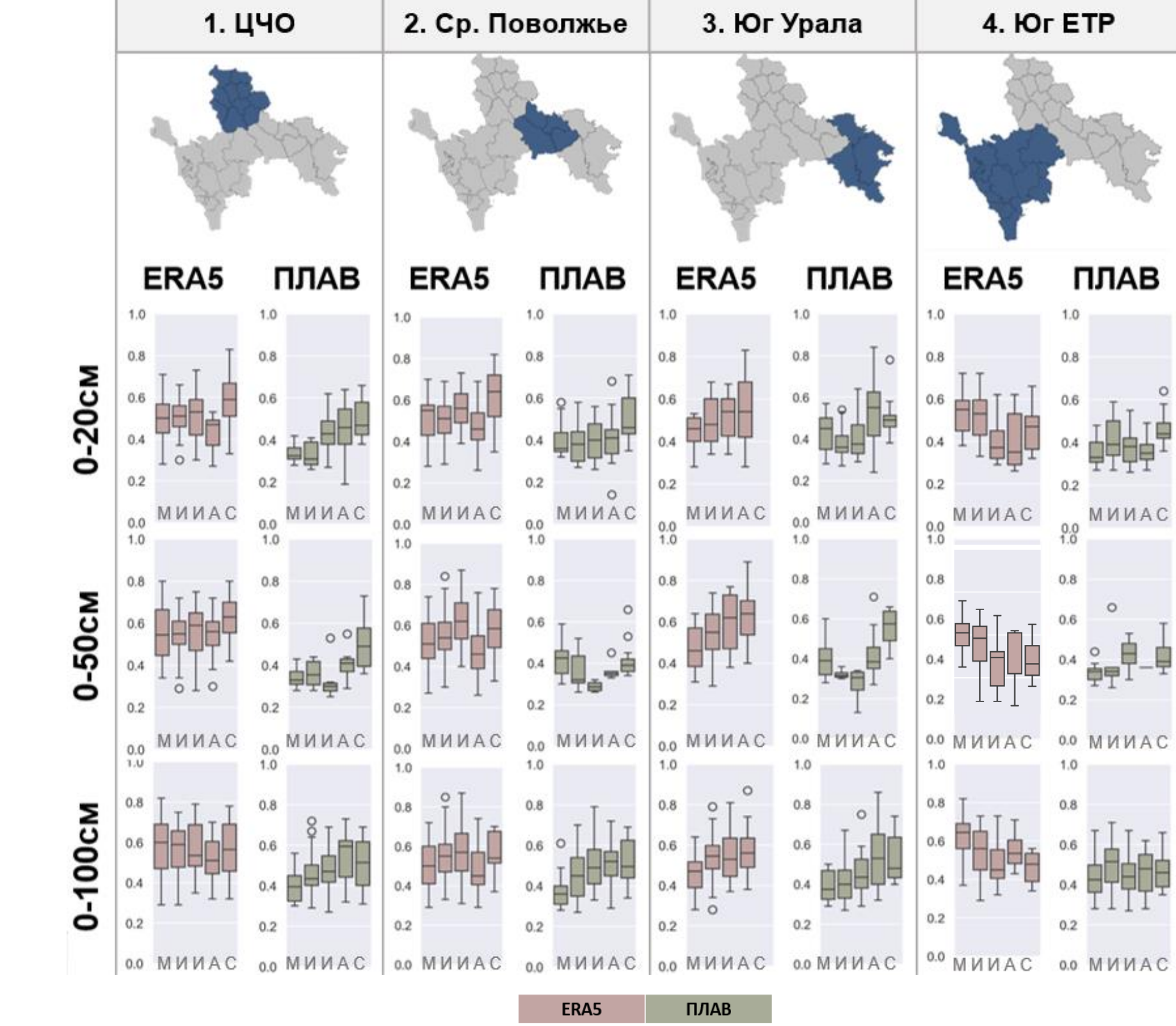
$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = F_i,$$

где t – время, с; z – глубина, см; T – температура почвы, °C; W_l , W_v , W_i – масса почвенной влаги в жидком, газообразном и твердом состоянии в долях от массы сухой почвы, г/г; C – удельная теплоемкость почвы на единицу массы сухой почвы, кал/(г К); ρ – плотность сухой почвы, г/см³; λ – коэффициент теплопроводности почвы, кал/(см с К); λ_l , λ_v – коэффициенты диффузии воды и водяного пара в почве, см²/с; y – коэффициент гидравлической проводимости, см/с; L – удельная теплота плавления льда, кал/г; F_i , R , E_r – скорости замерзания (таяния) воды, грунтового стока и всасывания воды корнями растений соответственно, с⁻¹.

В версии модели ПЛАВ для долгосрочного прогноза (горизонтальное разрешение 0,9°x0,72°) процессы диффузии тепла и влаги в почве описываются моделью ИВМ РАН-МГУ, в которой все процессы в грунте считаются одномерными, поверхность в почве может быть как оголенной, так и покрытой снегом и растительностью. Особое внимание в модели уделяется описанию фронтов промерзания и оттаивания в грунте, снеготаянию, потокам транспирации с поверхности. Модель имеет девять вертикальных узлов на глубинах от 0 до 1456 см, в которых решаются уравнения теплопереноса с учетом корневой системы растительности от приземного до глубинного, на котором отсутствует годовой ход температуры. Система уравнений приведена слева. На нижней границе предполагается отсутствие диффузионных потоков. Текстура почвы, выраженная процентным соотношением глины, песка и ила предписана в каждом вычислительном узле почвенного уровня. Описание почвенной модели и ее приложение в ПЛАВ описаны [3, 4].

3. Результаты анализа крупномасштабных аномалий влажности почвы

3.1 Значения коэффициентов корреляции Пирсона (уровень значимости 95%) между станционными данными и ERA5-Land и ПЛАВ по месяцам с 2004–2025г. по слоям почвы



По диаграмме отмечаются достаточно высокие уровни связности между станционными данными и ERA5-Land во всех регионах и слоях почвы. Уменьшение связности к концу вегетационного сезона отмечается в южном регионе. С данными модели ПЛАВ увеличение коэффициентов корреляции отмечается к летним месяцам, наиболее высокие коэффициенты были получены для слоев почвы 0-20см и 0-100см. Заметных различий по регионам не отмечаем.

3.2 Согласованность знака аномалии почвенной влаги за май, июль и июнь по четырём регионам России

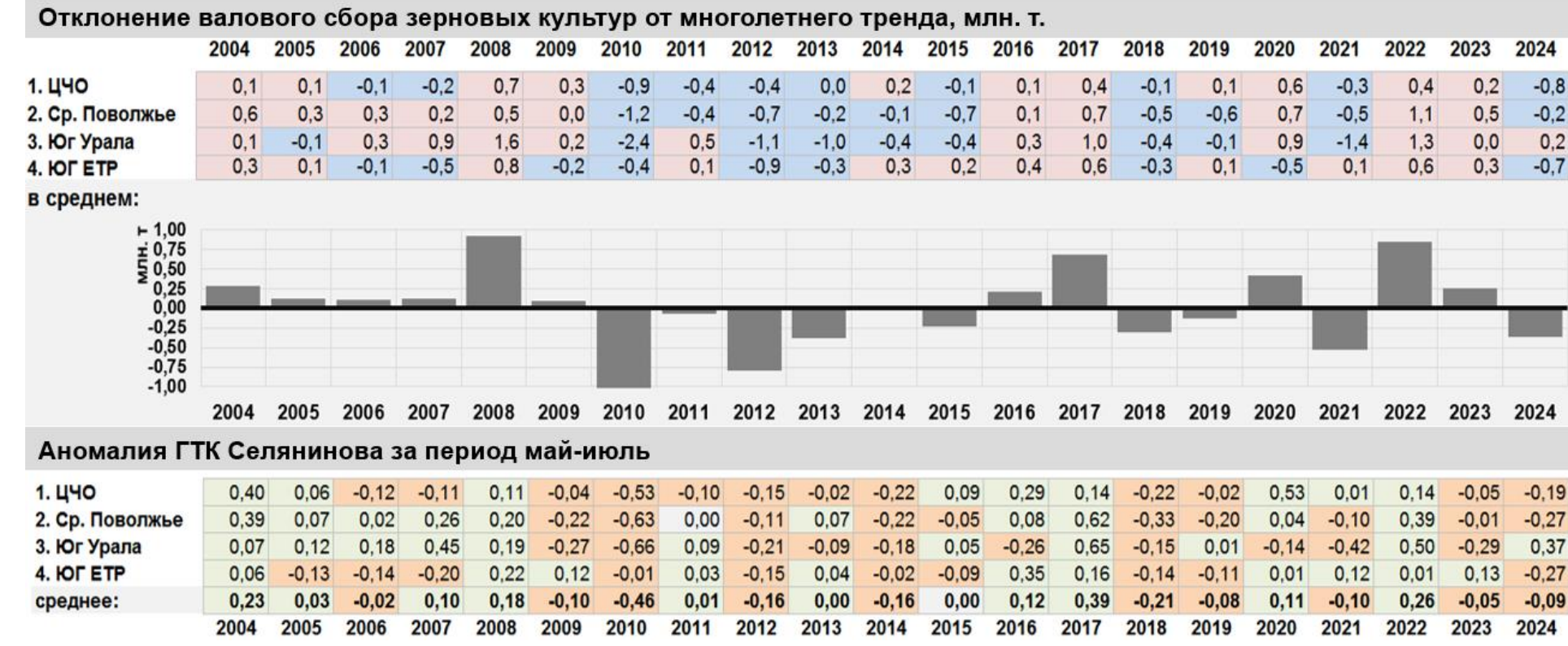


Таблица 3. – Процент совпадений аномалии ПВ по аномалии увлажнения Гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова Г.Т., %

	1. - ЦЧО	2. - Сред. Поволжье	3. - Юг Урала	4. Юг ЕТР
	сухой	сухой	сухой	сухой
ERA5	94	86	83	91
0-20см	78	79	75	81
0-50см	75	74	78	87
0-100см	63	45	60	70
ПАВ	47	52	49	39
0-20см	66	55	66	67
0-50см				
0-100см				

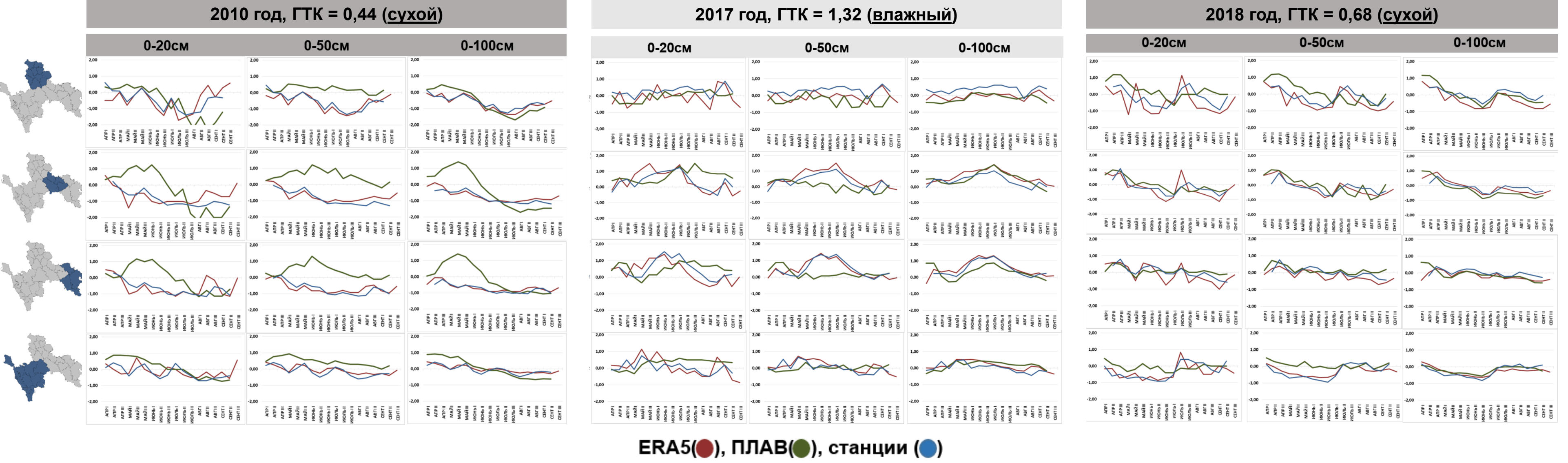
ERA5-Land показывает достаточно высокие результаты совпадений во все сезоны в каждом из регионов, показывая по незначительное ухудшение во влажные сезоны, в особенности в Среднем Поволжье. В модели ПЛАВ наибольшее число совпадений знака аномалии отмечается в ЦЧО, юге Урала и на юге ЕТР в слоях почвы 0-20 и 0-100см. Стоит отметить, что в модели ПЛАВ заметного ухудшения во влажные годы не наблюдается, напротив, во влажные годы она показывает более высокий процент совпадений по югу ЕТР и Среднему Поволжью.

3.3 Динамика почвенной влаги в наиболее аномальные годы (см. графики справа)



По таблицам, представленным выше, были выбраны года с выраженными аномалиями условий увлажнения, приведшие к потере (2010, 2018г), и увеличению валового сбора (2017г). Приоритет был у тех лет, где аномалия отмечалась в каждом из регионов.

Для сопоставления, данные были приведены к безразмерным величинам. Из построенных по слоям и регионам графикам видно, что в 2017 и 2018г. отмечаются хорошая согласованность динамики увлажнения в 0-100см слое, несколько хуже она в 2010 году у ПЛАВ в среднем Поволжье и на юге Урала,



где в мае отмечаются повышенные значения, сокращающиеся к началу лета, что возможно связано с процессами снеготаяния в модели. Обе модели улавливают выраженную почвенную засуху в июне-июле в «сухих» годах. Наибольшие расхождения динамик, наблюдаются в слое почвы 0-20см, который наиболее сильно зависит от усвоения осадков моделью. В целом обе модели улавливают пополнение влагозапасов, что видно по данным в 2017 г.. Стоит отметить, что данные реанализа имеют более выраженную пиковую составляющую.

Выводы: установлено, что наиболее хорошая воспроизводимость почвенных аномалий отмечается в Центральном Черноземье, юге Урала и ЕТР, обе модели демонстрируют несколько худшие результаты в Среднем Поволжье. Стоит отметить хорошую воспроизводимость аномалий в слое почвы 0-100см, что представляет наибольший интерес для дальнейших исследований.

[1] Кланг П.С., Хан В.М., Тарасова Л.Л., Оценка объемной влажности почвы реанализа ERA5 по данным станционных наблюдений влагозапасов в регионах Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. №4 (394) С. 146-162. [2] G.Balsamo, P.Viterbo, A.Beljaars, B.van den Hurk, M.Hirschi, A.K.Betts, K.Scipal, A revised hydrology for the ECMWF model, J. Hydro.Met., 2009, p. 623-643 [3] Володин Е.М., Лысков В.Н. Параметризация процессов тепло-и влагообмена в системе растительность-почва для моделирования общей циркуляции атмосферы 1. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1998, т. 346 №4, с. 453-465. [4] Травова С. В. Анализ влажности почвы для глобальной модели атмосферы ПЛАВ: специальность 25.00.30 «метеорология, климатология, агрометеорология». Диссертация на соискание кандидата физико-математических наук / ФГБУ "Гидрометеорологический научно-исследовательский институт Российской Федерации". — Москва, 2022. — 161 с.