

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-146-162>  
УДК 551.579.5 (470)

**Оценка объемной влажности почвы  
реанализа ERA5  
по данным стационарных наблюдений влагозапасов  
в регионах Российской Федерации**

*П.С. Кланг, В.М. Хан, Л.Л. Тарасова*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
ais@mecom.ru*

Проведено сопоставление значений объемной влажности почвы по данным реанализа глобального климата пятого поколения (ERA5) и наблюдений за запасами продуктивной влаги по десяти станциям Росгидромета с различными типами почвы за вегетационные периоды 2011–2023 гг. Проведено согласование этих рядов в мм водного слоя полной влаги с учётом системной ошибки и показано, что в слоях почвы 0–50 и 0–100 см реанализ воспроизводит основные особенности сезонного хода влажности почвы, её динамику в течение вегетационных периодов, а также эпизоды избыточного увлажнения и засух.

*Ключевые слова:* влажность почвы, ERA5, реанализ, данные наблюдений за влажностью почвы, влагозапасы, моделирование, статистические оценки

**Estimation of volumetric soil moisture  
from ERA5 reanalysis  
according to the station observations of moisture reserves  
in the regions of the Russian Federation**

*P.S. Klang, V.M. Khan, L.L. Tarasova*

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia  
ais@mecom.ru*

The study compares volumetric soil moisture based on the data from the fifth-generation global climate reanalysis (ERA5) and observations of productive soil moisture reserves in various soil layers at ten Roshydromet stations for the growing seasons from 2011 to 2023. The coordination of these series in mm of the water layer of total moisture with account of biases is carried out. It is shown that the reanalysis reproduces the main features of seasonal variations in soil moisture in the layers of 0–50 and 0–100 cm, its dynamics during the growing seasons, as well as the episodes of excessive moisture or drought conditions.

*Keywords:* soil moisture, ERA5, reanalysis, soil moisture observations, moisture reserves, modeling, statistical estimation

## Введение

Влагометрия почвы является одной из наиболее важных и ответственных частей программы агрометеорологических наблюдений. Без преувеличения, это самая трудо-, энерго- и времязатратная технология измерений, проводимых на станциях Росгидромета. Вследствие чего наблюдения за влажностью почвы проводятся сравнительно редко – один раз в декаду [5]. Для более детального мониторинга влажности почвы, как по времени, так и по пространству, необходимо использование результатов компьютерного моделирования, в частности моделей подстилающей поверхности.

Входными для такого моделирования обычно являются данные об атмосферных осадках, температуре, влажности воздуха, ветре, а также данные информационного окружения: типы почвы и растительности, орография и др. [1, 4, 13]. Для наиболее эффективного использования результатов такого моделирования необходима их верификация. Решить эту задачу можно как для отдельных полигонов, и тогда модель строится с учетом специфики данного полигона, так и с привлечением данных регулярной наблюдательной сети.

Понимание качества воспроизведения данных реанализа влажности почвы на территории России имеет большое значение. В настоящее время описанию подстилающей поверхности и процессов на границе почва – атмосфера в прогностических моделях погоды и климата придается большое значение, данный вопрос имеет большой потенциал и в перспективе – точный учет влажности почвы и физического испарения с ее поверхности. Модельные блоки, описывающие рост и транспирацию растений, могут повлиять на улучшение качества моделирования в целом и на коррекцию самих прогнозов. Краткосрочное и особенно долгосрочное прогнозирование влагозапасов также чрезвычайно актуально, такие прогнозы могут быть востребованы в аграрной отрасли [2, 3].

Наличие достаточно точного и подробного прогностического поля влажности почвы по сравнительно большой территории представляется важным не только для агрометеорологических задач, но и гидрологических.

Отдельной проблемой в агроклиматологии является вопрос о влажности почвы в различных регионах в разные временные промежутки. В настоящее время агроклимат влажности почвы представлен лишь отдельными станциями и только в период активной вегетации растений.

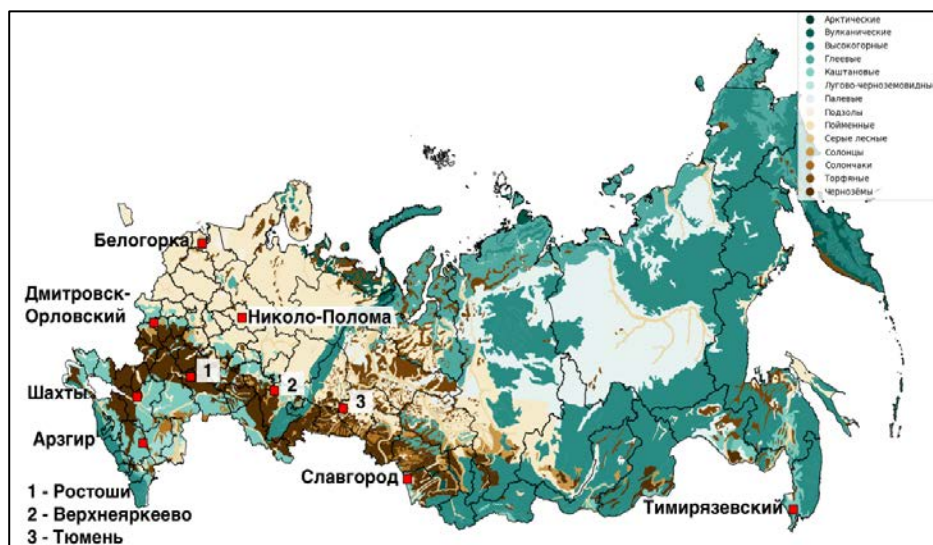
*Целью исследования* было сопоставление данных реанализа ERA5 [9] со стационарными наблюдениями на метеорологической сети Росгидромета и оценка их согласованности, сезонного хода и, в первую очередь, воспроизводимости засушливых условий и избыточного увлажнения.

Также нами была предпринята попытка скорректировать данные по влажности почвы ERA5 на основе данных стационарных наблюдений.

## 1. Материалы исследования

### 1.1. Данные о влажности почвы со станций наблюдательной сети Росгидромета

Для оценки объемной влажности почвы в слоях почвы 0–50 и 0–100 см были выбраны десять станций наблюдательной метеорологической сети Росгидромета (рис. 1) в различных географических регионах с большим разнообразием типов почв, ведущие ежедекадные наблюдения за влажностью почвы под с.-х. культурами за вегетационные периоды 2011–2023 гг. Период исследования 2011–2023 гг. был взят как наиболее освещенный с точки зрения набора данных для исследования, в эти годы практически не отмечается пропусков в измерениях. Результаты этих наблюдений рассчитываются в виде запасов продуктивной влаги почвы для различных слоев почвы и передаются в Гидрометцентр России в коде КН-21.



**Рис. 1.** Географическое расположение станций Росгидромета, участвующих в исследовании, на карте почв FAO (Harmonized World Soil Database v2.0, 2023) [11].

**Fig 1.** The geographical location of the Roshydromet stations participating in the study on the FAO soil map (Harmonized World Soil Database v2.0, 2023 ) [11].

Выбранные метеорологические станции представлены в табл. 1. Тип почв был определен из таблиц агрогидрологических свойств почвы (ТСХ-5), предоставленных ФГБУ «ВНИИСХМ».

В табл. 1 приведено также число наблюдений за весь рассматриваемый период. Величина их колеблется от 117 до 243, так как на различных

станциях период наблюдений варьирует от 3 месяцев до полугода, что связано с различной длиной вегетационного периода (влагозапасы в почве определяются только в период активного роста с.-х. культур, например, для зерновых это период от всходов до молочной спелости). В районах, где нет озимых (Славгород в Алтайском крае и Тимирязевский в Приморском крае), наблюдения ведутся только в мае–июле.

**Таблица 1.** Станции наблюдательной сети Росгидромета, принимающие участие в исследовании и их характеристики

**Table 1.** The Roshydromet observation network stations participating in the study and their characteristics

Название станции	Широта	Долгота	Тип почвы по с.-х. таблицам агрогидрологических свойств почвы	Кол-во наблюдений за почвенной влагой	
				0-50 см	0-100 см
<b>Белогорка</b> Ленинградская область	59,35	30,13	Дерново-среднеподзолистая, супесчаная	222	93
<b>Дмитровск-Орловский</b> Орловская область	52,50	35,15	Чернозем супесчаный	198	199
<b>Никола-Полома</b> Костромская область	58,35	43,38	Дерново-подзолистая, легкосуглинистая	217	183
<b>Шахты</b> Ростовская область	47,70	40,26	Чернозем южный среднесуглинистый	204	205
<b>Арзгир</b> Ставропольский край	45,40	44,20	Каштановая тяжелосуглинистая	134	134
<b>Ростоши</b> Саратовская область	51,86	43,58	Чернозем обыкновенный глинистый	230	230
<b>Верхнеяркеево</b> Республ. Башкортостан	55,43	54,33	Чернозем выщелоченный глинистый	226	226
<b>Тюмень</b> Тюменская область	57,11	65,43	Темно-серая лесная, тяжелосуглинистая	243	243
<b>Славгород</b> Алтайский край	52,96	78,65	Светло-каштановая легкосуглинистая	117	117
<b>Тимирязевский</b> Приморский край	43,88	131,96	Лугово-бурая оподзоленная, тяжелосуглинистая	134	126

## 1.2. Данные объемной почвенной влаги ERA5

Данные реанализа глобального климата пятого поколения ERA5, представленные Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) совместно со службой мониторинга изменения климата “Коперник” (The Copernicus Climate Change Service, C3S) [9], включают в себя, наравне с характеристиками влажности воздуха, давления и температуры, в том числе и оценки влажности почвы на разных глубинах с почасовым разрешением. ERA5 предоставляет набор данных, находящийся в свободном доступе для исследователей, охватывает период с 1940 г. до настоящего времени. Пополнение базы C3S актуальными значениями происходит с задержкой, которая составляет от 2 до 3 месяцев по сравнению с реальным временем. Горизонтальное разрешение набора данных ERA5 составляет около 31 км, или  $0,25^\circ$ . Почвенная влага в ERA5 представлена в размерности объемной влажности ( $\text{м}^3\text{м}^{-3}$ ) по четырем слоям почвы (0–7, 7–28, 28–100 и 100–289 см) [12], где значение принадлежит середине слоя.

Для создания реанализа ERA5 использовалась глобальная модель численного прогноза погоды IFS, в которой процессы на подстилающей поверхности описываются улучшенной почвенно-гидрологической моделью H-TESSSEL (Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Exchanges over Land) [8]. В ней теплообмен описывается модифицированным законом Фурье с учетом фазовых переходов воды; движение влаги – законом Дарси. Уравнение баланса влажности на поверхности состоит из приходной части в виде осадков и талой воды, расходной части – эвапотранспирации, диффузии вглубь слоев и стока. Нижнее пограничное условие в более глубоких слоях почвы определяется свободным дренажом. В модели H-TESSSEL поверхностный сток рассчитывается в зависимости от переменной инфильтрационной способности, которая в свою очередь зависит местной топографии и типа почвы. Тип почвы в модели определен для каждой ячейки сетки согласно глобальной цифровой карте почв мировой продовольственной организации 2003 г. [10]. От типа почвы, который представлен семью типами, зависят почвенная влагоемкость, влажность устойчивого завядания и зависящая от них доступная влага, содержание в почве различных почвенных структур. Модельная растительность на подстилающей поверхности получена на основе Глобальных характеристик растительного покрова (Global Land Cover Characteristics), с учетом ежемесячного индекса листовой поверхности (LAI), полученного на основе данных дистанционного зондирования. Качество набора данных по почвенной влаге было высоко оценено международными исследователями [8, 14].

Для проведения исследования были отобраны модельные данные по трем слоям почвы (0–7, 7–28, 28–100 см), так как их сумма дает метровый слой, по которому есть наблюдаемые влагозапасы. Данные отбирались во время вегетационного периода с апреля 2011 г. по октябрь 2023 года в 12.00 ч ВСВ каждый месяц 8, 18, 28 числа, в дни, в которые наблюдатели

на агрометеорологических станциях отбирают пробы на с.-х. полях [5]. Использовались наиболее приближенные к координатам станций узлы сетки (табл. 2).

**Таблица 2.** Координаты ближайших узлов сетки ERA5 и их характеристики  
**Table 2.** Coordinates of the nearest grid point of the ERA5 and their characteristics

Название станции	Широта ERA5	Долгота ERA5	Параметры ячейки сетки			Кол-во наблюдений за почв. влагой		
			Тип почвы	Тип низкой растительн.	Доля ячейки с низкой растительн.	0–7 см	7–28 см	28–100 см
<b>Белогорка</b> Ленинградская область	59,25	30,25	средний	с.-х. культуры	0,3	315	315	315
<b>Дмитровск-Орловский</b> Орловская область	52,50	35,25			1,0			
<b>Николо-Полома</b> Костромская область	58,25	43,50			0,4			
<b>Шахты</b> Ростовская область	47,75	40,25			0,7			
<b>Арзгир</b> Ставропольский край	45,50	44,25			0,7			
<b>Ростоши</b> Саратовская область	51,75	43,50			1,0			
<b>Верхнеяркеево</b> Респ. Башкортостан	55,50	54,25			0,7			
<b>Тюмень</b> Тюменская область	57,00	65,50			0,7			
<b>Славгород</b> Алтайский край	53,00	78,75			1,0			
<b>Тимирязевский</b> Приморский край	44,00	132,0			0,9			

Таким образом, в работе использовались два источника информации: частые по пространству и времени данные моделирования объемной влажности почвы с неизвестным нам качеством воспроизведения динамики и редкие по пространству ежедекадные данные запасов продуктивной влаги на станциях с высоким качеством наблюдения.

### 1.3. Сопоставление данных

Данные ERA5 представлены значениями Volumetric soil moisture of a soil layer – объемной влаги по слоям ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ). Данную величину – весь объем воды, содержащейся в почве в данный момент времени – мы будем

называть, согласно терминологии, принятой в российской агрометеорологии, полной влагой. Следует различать понятия «полная влага» и «полная влагоемкость» – количество влаги в почве при условии заполнения всех почвенных капилляров, т. е. первое – это текущее состояние, другое – агрогидрологическая константа, зависящая от типа почвы и ее пористости [7].

В то же время данные наблюдений выражены в запасах продуктивной влаги в миллиметрах водного слоя, т. е. количестве воды, содержащемся в слое почвы сверх влажности устойчивого завядания ( $УЗ$ ) – влажности, при которой появляются необратимые признаки завядания растений. Таким образом, запасы продуктивной влаги есть разность полной влаги и устойчивого завядания.

Понятию «устойчивое завядание» соответствует Volumetric wilting point из реанализа. В англоязычной литературе есть понятие, в буквальном переводе означающее продуктивную влагу (available soil moisture), которое представляет собой разность между наименьшей полевой влагоемкостью (Field capacity – вода, остающаяся в почве после того, как она была полностью насыщена и получила возможность свободно стекать) и устойчивым завяданием, т. е. это не изменяющееся во времени фактически доступное для растений количество влаги, а разность агрогидрологических констант, показывающая максимально возможное количество влаги одновременно доступное для растений.

Для сопоставления данных необходимо привести исследуемые величины каждого из слоев ERA5 к мм водного слоя:

$$W_{ERA} = \Theta \rho_{\text{воды}} h_{\text{слоя}} m, \quad (1)$$

где  $\Theta$  – значение объемной влажности почвы по реанализу,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{воды}}$  – плотность воды,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $h_{\text{слоя}}$  – толщина слоя, м;  $m$  – переводной коэффициент к мм водного слоя, равный 1000.

Расчет влагозапасов по соразмерным слоям для слоя почвы 0–100 см выглядел как суммирование влагозапасов для различных слоев. Для слоя почвы 0–50 см проводилось суммирование  $W_{ERA\ 0-7}$  и  $W_{ERA\ 7-28}$ , слой  $W_{ERA\ 28-50}$  был рассчитан на основе гипотезы о том, что распределение влаги в слое модельных данных гомогенно и в каждом сантиметре слоя почвы находится равное количество влаги. Так, слой почвы  $W_{ERA\ 28-100}$  делился на толщину всего слоя (0,72 м), затем производилось его дальнейшего умножение на толщину слоя  $W_{ERA\ 28-50}$  (0,23 м).

Для преобразования данных стационарных наблюдений к полной влаге для каждой станции были вычислены значения устойчивого завядания для каждого из слоев почвенного горизонта. Данные агрогидрологических характеристик были взяты из ТСХ-5 [6], которые предоставляют информацию в том числе и о плотности почвы  $P$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ) и  $W_{уз}$  – влажности устойчивого завядания для каждого из слоев. Характеристики в ТСХ-5

представлены по результатам измерений в разные годы в различных почвенных разрезах на полях, находящихся в некотором удалении от метеостанций. Данные представлены по слоям почвы с шагом в 10 см (0–10, 10–20, ..., 90–100 см, местами более). Значения в ТСХ-5 требовали трудозатратного перевода из неформатного текста в вид, пригодный для вычислений.

Для каждого из разрезов почвы за ряд лет были вычислены средняя плотность почвы  $\bar{P}$  (г/см<sup>3</sup>) и средняя влажность устойчивого завядания  $\bar{W}_{уз}$  [% веса абс. сухой почвы]. Средняя влажность устойчивого завядания  $\bar{W}_{уз}$  [% веса абс. сухой почвы] была преобразована к влажности устойчивого завядания в мм водного слоя  $W_{уз}$  [мм водного слоя]:

$$W_{уз} \text{ [мм водного слоя]} = \bar{W}_{уз} \text{ [% веса абс. сухой почвы]} \cdot \bar{P} \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot h_{\text{слоя}}. \quad (2)$$

Далее были суммированы значения  $W_{уз}$  [мм водного слоя] для различных слоев почвы. Результатом вычислений стала полная влажность почвы  $W_{\text{полная влага}}$  [мм водного слоя], вычисленная как сумма влажности устойчивого завядания и запасов продуктивной влаги.

Другая сложность в сопоставлении данных заключается в том, что сеточные данные и по станциям сравнивать не совсем корректно. С одной стороны, не ясно, являются данные реанализа ERA5 точечными, т. е. именно привязанными к узлу, или площадными, нужно ли их интерполировать в точку станции с учетом нескольких точек по сетке или эта процедура не требуется. С другой стороны, наблюдения на станциях осуществляются не на метеоплощадке, координаты которой известны, а на наблюдательных участках (производственных полях), которые расположены в некотором удалении от станции, причем не известно, где именно. Исходя из означенных неопределенностей, авторы не стали как-то подстраивать исходные данные, так как логичного и принятого всеми алгоритма не существует.

## 2. Результаты

Для оценки взаимосвязи были рассчитаны коэффициенты корреляции ( $R^2$ ) Пирсона с уровнем статистической значимости 5 % между модельными и станционными данными по согласованным слоям почвы 0–50 и 0–100 см (табл. 3).

Наиболее сильная корреляционная связь ( $> 0,70$ ) для всех слоев почвы была получена для станций западных районов Европейской территории России (Белогорка, Дмитровск-Орловский, Шахты, Ростоши. На ст. Ростоши коэффициент корреляции в слое почвы 0–100 см несколько ниже 0,67). Средняя теснота связи была получена на ст. Николо-Полома, Арзгир, Верхнеяркеево, Тимирязевский, причем, за исключением метеостанции Арзгир, в более мощных слоях почвы значения коэффициентов корреляции оказывались ниже (близкими к 0,50). Умеренная теснота связи была выявлена на ст. Тюмень, а отсутствие связи – на ст. Славгород.

**Таблица 3.** Значения коэффициентов корреляции ( $R^2$ ) между стационарными данными и данными реанализа по слоям почвы 0-50 см (I) и 0-100 см (II) по годам и за весь период  
**Table 3.** The values of the correlation coefficients ( $R^2$ ) between the stations data and the reanalysis data for soil layers 0-50 cm (I) and 0-100 cm (II) by year and for the entire period

Станция	Слой почвы, см	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Весь период
Белогорка	I	0,82	0,52	0,58	0,74	0,65	0,50	0,70	0,73	0,66	0,89	0,84	0,74	0,92	0,71
	II	0,96	0,68	0,76	0,77	0,84	0,55	0,86	0,65	0,66	0,84	0,92	0,80	0,92	0,71
Дмитровск-Орловский	I	0,84	0,85	0,90	0,73	0,63	0,94	0,18	0,88	0,74	0,59	0,87	0,94	0,86	0,76
	II	0,79	0,86	0,94	0,84	0,66	0,91	-0,19	0,88	0,68	0,52	0,91	0,92	0,72	0,73
Никола-Полома	I	0,52	0,84	0,83	0,24	0,45	0,75	0,68	0,55	0,80	0,67	0,85	0,86	0,54	0,66
	II	0,72	0,44	0,67	-0,22	0,22	0,82	0,52	0,54	0,91	0,14	0,24	0,02	0,65	0,44
Шахты	I	0,70	0,74	0,96	0,96	0,92	0,87	0,86	0,92	0,84	0,66	0,95	0,85	0,32	0,81
	II	0,64	0,54	0,93	0,93	0,92	0,91	0,80	0,90	0,84	0,75	0,95	0,90	0,32	0,79
Арзгир	I	0,89	0,54	0,78	-0,23	0,62	0,27	0,32	0,84	0,92	0,15	0,67	0,85	-0,10	0,50
	II	0,86	0,61	0,70	0,15	0,91	0,27	0,28	0,81	0,83	0,83	0,49	0,85	0,11	0,59
Ростоши	I	0,63	0,83	0,89	0,45	0,60	0,84	0,71	0,67	0,75	0,80	0,87	0,82	0,94	0,75
	II	0,45	0,86	0,86	0,37	0,44	0,82	0,74	0,50	0,52	0,72	0,82	0,72	0,92	0,67
Верхнеяркево	I	0,74	0,79	0,60	0,75	0,75	0,69	0,31	0,88	0,68	0,49	0,17	0,40	0,09	0,57
	II	0,85	0,77	0,65	0,72	0,49	0,74	0,18	0,85	0,59	0,61	0,07	0,27	0,15	0,53
Тюмень	I	0,59	0,86	0,70	0,67	0,34	0,71	0,21	0,41	0,25	0,40	0,32	0,10	0,79	0,49
	II	0,29	0,76	0,70	0,66	0,27	0,50	-0,06	0,25	0,01	0,24	0,24	-0,14	0,34	0,31
Славгород	I	-0,60	0,04	-0,46	0,28	0,35	-0,34	0,57	0,57	0,10	0,32	-0,13	0,02	-0,58	0,01
	II	-0,76	-0,22	-0,33	-0,01	0,31	-0,31	0,32	0,39	-0,26	-0,33	-0,30	-0,16	-0,61	-0,18
Тимирязевский	I	0,69	0,90	-0,06	0,77	0,29	0,62	0,33	0,98	-0,40	0,51	0,66	0,75	0,74	0,52
	II	0,78	0,81	-0,01	0,87	-0,10	0,52	-0,05	0,97	0,18	0,44	0,43	0,57	0,57	0,46

Стоит отметить, что в некоторые годы на данной метеостанции отмечаются высокие отрицательные коэффициенты корреляции. При более детальном рассмотрении динамики влажности почвы по слоям было установлено, что данные реанализа в большинстве случаев превышают значения почвенной влаги, недооценивая засушливые условия. Данный вывод согласуется с исследованиями иностранных коллег [14].

Анализируя результаты, приведенные в табл. 3, видно, что в слое почвы 0–50 см на всех станциях наблюдаются более высокие значения коэффициентов корреляции, чем в слое почвы 0–100 см, как за весь рассматриваемый период в целом, так и в отдельные годы.

Оценка динамики влажности почвы проводилась по вегетационным сезонам во всем десяти станциям. На рис. 2 приведены три из них, наиболее полно отображающие различия в динамике почвенной влаги – Шахты (динамика влаги на которой наиболее схожа со ст. Белогорка, Дмитровск-Орловский и Ростоши), Верхнеяркеево (аналогично данным по ст. Арзгир, Никола-Паломы и Тюмень) и ст. Тимирязевский как самая восточная точка в исследовании, имеющая некоторые различия в динамике почвенной влаги. Ст. Славгород по причине отсутствия корреляции не рассматривалась. Границы избыточного увлажнения и почвенной засухи были приняты по градациям, используемым в отделе агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России», за почвенную засуху в слоях 0–50 и 0–100 см принималось значение 25 мм и 50 мм соответственно, за границу избыточного увлажнения – 125 и 250 мм, граничные значения также были согласованы по методике, описанной выше. Для построения сезонной динамики для каждого из слоев почвы была устранена системная ошибка модели **BIAS**, стандартное отклонение **RMSE**, для сезонного хода была вычислена средняя относительная ошибка **MRE**, выраженная в процентах от запасов продуктивной влаги:

$$\mathbf{BIAS} = \overline{W_{\text{ERA}}} - \overline{W_{\text{полная влага}}}, \quad (3)$$

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{\text{ERA}} - W_{\text{полная влага}})^2}, \quad (4)$$

$$\mathbf{MRE} = \frac{\overline{W_{\text{ERA}}} - \overline{W_{\text{полная влага}}}}{\overline{W_{\text{полная влага}}}} 100\%, \quad (5)$$

где  $n$  – количество наблюдений. Значения ошибок представлены в табл. 4.

Рассматривая динамику влажности почвы на ст. Шахты (рис. 2), отмечаем, что данные реанализа хорошо улавливают динамику почвенной влаги на всех глубинах: реанализ, в целом, воспроизводит значения избыточного весеннего увлажнения, повышения влажности почвы на поле в осенний период, сезонные минимумы в летние месяцы. Средний квадрат ошибки сравнительно невысок и составляет в слоях почвы 0–50 см/0–100 см на ст. Шахты и Ростоши – 20/43, 22/45 и оказывается несколько выше на более северных территориях 39/80, 43/89 (Дмитровск-Орловский, Белогорка).

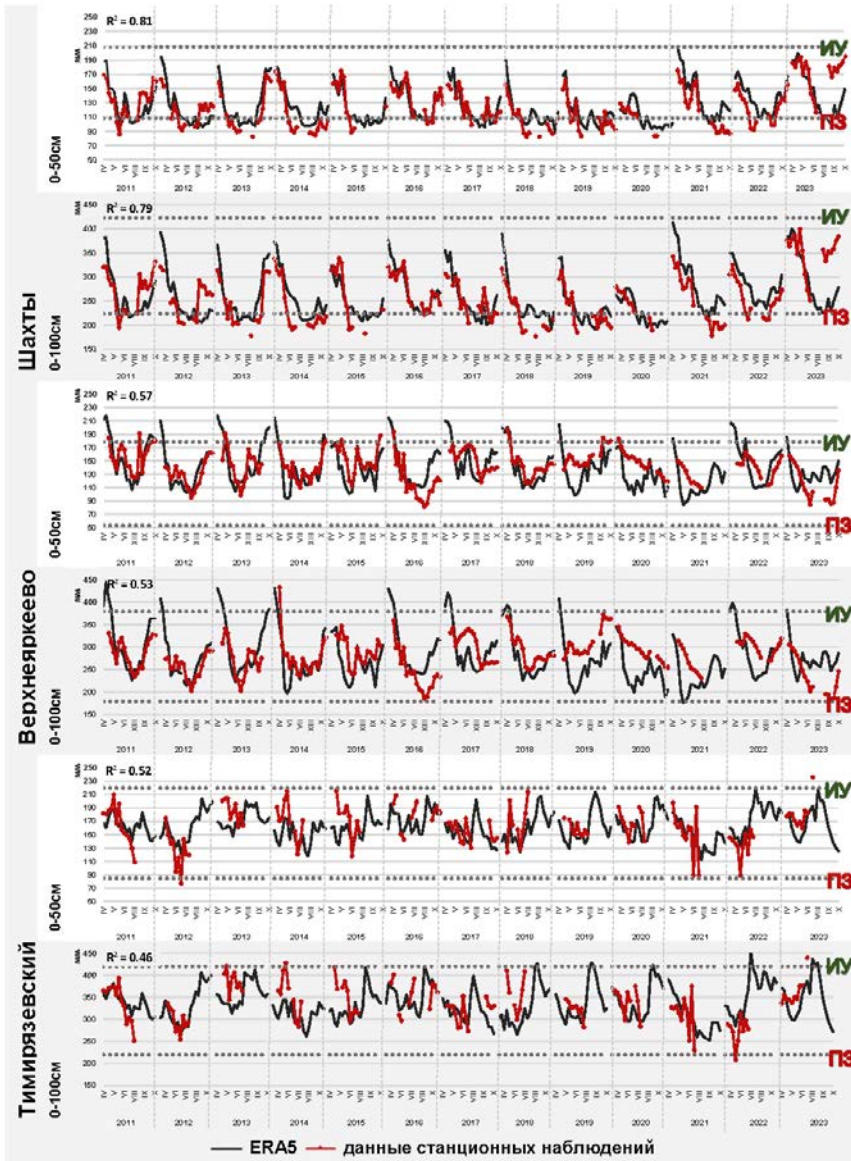
**Таблица 4.** Статистические характеристики: системные ошибки модели (BIAS), стандартное отклонение (RMSE), коэффициент корреляции ( $R^2$ ) и средняя относительная ошибка (MRE), рассчитанные за период 2011-2023 гг. для рядов влажности почвы по согласованным данным ERA5 и данным станционных наблюдений в различных слоях почвы

**Table 4.** The Statistical characteristics: the systematic error of the model (BIAS), the root mean square error (RMSE), the correlation coefficient ( $R^2$ ) and the mean squared error (MRE) calculated for the period 2011-2023 for soil moisture series based on consistent ERA5 data and station observations in various soil layers

Станции	Согласованные ряды влажности почвы				Сезонный ход		
	BIAS		RMSE		RMSE	$R^2$	MRE,%
	0-50 см	0-100 см	0-50 см	0-100 см	0-100см		
Белогорка	41,2	83,4	43	89	15	0,94	4
Дмитровск-Орловский	30,1	63,4	39	80	17	0,94	7
Николо-Полома	36,0	91,4	48	115	22	0,83	8
Шахты	-12,2	-30,5	20	43	17	0,95	5
Арзгир	9,1	24,7	30	59	23	0,78	12
Ростоши	0,9	-0,4	22	45	36	0,70	10
Верхнеяркеево	-20,1	-45,4	35	72	29	0,84	8
Тюмень	-7,9	-25,0	28	50	33	0,55	10
Славгород	43,0	75,9	43	82	15	-0,43	12
Тимирязевский	-7,9	-28,1	28	59	18	0,17	4

Анализируя динамику влажности почвы на ст. Верхнеяркеево, можно заметить, что модельные данные регулярно воспроизводят более засушливые условия по сравнению с фактическими значениями, приближая их к границам недостаточного увлажнения, в тот момент, когда по фактическим данным на полях увлажнение почвы близко к оптимальному.

Кроме того, влажность почвы по реанализу на этих станциях имеет менее плавный ход, чем у фактических данных, причем как в процессе пополнения слоев влагой, так и процессе иссушения. Таким образом, реанализ демонстрирует более резкие изменения влажности почвы, а данные наблюдений отражают достаточно плавную динамику движения влаги в почве. Значения **RMSE** составляют 35/72 на ст. Верхнеяркеево, 30/59 на ст. Арзгир, 48/115 в пункте Николо-Полома, значительно лучше они на ст. Тюмень 28/50.



**Рис. 2.** Динамика почвенной влаги по согласованным данным ERA5 и данным станционных наблюдений с учетом системной ошибки **BIAS**. Пунктирной линией указана граница избыточного увлажнения (ИУ) и почвенной засухи (ПЗ), в левом верхнем углу указано значение коэффициента корреляции для всего периода.

**Fig. 2.** The dynamics of the soil moisture according to the ERA 5 data and the station observation data, taking into account the **BIAS**. The dotted line indicates the boundary of excessive moisture (green letters) and the soil drought (red letters), the value of the correlation coefficient for the entire period is indicated in the upper left corner.

На ст. Тимирязевский модельные данные не каждый год улавливают динамику влаги в почве, оказываясь в отдельные годы выше, а в отдельные годы ниже фактических значений, в отдельные годы не совпадая с ними, что не дает возможность сделать однозначный вывод. В то время как на ЕТР мы отмечаем максимальные значения влажности почвы по реанализу в весенний период, на ст. Тимирязевский мы отмечаем осенью, что логично связано с режимом выпадения осадков в Приморском крае. Значения **RMSE** в этом пункте составляют 28/59.

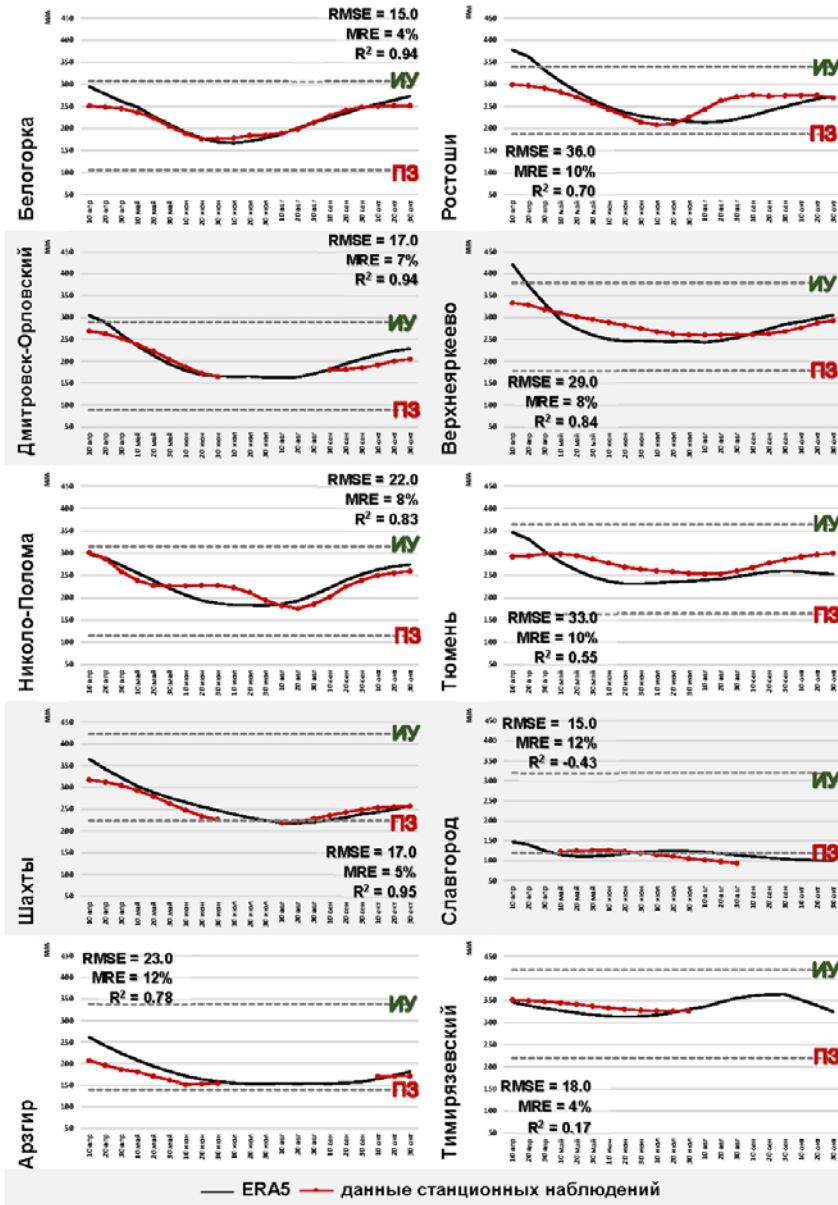
Далее для оценки возможности использования данных реанализа для агроклиматических задач нами был рассчитан сезонный ход влажности почвы. Как было показано выше, данные реанализа и фактически измеренные влагозапасы хорошо согласуются, однако важно проследить, что воспроизведение максимумов и минимумов происходит в одни и те же сроки, а также оценить абсолютную величину сезонного хода. Сезонный ход рассчитывался по декадам путем осреднения по месяцам, а затем методом интерполяции полиномом 2-го порядка по трем точкам рассчитывались декадные значения. Сезонный ход рассчитывался для слоя почвы 0–100 см (рис. 3).

Наиболее тесная связь сезонного хода по данным наблюдений и реанализа была получена для западных станций ЕТР: Белогорка, Дмитровск-Орловский и Шахты. Коэффициенты корреляции составляют более 0,94, а значения **RMSE** менее 17 мм.

Реанализ несколько завышает значения влажности почвы в весенний период – от 40 мм в первую декаду апреля до 10 мм в третью декаду. Регулярное завышение значений влажности почвы в весенний период по сравнению со стационарными данными может быть связано с ранним началом таяния снега в гидрологической модели H-TESSSEL и избыточным стоком в более глубокие слои почвы [8]. Значения **MRE** на этих станциях самые низкие из представленных в исследовании: Белогорка – 4 %, Дмитровск-Орловский – 7 % и Шахты – 5 %.

Высокие коэффициенты корреляции между среднедекадными значениями по реанализу и данным станций были получены для центральной части ЕТР – на ст. Николо-Полома и Верхнеяркеево (более 0,80) величина **RMSE** составляют 22 и 29 мм соответственно, **MRE** несколько выше, чем в западных районах и составляют 8 % на обеих станциях.

Отметим, что на этих станциях, как и на ст. Тюмень, получаются низкие значения  $R^2$  (0,55) и более высокие среднеквадратическая (33 мм) и средняя относительная (10 %) ошибки. Реанализ с мая по июль в большей степени показывает более засушливые условия, разность между фактическими значениями и реанализом по ст. Николо-Полома и Верхнеяркеево в июне достигает 40 мм.



**Рис. 3.** Сезонный ход по согласованным данным ERA5 и данным станционных наблюдений с учетом системной ошибки BIAS. Пунктирной линией указана граница избыточного увлажнения (ИУ) и почвенной засухи (ПЗ), на графике указано значения RMSE и R<sup>2</sup>.

**Fig. 3** The seasonal movement according to the agreed ERA5 data and the station observation data, taking into account the BIAS. The dotted line indicates the boundary of excessive moisture (green letters) and soil drought (red letters), the graph shows the values of RMSE and R<sup>2</sup>.

Общие черты в воспроизведении сезонного хода отмечаются на ст. Арзгир и Ростоши, расположенных приблизительно на одной долготе. В этих пунктах получена тесная корреляционная связь сезонных ходов (более 0,70), невысокая среднеквадратическая ошибка на ст. Арзгир (23 мм) и несколько более высокая на ст. Ростоши (36 мм), а также достаточно высокое значение **MRE** (12 %, 10 %) в обоих случаях. Во второй половине вегетационного сезона по этим пунктам кривые также имеют различный вид: на ст. Ростоши в августе, а на станции Арзгир в апреле разность составляет от 45 до 60 мм.

На станциях, расположенных в азиатской части страны (Славгород и Тимирязевский), корреляционная связь сезонных ходов низкая, однако в целом сезонный ход воспроизводится. Стоит отметить, что значение средней относительной ошибки на ст. Тимирязевский достаточно низкое и составляет 4 %.

Таким образом, можно заключить, что на выбранных станциях реанализ улавливает особенности сезонного хода влажности почвы и может быть использован для агроклиматических задач, хотя в ранневесенний и позднеосенний периоды отклонения могут быть значительны.

В целом, модельные данные ERA5 наиболее хорошо воспроизводят динамику влаги в различных почвенных горизонтах в западных и в юго-западных черноземных районах ЕТР. Это подтверждается анализом данных на ст. Белогорка, Шахты, а также на близкой к ним ст. Дмитровск-Орловский. Хорошие результаты в этих пунктах, возможно, связаны с параметризацией почвенно-гидрологической модели, которая наиболее хорошо «заточена» под структуру чернозема. Стоит отметить, что в почвенно-гидрологической модели H-TESSSEL оценки значений точки устойчивого завядания и полевой влагоемкости велись на основе данных о физических свойствах почвы по территории юго-запада России (современная Украина и южные районы ЕТР) [8]. Хотя ст. Белогорка также находится на западе ЕТР, динамика почвенной влаги здесь несколько хуже, что в данном случае можно также связать с небольшой долей низкой растительности в ячейке реанализа (см. табл. 2), от которой в модели зависит величина перехваченной влаги и эвапотранспирации, а также с дерново-подзолистым типом почвы. Реанализ на этих станциях также хорошо воспроизводит сезонный ход, что представляет интерес для дальнейшего исследования модельных данных в западных и черноземных районах.

### Выводы

В работе впервые проведено сопоставление данных ERA5 по объемной влажности почвы и данных по запасам продуктивной влаги, измеренных на станциях наблюдательной сети Росгидромета, проведено согласование этих рядов в мм водного слоя полной влаги с учетом системной ошибки. Произведенный статистический анализ данных важности почвы в глубоких горизонтах почвы за вегетационные периоды 2011–2023 гг.

показал, что в целом данные реанализа и наблюдений, как в слое почвы 0–50 см, так и в 0–100 см, хорошо согласуются. Оценен сезонный ход по модельным и станционным данным. Наиболее тесная корреляционная связь сезонного хода отмечалась на ст. Белогорка, Дмитровск-Орловский, Шахты (более  $>0,90$ ). В этих пунктах наблюдается также и наибольшая согласованность данных в сезонном ходе в регионах Российской Федерации, а значения среднеквадратической ошибки **RMSE** оказались наименьшими.

Таким образом, показано, что наборы данных ERA5 могут быть использованы в задачах агрометеорологического и агроклиматического мониторинга и прогноза.

### Список литературы

1. Кислов А.В., Варенцов М.И., Тарасова Л.Л. Роль весенней влажности почвы в формировании крупномасштабных засух Восточно-Европейской равнины 2002 и 2010 гг. // Известия РАН. ФАО. Том 51, № 4. С. 464-471.
2. Куликова И.А., Вильфанд Р.М., Хан В.М., Круглова Е.Н., Тищенко В.А., Емелина С.В., Каверина Е.С., Набокова Е.В., Субботин А. В., Сумерова К. А., Толстых М. А. Климатические прогнозы. Часть I. Современное состояние и перспективы развития // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 5-24.
3. Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидации последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)». Том 3 / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: Изд-во МБА, 2021. 700 с.
4. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. 396 с.
5. РД 52.33.217-99. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Часть 1. Основные агрометеорологические наблюдения. Книга 1. 348 с.
6. РД 52.33.219–2022. Нормативы по определению агрогидрологических свойств почвы. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2023. 126 с.
7. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Том II. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 286 с.
8. Balsamo G., Viterbo P., Beljaars A., Van Den Hurk B., Hirschi M., Betts A. K., Scipal K. A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System // Journal of Hydrometeorology. 2009. Vol. 139. P. 623-643.
9. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5?tab=overview> (дата обращения: 22.02.2024).
10. FAO Digital Soil Map of the World (DSMW). URL: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/> (дата обращения: 18.06.2024).
11. FAO Harmonized World Soil Database v2.0. URL: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/> (дата обращения: 14.05.2024).
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. et al. // Q J R Meteorol Soc. 2020. Vol. 146. C. 1999-2049.
13. Yadav B.K., Mathur S., Siebel M.A. Soil moisture flow modeling with water uptake by plants (wheat) under varying soil and moisture conditions // J. Irrig. Drain. Eng. (ASCE). 2009. Vol. 135. P. 375-381.

14. Zheng Y., Coxon G., Woods R., Power D., Rico-Ramirez M. A., McJannet D., Rosolem R., Li J., Feng P. Evaluation of reanalysis soil moisture products using Cosmic Ray Neutron Sensor observations across the globe // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 224. P. 1-27.

### References

1. Kislov A.V., Tarasova L.L., Varentsov M.I. Role of spring soil moisture in the formation of large-scale droughts in the east European plain in 2002 and 2010. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 405-411.

2. Kulikova I.A., Vil'fand R.M., Han V.M., Kruglova E.N., Tishchenko V.A., Emelina S.V., Kaverina E.S., Nabokova E.V., Subbotin A. V., Sumerova K. A., Tolstyh M. A. Climate Forecasts. Part I: Current Status and Development Prospects. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, vol. 49, no. 7, pp. 563-575. DOI: 10.3103/S106837392407001X.

3. Nacional'nyj doklad «Global'nyj klimat i pochvennyj pokrov Rossii: proyavleniya zasuhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidacii posledstvij i adaptacionnye meropriyatiya (sel'skoe i lesnoe hozjajstvo)» (pod red. R.S.-H. Edel'gerieva). Tom 3. Moscow: Izdatel'stvo MBA publ., 2021, 700 p. [in Russ.].

4. Poluektov R.A., Smolyar E.I., Terleev V.V., Topazh A.G. Modelirovanie produkcionnogo processa sel'skohozyajstvennyh kul'tur. Saint-Petersburg, Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2006, 396 p. [in Russ.].

5. RD 52.33.217-99 Nastavleniya gidrometeorologicheskim stanciyam i postam. Vyp. 11 Agrometeorologicheskie nablyudeniya na stanciyah i postah. Chast' 1. Osnovnye agrometeorologicheskie nablyudeniya, kn. 1. Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2000, 348 p. [in Russ.].

6. RD 52.33.219-2022 Rukovodstvo po opredeleniyu agrogidrologicheskikh svoystv pochvy. Obninsk, FGBU «VNIIGMI-MCD», 2023, 126 p. [in Russ.].

7. Rode A.A. Osnovy ucheniya o pochvennoj vlage. T. II. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1969, 286 p. [in Russ.].

8. Balsamo G., Viterbo P., Beljaars A., Van Den Hurk B., Hirschi M., Betts A. K., Scipal K. A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, vol. 139, pp. 623-643.

9. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5?tab=overview>, last access 22.02.2024.

10. FAO Digital Soil Map of the World (DSMW). Available at: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/>, last access 18.06.2024.

11. FAO Harmonized World Soil Database v2.0. Available at: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>, last access 14.05.2024.

12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. et al. *Q J R Meteorol Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049.

13. Yadav B.K., Mathur S., Siebel M.A. Soil moisture flow modeling with water uptake by plants (wheat) under varying soil and moisture conditions. *J. Irrig. Drain. Eng. (ASCE)*, 2009, vol. 135, pp. 375-381.

14. Zheng Y., Coxon G., Woods R., Power D., Rico-Ramirez M. A., McJannet D., Rosolem R., Li J., Feng P. Evaluation of reanalysis soil moisture products using Cosmic Ray Neutron Sensor observations across the globe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, vol. 224, pp. 1-27.

Поступила 05.11.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024;  
принята в печать 10.12.2024.

Submitted 05.11.2024; approved after reviewing 02.12.2024;  
accepted for publication 10.12.2024.