

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-153-171>

УДК 551.579.5(470.1/.6)

Особенности пространственно-временной изменчивости влагозапасов в почве на Европейской территории России

П.С. Кланг¹, Л.Л. Тарасова¹, А.В. Черкасова²

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва, Россия;

*²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия
agro-hmc@mecon.ru*

На длинных рядах (за период 1958–2024 гг.) проведено исследование статистической структуры поля запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под зерновыми культурами для Европейской территории России, оценено влияние наблюдаемых изменений климата на режим влажности почвы. Показано, что в XXI веке увлажнение почвы выше, чем в период 1958–1999 гг., и наблюдаемые в настоящее время климатические изменения носят в основном положительный характер для сельскохозяйственной отрасли России. Построены кривые сезонного хода запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы по современным данным, что может быть применимо в оперативной агрометеорологической практике. Проанализированы основные причины изменений – увеличение повторяемости теплых зим и цикличность климатической системы.

Ключевые слова: влажность почвы, климат, сезонный ход, вероятностные характеристики, корреляционная функция

Peculiarities of spatiotemporal variability of soil moisture in the European part of Russia

P.S. Klang¹, L.L. Tarasova¹, A.V. Cherkasova²

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²Russian State Hydrometeorological University, St.Petersburg, Russia
agro-hmc@mecon.ru*

Based on the long series of data (for 1958–2024), a statistical structure of the field of available moisture content in the meter layer of soil under grain crops for the European part of Russia was estimated, and an impact of observed climate change on the soil moisture regime was assessed. It is shown that in the 21st century, soil moisture content is higher than in 1958–1999, and currently observed climate changes are mainly positive for the agricultural industry in Russia. Seasonal variations in the available moisture content were built according to modern data, which can be applied in operational agrometeorological practice. The main reasons for the changes were analyzed: an increase in the frequency of warm winters and the cyclical nature of the climate system.

Keywords: soil moisture, climate, seasonal variations, probabilistic characteristics, correlation function

Введение

Вопросы, связанные с изучением пространственно-временной структуры поля влажности почвы, чрезвычайно актуальны в наше время. С одной стороны, увлажнение почвы интересно как ресурс возможной продуктивности, а следовательно, и эффективности сельского хозяйства. С другой стороны, изучение структуры поля влагозапасов важно для качественного воспроизведения баланса влаги в численных моделях погоды и климата.

В настоящей работе представлены результаты исследований по изучению статистической структуры поля влагозапасов и их районирования, а также наблюдаемых изменений режима влажности почвы, связанных с изменениями климата. Исследования проводилось для Европейской территории России, так как этот регион довольно хорошо охвачен наблюдениями.

Необходимо отметить, что сложность данной задачи для большинства исследователей связана с доступностью натурных данных, по этой причине работ по данной теме немного. Наиболее подробное исследование по агроклиматологии влажности почвы для различных физико-географических областей с типизацией по водному режиму было проведено Л.С. Кельчевской [5]. Для европейской части Союза ССР оценки пространственно-временной структуры поля запасов продуктивной влаги были выполнены А.В. Мещерской, Н.А. Болдыревой, Н.Д. Шапаевой [8], эта работа базировалась на данных наблюдений сети станций Госкомгидромета за период 1950–1977 гг. В справочнике под редакцией Л.С. Кельчевской [13] приведены основные характеристики поля запасов продуктивной влаги, рассчитанные на основе рядов 1942–1972 гг., а в аналогичном справочнике под редакцией В.А. Жукова [12] – за период 1946–1980 годов.

В настоящее время некоторые исследования, например [15], основываются на наборах данных реанализов, которые, с одной стороны, не имеют недостатков натурных данных (пропуски в рядах, ошибки и т. д.), а с другой – воспроизводят лишь общие закономерности поля и требуют дополнительной обработки с учетом системной ошибки [6]. Другие авторы, например С.А. Лавров, опираются на данные отдельных пунктов [7].

Таким образом, вопросы статистической структуры поля влажности почвы детально и теоретически обоснованно представлены на данных до 1980 г., в период современного климата они пока недостаточно изучены, и агрометеорологи Гидрометцентра России имеют преимущество, так как располагают данными наблюдений в полном объеме.

Материалы и методы исследования

В сельскохозяйственных районах Европейской территории России (ЕТР) корреспондентами Гидрометцентра России являются около 500 станций, на которых в том числе ведутся и наблюдения за влажностью почвы в верхнем (0–10 см), пахотном (0–20 см), полуметровом и метровом слоях почвы под различными сельскохозяйственными культурами [11]. На каждой

станции запасы продуктивной влаги определяются не менее, чем по трем ведущим в данном районе сельскохозяйственным культурам, таким образом ежедекадно в период активной вегетации в Гидрометцентр России поступают данные почти с 4000 участков. Такой объем информации позволяет оценивать макромасштабные аномалии водного режима почвы и степень благоприятности условий влагообеспеченности посевов как в пространственном, так и во временном аспекте.

Основой для работы были архивы средних по областям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под ранними яровыми и озимыми зерновыми культурами за период 1958–2024 гг. В ходе дальнейшего изложения указание на метровый слой почвы для краткости будет опущено.

Исторический архив данных отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра России был сформирован в виде осредненных по области значений с 1 декады апреля по 3 декаду сентября за период с 1958 по 1999 год. В декады, когда наблюдения не проводились (до начала сева и после достижения восковой спелости зерновых культур), в архиве были пропуски. За период с 2000 по 2024 г. архив средних по области запасов продуктивной влаги рассчитывался авторами на основе декадных телеграмм в коде КН-21.

В [8] было статистически обосновано осреднение влагозапасов для оценки крупномасштабных особенностей поля на основе параметров корреляционной функции.

Построение пространственно-корреляционной функции [2, 4] влагозапасов в метровом слое почвы велось на основе данных наблюдательной сети Росгидромета. Нами были отобраны станции, имеющие наиболее продолжительные ряды агрометеорологических наблюдений в черноземной зоне Российской Федерации. В работе отбирались данные за июнь и июль, производилась их «очистка» методом 3σ , ошибки в наблюдениях были отбракованы и в дальнейших расчетах не использовались. Всего в отобранном массиве были данные с 266 станций (рис. 1а), количество наблюдений на которых за весь рассматриваемый период превышало 60 (максимальное количество наблюдений 126). Стоит отметить, что подобный расчет функции для столь обширной территории и на столь качественных материалах для исследования в новейшее время делается впервые.

По результатам расчетов (рис. 1б), параметр $r(0)$ – значение корреляционной функции при нулевом расстоянии, определяемое путем экстраполяции в нуль значений эмпирической корреляционной функции, – составляет 0,5, что согласуется с более ранними исследованиями. Невысокие значения $r(0)$, т. е. высокая пространственная неоднородность поля влагозапасов, связаны с существенными на близких расстояниях различиями механического состава почв, т. е. с их влагоудерживающей способностью, зависимостью увлажнения от рельефа и агротехнических мероприятий (различные типы орудий для обработки почвы в разной мере изменяют порозность почвы и, следовательно, ее полевую влагоемкость) [5, 12, 13].

В [8] расчеты проводились по 54 станциям юга европейской части СССР, включая Украину и Белоруссию, за период 1950–1970-х гг., $r(0)$ для метрового слоя почвы получился 0,4–0,6. В [14] на основе расчетов за период 1995–2006 гг. по 70 станциям, расположенным в центрально-черноземных областях и в Среднем Поволжье, $r(0) = 0,69$. Иными словами, связность поля в различные периоды остается практически неизменной, т. е. на относительно коротких временных периодах (меньших, чем время формирования типического почвенного профиля) в основе лежит не столько режим увлажнения (количество осадков, снежный покров, испарение), сколько физические свойства самой почвы.

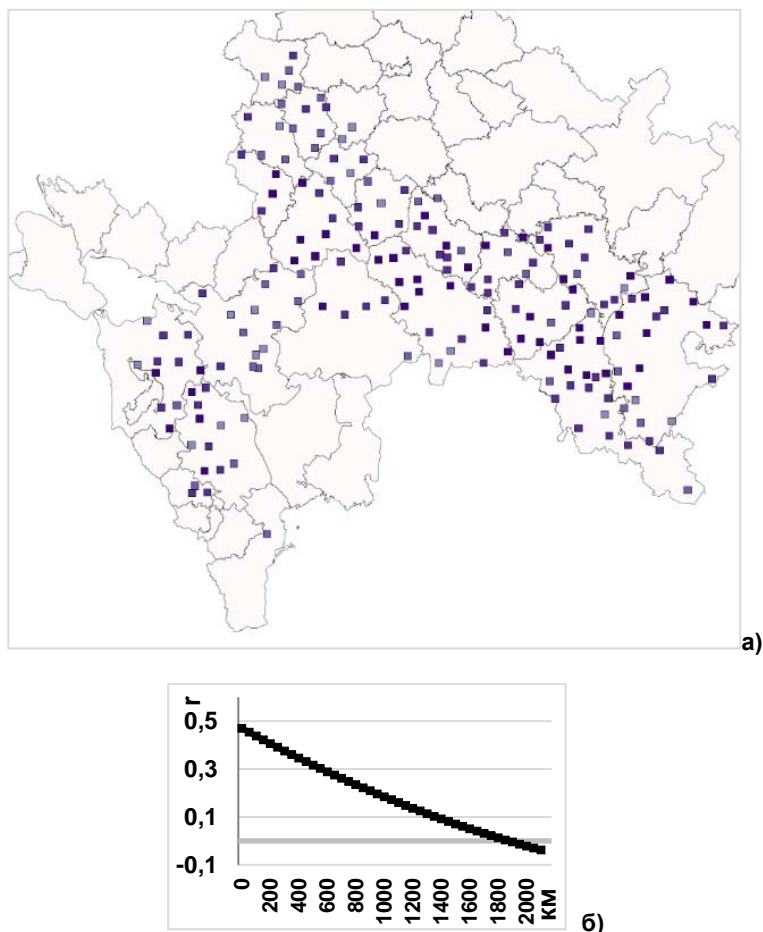


Рис. 1. Наблюдательная сеть станций Росгидромета в черноземной зоне (а) и пространственно-корреляционная функция (б) запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–100 см.

Fig. 1. Observation network of Roshydromet stations in the Chernozem area (а) and spatial correlation function (б) of available soil moisture content in the layer 0–100 cm.

Анализ временных рядов влагозапасов в метровом слое почвы

Для изучения временной изменчивости рядов полученный архив длиной 67 лет был поделен на 3 подпериода: 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 гг. (табл. 1). Границы периодов были выделены условно по двадцатилетиям. Основой для такой разбивки массива была попытка показать динамику изменений влагозапасов со временем. Деление массива на до и после какого-то граничного, например 1990 г., в целом показывает аналогичное распределение параметров. Разбиение на более мелкие отрезки, например по 15 лет, увеличит долю пропусков в данных, что снизит качество анализа.

Таблица 1. Описательная статистика средних по области запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы по периодам 1958–1980 (I), 1981–1999 (II), 2000–2024 гг. (III)

Table 1. Descriptive statistics of average regional content of available moisture in the meter-thick soil layer for the periods 1958–1980 (I), 1981–1999 (II), 2000–2024 (III)

Территория	Период	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Экцесс	Асимметрия	Минимум	Максимум
Белгородская обл.	I	115	120	43	-0,7	-0,1	24	206
	II	132	138	43	-1,1	-0,2	51	211
	III	161	163	43	0,2	-0,2	48	267
Воронежская обл.	I	93	96	42	-1,0	-0,1	18	169
	II	118	125	38	-0,8	-0,2	33	202
	III	133	137	37	-0,3	-0,4	27	198
Курская обл.	I	122	129	47	-0,8	-0,4	17	216
	II	156	161	41	-1,1	-0,1	74	237
	III	179	183	39	-0,2	-0,5	66	258
Липецкая обл.	I	119	125	44	-0,5	-0,1	25	222
	II	131	131	40	-0,3	0,4	63	247
	III	138	139	38	0,0	0,3	55	246
Орловская обл.	I	160	163	45	-0,2	-0,3	35	252
	II	172	175	39	-0,5	-0,3	69	244
	III	178	179	42	0,0	-0,1	60	282
Тамбовская обл.	I	121	127	46	-0,8	-0,2	30	214
	II	137	135	52	-0,2	0,3	41	296
	III	155	155	41	-0,7	0,0	58	245
Пензенская обл.	I	119	122	47	-0,8	-0,1	17	215
	II	128	124	40	-0,5	0,2	50	232
	III	151	153	36	1,4	0,1	48	275
Ульяновская обл.	I	100	96	43	-0,1	0,2	17	238
	II	128	135	41	-0,8	-0,2	39	211
	III	130	129	46	0,6	0,2	6	286

Территория	Период	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Экссесс	Асимметрия	Минимум	Максимум
Самарская обл.	I	94	88	39	-0,3	0,3	20	218
	II	105	104	41	-0,7	0,2	25	213
	III	121	125	35	-0,7	-0,4	35	185
Саратовская обл.	I	78	69	41	-1,1	0,3	9	160
	II	97	107	43	-0,8	0,1	21	197
	III	111	112	34	0,1	-0,2	2	192
Оренбургская обл.	I	87	88	38	-0,9	0,1	18	172
	II	93	93	36	-1,1	0,0	24	166
	III	117	114	32	-0,6	0,2	60	199
Республика Башкортостан	I	121	122	43	0,0	0,2	24	258
	II	113	112	34	-0,4	0,2	48	205
	III	135	135	36	1,1	0,3	41	275
Ростовская обл.	I	75	76	39	-1,0	0,0	7	152
	II	89	86	37	-1,1	-0,1	20	161
	III	86	80	36	-1,0	0,1	13	156
Волгоградская обл.	I	79	79	42	-1,1	0,2	4	159
	II	81	80	35	-0,8	0,0	6	156
	III	84	87	31	-0,9	-0,1	19	143
Астраханская обл.	I	55	42	48	6,8	2,4	2	247
	II	69	60	43	-0,3	0,7	3	169
	III	108	108	67	1,9	1,3	25	289
Республика Калмыкия	I	80	77	41	0,1	0,5	3	190
	II	87	90	49	0,3	0,5	26	164
	III	59	57	43	0,5	0,7	0	169
Краснодарский край	I	109	116	48	-1,0	-0,2	13	193
	II	131	132	36	0,3	0,3	70	216
	III	114	117	39	-0,3	-0,4	13	180
Ставропольский край	I	66	68	37	0,2	0,6	9	169
	II	91	90	31	-0,2	0,0	17	161
	III	78	82	34	-0,9	-0,2	5	145

Вероятностные характеристики

Осреднение влагозапасов по области и месяцу существенно их сглаживает, однако позволяет выявить значимые особенности поля, в первую очередь по времени, т. е. позволяет судить о наблюдаемых климатических изменениях.

Из табл. 1 видно, что в большинстве регионов средние и медианные значения влагозапасов увеличились, причем этот рост значителен и составляет от 10 до 35 % от среднего за весь период. Изменчивость внутри периодов также изменилась в большую сторону, но не столь значительно.

Асимметрия и эксцесс, рассчитанные по периодам, как видно из табл. 1, довольно изменчивы. Вероятно, это связано с относительно короткими двадцатилетними периодами. Если рассматривать весь период 1958–2024 гг., то в большинстве областей эксцесс близок к нулю (распределение близко к нормальному), в Самарской, Саратовской, Ростовской и Волгоградской областях он отрицательный (распределение имеет гладкий пик), а в Астраханской области – положительный (острый пик). Асимметрия также практически повсеместно близка к нулю, лишь в Астраханской области она равна 1,7, т. е. «длинный хвост» распределения находится в области повышенных значений влагозапасов, большая часть данных сконцентрирована слева от средних (вероятно, этот факт объясняется орошением, а авторы рядов влагозапасов за 1958–1999 гг. не имели возможности учитывать агрофон).

Изменения экстремальных значений пояснить довольно сложно, между подпериодами они в ряде областей растут, а в ряде – понижаются. Возможно, это связано с числом станций-корреспондентов в разные периоды. За XXI век у нас имеется информация по большему числу станций, чем в XX веке, так как технологический прогресс в области телекоммуникаций позволил передавать большие объемы информации, и число станций-корреспондентов Гидрометцентра России увеличилось.

С точки зрения агрометеорологической оценки ресурсов почвенной влаги существенно значимо не столько само количество продуктивной влаги, сколько его соответствие доступности влаги для растений, т. е. условиям влагопотребления в различные периоды онтогенеза.

Нами были рассчитаны частоты по 7 градациям: суровая засуха (0–50 мм продуктивной влаги в метровом слое почвы), недостаточно (51–90 мм), удовлетворительно (91–120 мм), оптимум и ниже (121–140 мм), оптимум (141–160 мм), оптимум и выше (161–200 мм), переувлажнено (более 200 мм) за разные месяцы вегетационного периода по трем временным периодам 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 годов.

Данное исследование было проведено для каждой из областей, в настоящей статье для краткости приведем рисунки для четырех физико-географических областей (центрально-черноземные области, Среднее Поволжье, юг Урала, и южный регион (Южный федеральный округ и Ставропольский край)) (табл. 2). Деление на физико-агроклиматические регионы было выполнено в рамках НИР № НИОКР АААА-А20-120021490067-0.

На рис. 2 представлено распределение влагозапасов по градациям в апреле. В большинстве районов Черноземья весной увлажнение почвы во втором временном периоде повысилось по отношению к первому и в третьем по отношению ко второму, частота попадания в градации ниже 100 мм («суровая засуха» и «недостаточно», что не обеспечивает получение урожая зерновых колосовых культур) понизилась.

Несколько хуже ситуация на юге страны – в Южном федеральном округе и Ставропольском крае. Как видно из рис. 2, частота весенних засух

возросла с 3 % в периоды 1958–1980 и 1981–1999 гг., до 7 % в XXI веке. Однако по сумме двух неблагоприятных градаций («суровая засуха» и «недостаточно») ситуация улучшилась. Так, в период 1958–1980 гг. наиболее часто увлажнение почвы весной было недостаточным и пониженным (54 %), в период 1981–1999 и 2000–2024 гг. оно было удовлетворительным и несколько ниже оптимума (около 60 %), причем в последнем подпериоде оно было оптимальным и несколько ниже уже в 34 % лет.

Таблица 2. Регионы черноземной зоны ЕТР, объединенные по режиму влажности почвы

Table 2. Regions of the Chernozem Zone of the European part of Russia, grouped by soil moisture regime

Регион	Территория
Центрально-черноземные области	Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская, Тамбовская области
Средняя Волга	Пензенская, Самарская, Саратовская, Ульяновская области
Юг Урала	Оренбургская область, Республика Башкортостан
Юг ЕТР	Астраханская, Волгоградская, Ростовская области, Республика Калмыкия, Краснодарский край, Ставропольский край

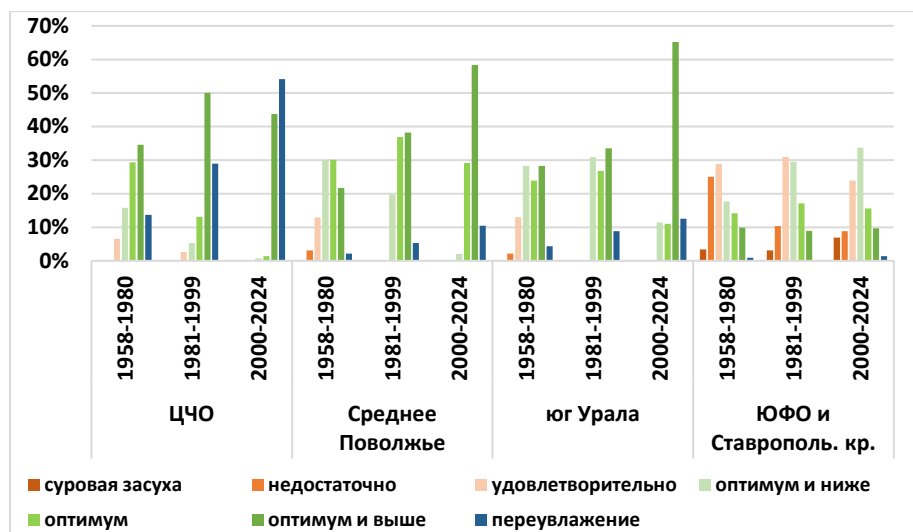


Рис. 2. Распределение по градациям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в апреле.

Fig. 2. Distribution by gradations of the available soil moisture content in the layer 0-100 cm in April.

Аналогичная ситуация в южном регионе наблюдается и в мае: число лет с недостаточным увлажнением падает (60, 34 и 35 % соответственно), а число лет с оптимальным увлажнением увеличивается (12, 20 и 25 %).

С началом календарного лета влагозапасы везде понижаются: посевы активно растут, затраты влаги на транспирацию и рост тканей начинают превышать поступление влаги с осадками. Вместе с тем тенденция к увеличению влагообеспеченности растений выражена довольно четко (рис. 3). В центрально-черноземных областях, Среднем Поволжье и на Южном Урале число лет с оптимальным увлажнением почвы возросло на 45–50 %, в южном регионе ситуация несколько хуже, здесь рост составил всего 10 %.

Особенно важно, что на юге страны в XXI веке сократилась частота суровых почвенных засух с 72 до 20 %. Однако нельзя утверждать, что эта тенденция сохранится, суровая засуха 2024 г., перешедшая в засуху 2025 г., существенно повлияла на продуктивность посевов в этом регионе [1].

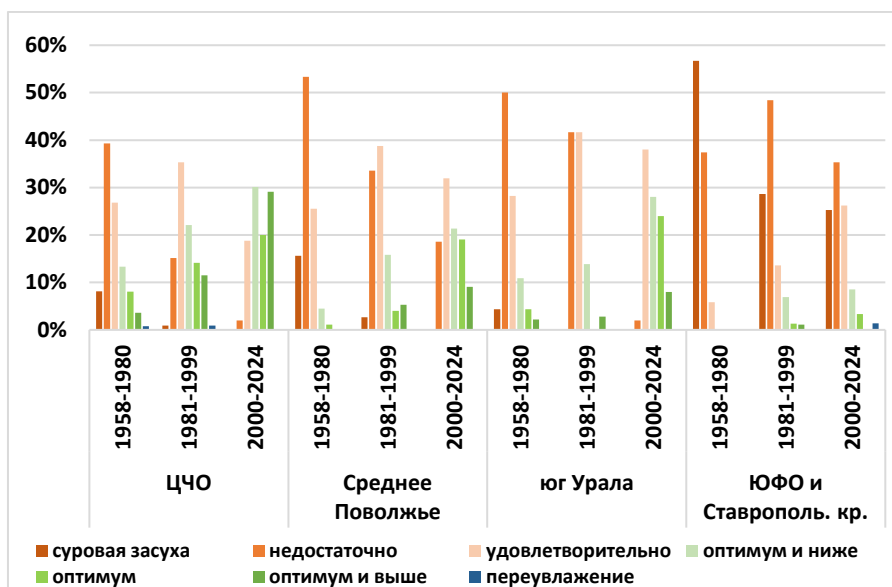


Рис. 3. Распределение по градациям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в июне.

Fig. 3. Distribution by gradations of the available soil moisture content in the layer 0-100 cm in June.

В июле и августе влагозапасы заметно понижаются и практически на всей территории варьируют от «удовлетворительно» до «суровой засухи» (за исключением центрально-черноземных областей). Однако число лет с плохими и недостаточными влагозапасами снизилось на 25–30 %, лишь на юге страны оно осталось неизменным. Вместе с тем в этот период озимые зерновые и зернобобовые культуры уже созревают и ведется их уборка, поэтому дефицит влаги не сказывается на их продуктивности.

В сентябре влажность почвы увеличивается за счет осадков. В этот период отбор проб для определения запасов продуктивной влаги проводят на полях с озимыми культурами или предназначенных под их посев. Озимые выращивают в основном по паровым предшественникам, т. е. по технологии, увеличивающей количество влаги в почве. Сев озимых в большинстве регионов приходится на конец августа-сентябрь, поэтому увлажнение почвы в этот период важно для качественного производства посевных работ и появления дружных всходов.

В центрально-черноземных областях в сентябре в отдельные годы возможно переувлажнение почвы, частота таких событий невелика, но если за период с 1958 по 1999 г. было всего два таких года, то в 2000–2024 гг. их было уже три, что малоблагоприятно, так как высокая влажность почвы существенно сдерживает ход полевых работ.

Заметно понизилось число лет с суровой засухой в сентябре в южном регионе. Если в период 1958–1980 гг. почвенная засуха наблюдалась в 65 % лет, то в период 2000–2024 гг. в большинстве лет (63 %) увлажнение почвы было недостаточным, а в каждом пятом году даже удовлетворительным. В сентябре в южном регионе сев озимых, как правило, еще только начинается, массовый сев производят в октябре, однако тенденция к уменьшению засушливости территории в сентябре в целом положительно влияет на условия для проведения полевых работ.

Сезонный ход влагозапасов

В ходе работы был оценен сезонный ход влагозапасов за период апрель – сентябрь для каждого физико-агроклиматического региона (табл. 2). Средние за декаду значения влажности почвы рассчитывались методом квадратичных сплайнов средних за месяц значений. Такой метод позволяет получить сглаженный сезонный ход влагозапасов, нивелируя отдельные выбросы значений, связанные с экстремальными событиями.

Сезонный ход влагозапасов уточняет ранее приведенные расчетные данные по средним значениям и повторяемости по грациям. На рис. 4 видно, что в настоящее время влагообеспеченность посевов растет во все декады вегетационного периода. Изменения неодинаковы по времени, в одних регионах наиболее значителен «скачок» влагозапасов от 60–80-х годов прошлого столетия к его последнему двадцатилетию, в других наибольшие изменения происходят уже в нынешнем столетии. Однако, учитывая, что годы начала и конца подпериодов были выбраны довольно условно и не имеют под собой значимых оснований, важна именно тенденция на увеличение.

По всем регионам сезонный ход влагозапасов за период 1958–1980 гг. хорошо согласуется с данными [5, 8, 13]. Косвенным образом это подтверждает качество наших данных.

Закономерно предположить, что повышение влагообеспеченности посевов приведет к росту урожайности. Для проверки этого утверждения

нами были рассчитаны коэффициенты корреляции средних за период апрель–июль аномалий влагозапасов в метровом слое почвы и отклонений урожайности зерновых и зернобобовых культур. В большинстве регионов коэффициент корреляции составил 0,5–0,6, что свидетельствует о значительном, но не решающем вкладе влагозапасов в рост сельскохозяйственного производства. На юге России корреляция слабее (0,4), то есть значительный рост урожайности в этом регионе (с 10–15 ц/га в 60–70-е годы прошлого века до 35–40 ц/га в последнее десятилетие) обусловлен прежде всего агротехнологическими и экономическими причинами.

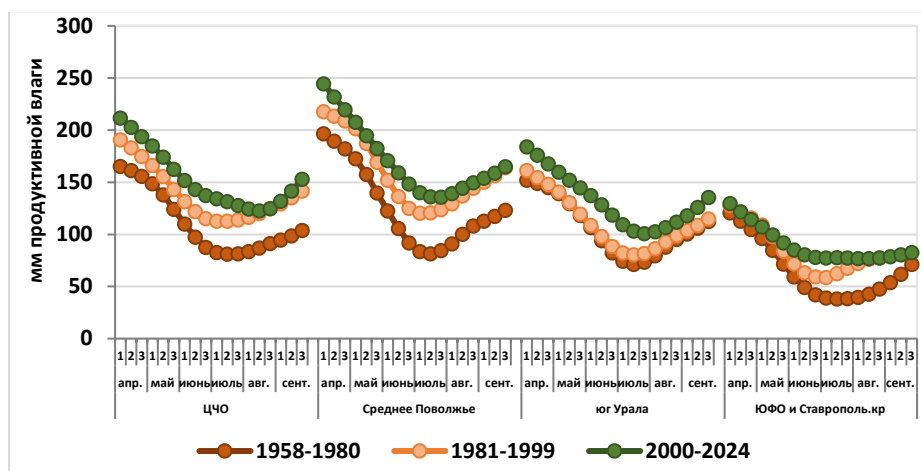


Рис. 4. Сезонный ход запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы.
Fig. 4. The seasonal variation of the available soil moisture content in the layer 0-100 cm.

Функции распределения

Повышение увлажнения почвы демонстрируют и кривые распределения Пуассона (весовые), построенные для разных областей/краев и месяцев.

На рис. 5 для примера представлены кривые распределения влагозапасов в метровом слое почвы в Ставропольском крае за апрель и июнь. На рис. 5а видно, что весной со временем форма кривых практически не меняется, а происходит плавное смещение в область больших значений.

Иная ситуация летом (рис. 5б). В первом подпериоде высота и острота кривой выше, чем во втором и третьем, причем кривые этих подпериодов практически идентичны.

Аналогичные результаты представлены в Национальном докладе [9]. По данным А.Г. Георгиади [9], многолетние изменения осредненных по административным районам запасов почвенной влаги под яровыми зерновыми культурами на значительной части Русской равнины характеризовались двумя долговременными периодами увлажнения: с 1958 по 1980 г.

наблюдалась фаза пониженных значений влагозапасов, которая сменилась фазой повышенных влагозапасов с 1980-х гг. Авторы отмечают, что продолжительность контрастных фаз варьировала в регионах в основном в пределах 20–30 лет.

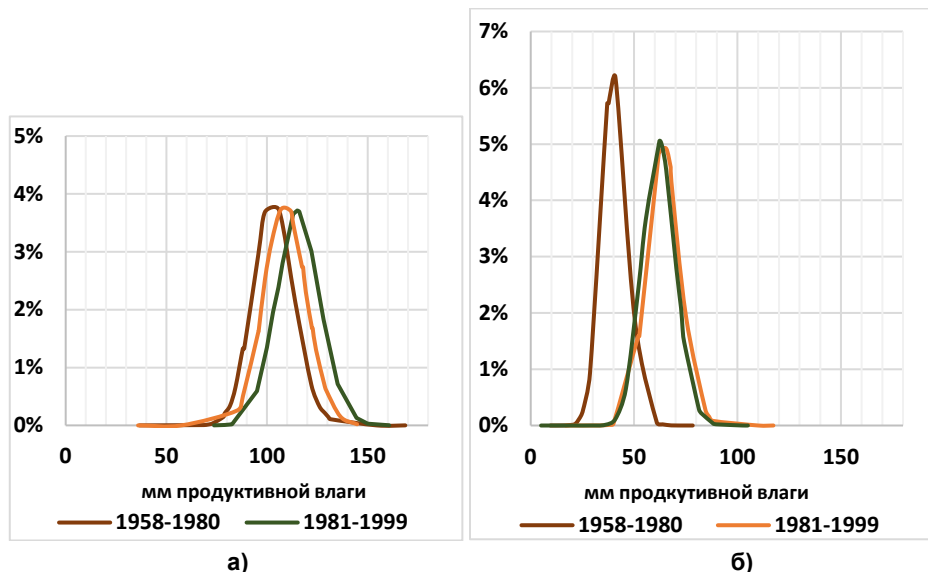


Рис. 5. Распределение Пуассона запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в Ставропольском крае в апреле (а) и июне (б).

Fig. 5. Poisson distribution of available moisture content in a meter-thick soil layer in Stavropol Krai in April (a) and June (б).

Параметры распределения подбираются исходя из отношения коэффициентов вариации и асимметрии. Если эта величина равна или превышает 2, то обычно используется распределение Пирсона III типа (четырёхпараметрическое γ -распределение) и другие распределения, а если она меньше 2, то распределение Крицкого – Менкеля (трехпараметрическое γ -распределение).

Нами были рассчитаны эмпирические кривые обеспеченности за весь период с 1958 по 2024 г. и проведено их сравнение с указанными выше аналитическими кривыми. Результаты исследования получились неустойчивыми: по одной области/краю в некоторые месяцы эмпирическое распределение хорошо аппроксимируется теоретическим, а в другие месяцы совершенно не совпадает.

Объясняется этот факт неоднородностью рядов, а именно тем, что влагозапасы являются резко отклоняющейся величиной со значительной погрешностью измерений, которая связана как с редкостью сети станций, ведущих данные наблюдения, так и со сложностью выполнения отбора проб и их инструментальной и расчетной обработки.

Анализ возможных причин межсезонной изменчивости влагозапасов

Наблюдаемый тренд на повышение влажности почвы, по-видимому, объясняется повышением количества осадков в период вегетации, а также увеличением количества влаги, накопленной в снежном покрове зимой.

По данным [16] за период 1976–2020 гг. изменения годовых сумм осадков незначительно, в Приволжском, Южном и Северо-Кавказском федеральных округах тренд статистически незначим. В зимне-весенний период тренд статистически значим на 5%-ном уровне и составляет 1,1–1,8 мм/месяц/10лет. Причем по сравнению с трендом за период 1976–2012 гг. тенденция увеличения количества годовых и весенних осадков усилилась и сохранилась тенденция к уменьшению количества летних осадков в центре и на юге ЕТР.

Таким образом, наиболее вероятно, что увеличение влажности почвы, в том числе и в летние месяцы, происходит именно за счет снеготаяния, а не из-за осадков летнего периода.

Нами были рассчитаны индексы суровости зимы W_i [10] для каждой области за период 1962–2024 гг.:

$$W_i = \frac{\Delta T}{\sigma_T} + \frac{\Delta R}{\sigma_R},$$

где T – температура воздуха; R – количество осадков; Δ – отклонения от средней величины; σ – среднее квадратическое отклонение. Для расчета используются значения этих параметров, осредненные за три зимних месяца (с декабря по февраль). При разделении зим приняты следующие градации параметра W_i : суровая (менее -2,0), малоснежная и холодная (от -1,9 до -0,6), нормальная (-0,6...0,6), многоснежная и теплая (более 0,6). На рис. 6 для краткости приведены осредненные по физико-агроклиматическим районам значения W_i .

Вероятно, что в теплые и многоснежные зимы промерзание почвы будет невелико (снег изолирует волны холода), весной мерзлый слой быстро оттает и влага сможет свободно просачиваться в почву. Эта гипотеза не является исчерпывающей, так как на формирование влагозапасов влияет множество факторов, в том числе и сельскохозяйственная деятельность. Однако повторяемость теплых зим существенно возросла. В центрально-черноземных областях в период до 1980 г. повторяемость теплых зим колебалась по территории от 16 до 32 % (самая большая повторяемость теплых зим была в Краснодарском крае и Воронежской области), а в XXI веке она увеличилась до 50–70 %; в Среднем Поволжье и на Южном Урале повторяемость составила 5–16 и 33–58 % соответственно (значительно увеличилась повторяемость теплых зим в Республике Калмыкия, Ростовской, Курской, Липецкой, Орловской, Тамбовской и Пензенской областях). Холодных зим, напротив, стало меньше. Если в 1960–1970-е годы повторяемость холодных и малоснежных зим в разных областях колебалась от 50 до 70 % (наиболее часто в Курской, Липецкой, Орловской, Самарской

и Оренбургской областях), а каждая третья-пятая зима была суровой, то в настоящее время их повторяемость составляет 10–29 % (наиболее часто в Волгоградской, Оренбургской областях и Республике Башкортостан). На всей ЕТР суровая зима наблюдалась только в 2002–2003 гг. (на Южном Урале также и в 2011–2012 гг.).

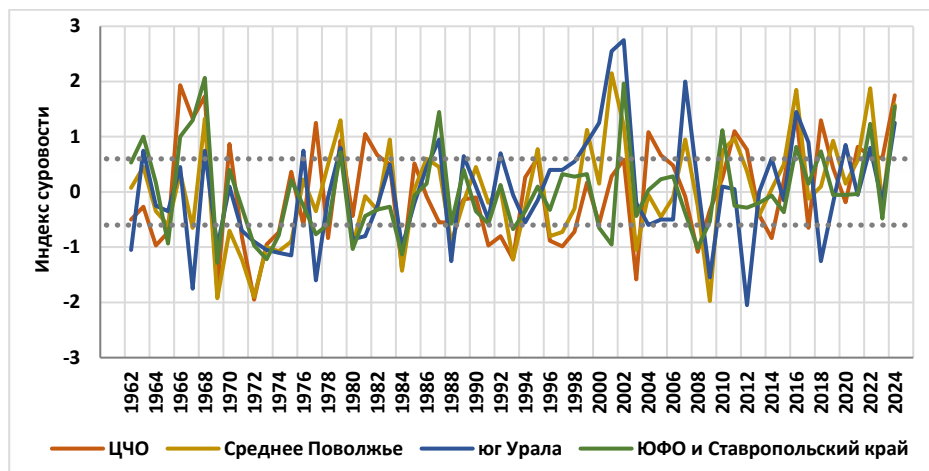


Рис. 6. Индекс суровости зимы (пунктирными линиями выделены границы нормальной зимы).

Fig. 6. Winter severity index (the dotted lines indicate the boundaries of a normal winter).

На повышение общего уровня влагозапасов влияет и изменение общего агротехнологического потенциала, в частности, изменения в технологии обработки почвы. Показать этот феномен по нашим данным возможно лишь косвенно. Гипотеза такова: если изменения (наклон линейного тренда) осадков и влагозапасов будут одинаковы, то внедрение новых приемов агротехники мало меняет уровень влагообеспеченности посевов; если же рост осадков выше, чем влагозапасов, то влияние отрицательное, и наоборот. Нами были рассчитаны тренды зимних осадков за период октябрь–март, т. е. период осеннего накопления влаги в почве и ее запаса в снежном покрове, и средних за вегетационный сезон (апрель–август) запасов продуктивной влаги. Например, в центрально-черноземных областях – агротехнологически высоко развитом регионе – тренд осадков составляет примерно 6 мм/сезон/10лет, а влагозапасов 10 мм/сезон/10лет, т. е. влажность почвы растет несколько быстрее осадков, ее формирующих.

Таким образом, можно утверждать, что увлажнение почвы растет в первую очередь за счет зимних осадков, причем можно предполагать, что за счет внедрения влагосберегающих технологий обработки почвы этот рост выше, чем он мог бы быть без них.

Также можно предположить, что изменение влагозапасов связано с колебаниями климатической системы, т. е. существуют циклы с низкой и высокой влажностью почвы.

При сравнении полученных нами значений средних по области влагозапасов за период 1958–1980 гг. и представленных в справочнике [12] значений за период 1946–1980 гг. заметна существенная разница (около 20–30 мм), в период 1946–1957 гг. влажность почвы была выше, чем в последующие годы до 1980 года. Это также косвенно указывает на цикличность влагозапасов.

Для исследования волн межсезонной изменчивости нами был применен Фурье-анализ, который позволяет провести спектральный анализ временного ряда и получить его амплитудно-частотную характеристику, которая показывает, с каким весом (вкладом) в исследуемом временном ряду присутствуют те или иные периодичности (гармоники).

По ряду сезонных аномалий, рассчитанных для каждой физико-агроклиматической области путем вычитания сезонного хода (табл. 2, рис. 4), был рассчитан тренд, затем он был вычтен из значений аномалий, после чего с помощью пакета анализа данных в Excel рассчитаны гармонические коэффициенты.

Опция «Анализ Фурье» Excel реализует алгоритм, получивший название быстрого преобразования Фурье. Он существенно упрощает расчеты, но накладывает требование на длину временного ряда. Число значений анализируемого ряда должно быть 2^n , где n – натуральное число. В нашем случае длина ряда составляет 67 лет, $2^6=64$, поэтому в качестве периода исследования возьмем 1961–2024 годы.

На рис. 7 для примера приведено два региона. Получено, что основной вклад в дисперсию дают гармоники с периодом от 2 до 4 лет и 20–30 лет.

По графикам среднегодовых аномалий влагозапасов в метровом слое почвы можно проследить примерные годы начала современного периода. На рис. 8 представлен пример такого графика для одного из рассматриваемых регионов. Современный период начался примерно в 2010 г., его можно охарактеризовать как «отрицательные аномалии на фоне общего роста влагозапасов». Если принять, что длительность цикла составляет 25 лет, то примерно к 2035 г. он закончится и, вероятно, начнется период с большей повторяемостью засух. Конечно, данная гипотеза не является прогнозом и носит всего лишь характер предположения.

В настоящее время в агроклиматических исследованиях преобладает метод трендов (например, [3, 16]), но основе которого строятся прогнозы на ближайшие годы и десятилетия. На наш взгляд, такой подход существенно недоучитывает изменчивость агроклимата, хотя он, конечно, имеет неоспоримое преимущество в виде легкости выполнения расчетов. Как можно видеть на рис. 8, в аномалиях влагозапасов четко прослеживается периодичность, поэтому коэффициенты тренда явно зависимы от периода расчета.

По знаку выделенных аномалий влагозапасов в метровом слое почвы можно указать примерные годы периодов отрицательной и положительной фазы.

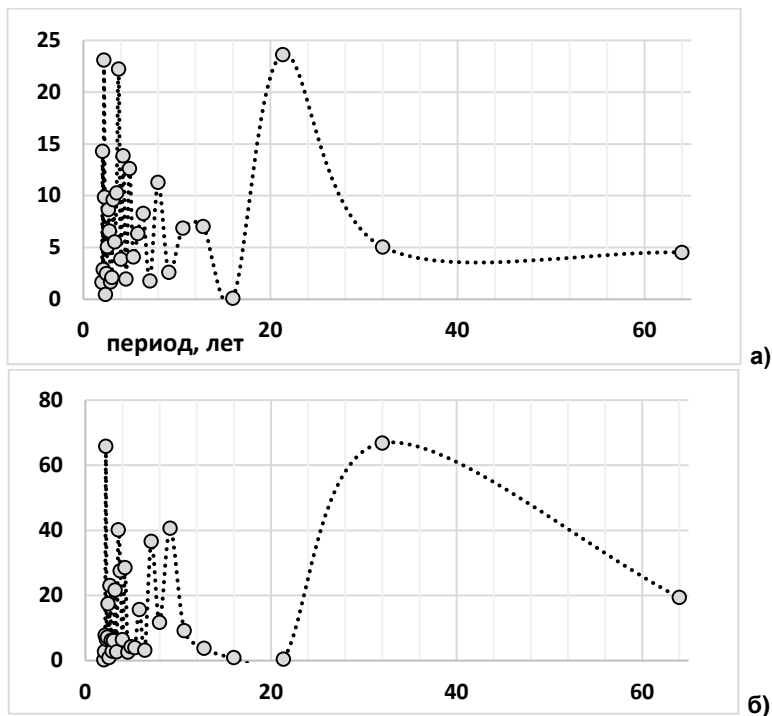


Рис. 7. Дисперсия гармоник Фурье для Верхневолжского региона (а) и центральных нечерноземных областей (б).

Fig. 7. Dispersion of Fourier harmonics for the Upper Volga region (а) and central non-chernozem regions (б).

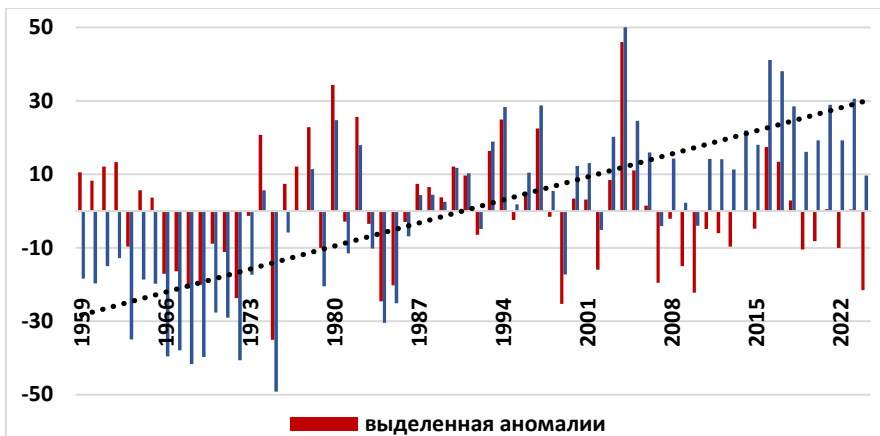


Рис. 8. Аномалии влагозапасов в метровом слое почвы и выделенные аномалии (с вычтенным трендом) для центрально-черноземных областей.

Fig. 8. Anomalies of available moisture content in a meter-thick soil layer and highlighted anomalies (with subtracted trend) for the central chernozem regions.

Отрицательная фаза в большинстве физико-агроклиматических регионов продолжалась до 1975–1988 гг., что близко к границе условно выделенных нами первого и второго подпериодов (1980 г). Положительная фаза началась примерно в 2005–2010 гг., что также близко к границе третьего подпериода (2000 г.). Таким образом, границы рассматриваемых периодов, выделенные на основе длительного опыта оперативной агрометеорологической работы одного из авторов, близки к естественным периодам циклов влагозапасов и полученные результаты обладают достаточной репрезентативностью.

Выводы

Изучение пространственно-временной структуры поля влажности почвы чрезвычайно актуально как для оценки продуктивности и эффективности сельского хозяйства, так и для качественного воспроизведения баланса влаги в численных моделях погоды и климата.

В настоящее время исследование изменений в структуре поля почвенной влаги особенно важно для оценки последствий климатических изменений. Аналогичные оценки были выполнены одним из авторов статьи в конце нулевых годов XXI века, тогда был сделан вывод о том, что влагозапасы в целом растут, но значения остаются внутри обычных для рассматриваемых территорий категорий (градаций) увлажнения. За прошедшие полтора десятка лет накопленные изменения влагозапасов столь значительны, что в большинстве регионов они изменились на градацию в сторону улучшения влагообеспеченности посевов.

На основе литературных источников и выполненных расчетов показано, что связность поля в различные периоды остается практически неизменной, т. е. в основе лежит не столько вариативность компонент баланса почвенной влаги (количество осадков, снежный покров, испарение), сколько физические свойства самой почвы.

Осреднение влагозапасов по области и месяцу существенно сглаживает их, но позволяет выявить основные особенности наблюдаемых климатических изменений. Произведены оценки основных статистических характеристик для областей/краёв/республик Европейской территории России за периоды 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 гг. и рассчитаны кривые сезонного хода для четырех физико-агроклиматических регионов. Показано, что в настоящее время влагообеспеченность посевов растет во все декады вегетационного периода, наблюдаемые в настоящее время климатические изменения имеют положительное влияние на сельскохозяйственную отрасль России. Изменения не одинаковы по времени, в одних регионах наиболее значителен «скачок» влагозапасов от 60–80-х годов прошлого столетия к его последнему двадцатилетию, в других наибольшие изменения происходят уже в нынешнем столетии.

Основными причинами наблюдаемых изменений являются потепление зим и циклы климатической системы. На Европейской территории России до 1980-х годов наблюдалась отрицательная фаза, а в XXI веке – положительная фаза циклов увлажнения почвы.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 25-17-00314, <https://rscf.ru/project/25-17-00314>.

Список литературы

1. Валовые сборы сельскохозяйственных культур по Российской Федерации (по категориям хозяйств). Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения: 17.09.2025)
2. Гандин Л.С., Коган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 360 с.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Росгидромет, 2025. 135 с.
4. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
5. Кельчевская Л.С. Влажность почв Европейской части СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 183 с.
6. 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. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-146-162
7. Лавров С.А. Влияние климатических изменений на влажность почвы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 19-39. DOI: 10.35567/19994508-2025-2-19-39
8. Мецнерская А. В., Болдырева Н. А., Шанаева Н. Д. Средние областные запасы продуктивной влаги в почве и высота снежного покрова: Статистический анализ и примеры использования. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 243 с.
9. Национальный доклад "Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)" / Под редакцией Р.С.-Х. Эдельгериева. Том 3. М.: ООО "Издательство МБА", 2021. 700 с.
10. Попов А.В. О возможности прогноза теплых многоснежных и холодных зим малоснежных зим. // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. Вып. 156. С. 77-84.
11. РД 52.33.217-99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11 Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Ч. 1. Основные агрометеорологические наблюдения. М.: Росгидромет, 2000. 374 с.
12. Средние многолетние запасы продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми зерновыми культурами по областям, краям, республикам и экономическим районам. Т. 1. Европейская часть СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 123 с.
13. Средние многолетние и вероятные характеристики запасов продуктивной влаги под озимыми и ранними яровыми культурами. Т. 1 / под ред. Л.С. Кельчевской. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 292 с.
14. Тарасова Л.Л. Пространственно-временная структура поля запасов продуктивной влаги в почвах черноземной зоны европейской части России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2008. № 2. С. 57-61.
15. Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. Современные климатические тенденции изменений испарения и влажности почвы на юге европейской России // Аридные экосистемы. 2023. № 3 (96). С. 4-14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-3-4-14
16. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.

References

1. Valovyye sbory selskokhozyaystvennykh kultur po Rossiyskoy Federatsii (po kategoriyam khozyaystv). Federal State Statistics Service. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (date of request: 17.09.2025) [in Russ].
2. Gandin L.S., Kogan R.L. Statisticheskiye metody interpretatsii meteorologicheskikh dannykh. Leningrad: Gidrometeizdat publ., 1976. 360 p. [in Russ].

3. Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2024 god. Moscow, Rosgidromet publ., 2025. 135 p. [in Russ].
4. Isayev A.A. Statistika v meteorologii i klimatologii. Moscow, Publishing house MGU publ., 1988 [in Russ].
5. Kelchevskaya L.S. Vlazhnost pochv Evropeyskoy chasti USSR. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983. 183 p. [in Russ].
6. Klang P.S., Khan V.M., Tarasova L.L. Otsenka obyemnoy vlazhnosti pochvy reanaliza ERA5 po dannym stantsionnykh nablyudeniyy vlagozapasov v regionakh Rossiyskoy Federatsii [Estimation of volumetric soil moisture from ERA5 reanalysis according to the station observations of moisture reserves in the regions of the Russian Federation]. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting]. 2024. vol. 394, no. 4, pp. 146-162. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-4-146-162 [in Russ].
7. Lavrov S.A. Vliyaniye klimaticheskikh izmeneniy na vlazhnost pochvy [The effect of climate change on soil moisture]. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problem, tekhnologii, upravleniye* [Water sector of Russia: problems, technologies, management]. 2025, no. 2, pp. 19-39. DOI: 10.35567/19994508-2025-2-19-39 [in Russ].
8. Meshcherskaya A.V., Boldyreva N.A., Shapayeva N.D. Sredniye oblastnyye zapasy produktivnoy vlagi v pochve i vysota snezhnogo pokrova: Statisticheskii analiz i primery ispolzovaniya. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1982, 243 p. [in Russ].
9. Natsionalnyy doklad "Globalnyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi. mery preduprezhdeniya. borby. likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnyye meropriyatiya (selskoye i lesnoye khozyaystvo)". Tom 3. Moscow: Publishing house MBA Publ., 2021, 700 p. [in Russ].
10. Popov A.V. O vozmozhnosti prognoza teplykh mnogosnezhnykh i kholodnykh zim malosnezhnykh zim. *Trudy Gidromettsentra USSR*. 1975, vyp. 156, pp. 77-84.
11. ПД 52.33.217-99 Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vyp. 11 Agrometeorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh i postakh. Ch.1. Osnovnyye agrometeorologicheskie nablyudeniya. Moscow, Rosgidromet publ., 2000. 374p. [in Russ].
12. Sredniye mnogoletniye zapasy produktivnoy vlagi pod ozimymi i rannimi yarovymi zernovymi kulturami po oblastyam. krayam. respublikam i ekonomicheskim rayonam. T. 1. Evropeyskaya chast USSR. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 123 p. [in Russ].
13. Sredniye mnogoletniye i veroyatnyye kharakteristiki zapasov produktivnoy vlagi pod ozimymi i rannimi yarovymi kulturami. T. 1. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, 292 p. [in Russ].
14. Tarasova L.L. Prostranstvenno-vremennaya struktura polya zapasov produktivnoy vlagi v pochvakh chernozemnoy zony evropeyskoy chasti Rossii [Spatial-temporal analysis of productive moisture reserves in soils of the chernozem zone of the european part of Russia]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography]. 2008, no. 2, pp. 57-61 [in Russ].
15. Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Sovremennyye klimaticheskiye tendentsii izmeneniy ispareniya i vlazhnosti pochvy na yuge evropeyskoy Rossii [Current climatic trends in evaporation and soil moisture changes in the south of European Russia]. *Aridnyye ekosistemy* [Arid Ecosystems]. 2023, vol. 13, no. 3, pp. 239-247. DOI: 10.1134/s2079096123030150
16. Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Sankt-Peterburg, Naukoyemkiye tekhnologii Publ., 2022, 676 p. [in Russ].

Поступила 30.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 30.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.