

Современные тенденции изменения агроклиматических ресурсов на территории Приволжского федерального округа

Ю.П. Переведенцев^{1)}, В.Н. Павлова²⁾, Е.М. Парубова¹⁾, Н.А. Мирсаева¹⁾,
А.А. Николаев¹⁾, К.М. Шанталинский¹⁾*

¹⁾Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

²⁾ ФГБУ «ВНИИСХМ»,
Россия, 249035, г. Обнинск, ул. Ленина, д. 82

*Адрес для переписки: ypereved@kpfu.ru

Реферат. Дается оценка агроклиматических ресурсов на территории Приволжского федерального округа (ПФО) за последние десятилетия, рассчитанных с использованием данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» за 1966-2018 гг. Приводятся данные о пространственно-временной изменчивости ряда характеристик солнечной радиации, сумм положительных температур вегетационного периода, дат перехода среднесуточных температур через 0, 5, 10 и 15°C весной и осенью, продолжительности периодов с среднесуточными температурами превышающими указанные значения. Дана характеристика степени засушливости и переувлажненности региона с использованием агроклиматических индексов: гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова (ГТК), индекса увлажненности Сапожниковой. Показано, что наблюдается тенденция увеличения продолжительности вегетационного периода, теплообеспеченности территории и её засушливости, что необходимо учитывать в сельскохозяйственном производстве.

Ключевые слова. Среднесуточная температура воздуха, переход среднесуточной температуры воздуха через определенные значения, индексы сухости и переувлажнения, солнечная радиация, коэффициент наклона линейного тренда, повторяемость засушливых и переувлажненных периодов.

Current trends in agroclimatic resources in Volga Federal District

Yu.P. Perevedentsev^{1)}, V.N. Pavlova²⁾, E.M. Parubova¹⁾, N.A. Mirsaeva¹⁾,
A.A. Nikolaev¹⁾, K.M. Shantalinsky¹⁾*

¹⁾Kazan (Volga Region) Federal University,
18, Kremlevskaya str., 420008, Kazan, Russian Federation

²⁾NRIAM,
82, Lenina str., 249035, Obninsk, Russian Federation

*Correspondence address: ypereved@kpfu.ru

Abstract. An assessment is given of agro-climatic resources on the territory of the Volga Federal District (VFD) over the past decades, calculated using the data of the Federal State Budgetary Institution "RIHMI – WDC" for 1966-2018. Data are given on the spatial and temporal variability of a number of characteristics of solar radiation, the sums of positive temperatures of the growing season, the dates of transition of average daily temperatures through 0, 5, 10 and 15°C in spring and autumn, the duration of periods with average daily temperatures exceeding the indicated values. The characteristic of the degree of aridity and waterlogging of the region is given using agroclimatic indices: hydrothermal coefficient G.T. Selyaninov (HTC), moisture index Sapozhnikova. It is shown that there is a tendency to increase the duration of the growing season, the heat supply of the territory and its aridity, which must be taken into account in agricultural production.

Keywords. The average daily air temperature, the transition of the average daily air temperature through certain values, dryness and waterlogging indices, solar radiation, the slope coefficient of the linear trend, the frequency of arid and waterlogged periods.

Введение

Приволжский федеральный округ относится к числу наиболее развитых в промышленном и сельскохозяйственном отношении регионов Российской Федерации, его площадь составляет 1 037.0 тыс. км² (6.1% от территории страны), население 28 844 264 чел. (19.82% населения страны). Здесь производится четверть промышленной и сельскохозяйственной продукции страны. Все это обуславливает постоянный научный и практический интерес к изучению современной динамики природных и климатических условий в этом обширном и многообразном в физико-географическом отношении регионе, что нашло свое отражение в ряде публикаций последних лет. Следует отметить, что климатические исследования в регионе ведутся с момента создания в 1804 г. Казанского университета (КУ), активизации которых способствовало открытие в Казанском университете в 1812 г. Метеорологической обсерватории. С этого времени началось создание метеорологической сети на востоке России, важную организационную и методическую роль в котором сыграла Метеорологическая обсерватория КУ. Подробная история этих событий представлена в статье (Переведенцев, Мирсаева, 2021).

Изучению современных климатических и агроклиматических условий на территории ПФО посвящены работы (Переведенцев и др., 2017; Переведенцев и др., 2020), в которых по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» рассмотрены пространственно-временные изменения основных климатических показателей, показано, что в последние десятилетия положительные аномалии температуры заметно преобладают над отрицательными и наблюдается тенденция увеличения ОЯ в регионе.

В работе (Павлова и др., 2016) рассмотрен ряд вопросов, связанных с оценкой тенденции воздействия наблюдаемых изменений климата в период

1951-2015 гг. на водный и тепловой режим агросферы и на производство сельскохозяйственных культур в ПФО (Приволжского федерального округа), в одном из основных производителей зерна в России. Показано, что в ПФО в период 1986-2015 гг. урожайность яровой и озимой пшеницы имеет положительную динамику. Вместе с тем выявлена тенденция к засухливости в южной части округа в рассматриваемый период.

В работе (Страшная и др., 2014) дана агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур с использованием наземных и спутниковых данных на примере ПФО. В статье (Береза и др., 2015) рассмотрена возможность прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на базе наземных и спутниковых данных.

Для оценки связи изменений биоклиматического потенциала с изменениями состояния сельскохозяйственных культур используется вегетационный индекс NDVI (Логинов и др., 2021), который представляет собой отношение разности спектральных отражающих способностей земной поверхности в ближнем инфракрасном (NIR) и красном (Rd) диапазонах к их сумме:

$$NDVI = \frac{NIR - Rd}{NIR + Rd}. \quad (1)$$

Индекс изменяется от 0 до 1. Он успешно используется для мониторинга сельскохозяйственных культур на территории России и Беларуси.

В работе (Черенкова, 2017) установлено, что наибольшую чувствительность к изменениям температуры поверхности Северной Атлантики весной демонстрируют атмосферные осадки в Саратовской, Самарской и Оренбургской областях, а также в республиках Татарстан и Башкортостан. В этой работе показано влияние циркуляционных механизмов на режим осадков Европейской части России (ЕЧР), что подтверждается для территории ПФО в целом в авторской статье (Переведенцев и др., 2022).

Согласно работам (Переведенцев и др., 2020; Переведенцев и др., 2021), с использованием данных метеонаблюдений 183 станций и данных реанализов 1979-2018 гг. выявлена общая тенденция повышения температуры воздуха и незначительного увеличения годовых сумм атмосферных осадков на территории ПФО. Установлена корреляция между индексами атмосферной циркуляции (NAO, AO, SCAND) и колебаниями температуры в регионе.

Таким образом, проблема изучения происходящих климатических изменений (и прежде всего температурно-влажностного режима) в последние десятилетия в интересах сельскохозяйственного производства остается актуальной для региона.

Цель настоящей статьи – рассмотреть динамику агроклиматических ресурсов с учетом радиационного фактора на территории ПФО в период 1966-2018 гг. в условиях потепления климата в развитие ранее выполненных

исследований. Согласно данным Всемирной метеорологической организации (ВМО), последние 7 лет (2015-2021 гг.) являются наиболее теплыми за весь период инструментальных метеонаблюдений. В России около 60% посевных площадей основных сельскохозяйственных культур располагаются в районах недостаточного и неустойчивого увлажнения, что приводит в случае сильных и продолжительных засух к значительным колебаниям валовых сборов зерна, что особенно проявилось в 2010 г., когда на Европейской части России (ЕЧР) установилась экстремально жаркая погода (Фролов и др., 2011). Июль и август 2022 г. также оказались для ЕЧР наиболее теплыми за весь период инструментальных наблюдений.

Методы и материалы

В качестве исходных данных в работе использовались результаты метеорологических наблюдений на 16 метеостанциях из фонда ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», равномерно расположенных на территории ПФО, в период 1966-2018 гг. Кроме того, рассматривался и радиационный режим региона.

С использованием данных (<https://power.larc.nasa.gov/>) для каждого месяца года с 1983 по 2020 гг. производился расчет прямой и суммарной солнечной радиации для территории ПФО. Кроме того, дана оценка продолжительности солнечного сияния и фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), что особенно важно для вегетационного периода.

По известной методике Д.А. Педя (Педь, 1951) определялись даты устойчивого перехода средней суточной температуры (ССТ) воздуха через 0, 5, 10 и 15°C весной и осенью, продолжительность периодов превышающих указанные ССТ, а также суммы температур за периоды с ССТ превышающей 0, 5, 10 и 15°C.

Для характеристики увлажненности территории рассчитывались два показателя: гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) и коэффициент увлажнения Сапожниковой (КУ) по формулам (Методы ..., 2012):

$$ГТК = \frac{r_{IV-VIII}}{0.1 \sum T_{VI-VIII}}, \quad (2)$$

$$КУ = \frac{0.5r_{X-III} + r_{IV-IX}}{0.18 \sum T_{IV-IX}}, \quad (3)$$

где T – среднесуточная температура, °C, r – сумма осадков, мм.

Согласно формулам (2) – (3), показатели увлажненности ГТК и КУ характеризуют отношение приходной части водного баланса (осадки) к максимально возможной величине его расходной части (испаряемости). Индекс сухости – интегральный годовой показатель увлажненности представляет собой отношение испаряемости к годовой сумме осадков.

Тенденции изменения показателей ГТК и КУ во времени оценивались по рассчитанным значениям коэффициента наклона линейного тренда (КНЛТ). Полученные значения ГТК и КУ использовались для оценки повторяемости периодов с различной степенью засушливости или увлажнения на территории ПФО.

Результаты

Как известно, свет, тепло и влага являются самыми необходимыми компонентами для растений. Рассмотрим распределение по территории региона характеристик солнечной радиации (прямой и суммарной), фотосинтетически активной радиации и продолжительности солнечного сияния.

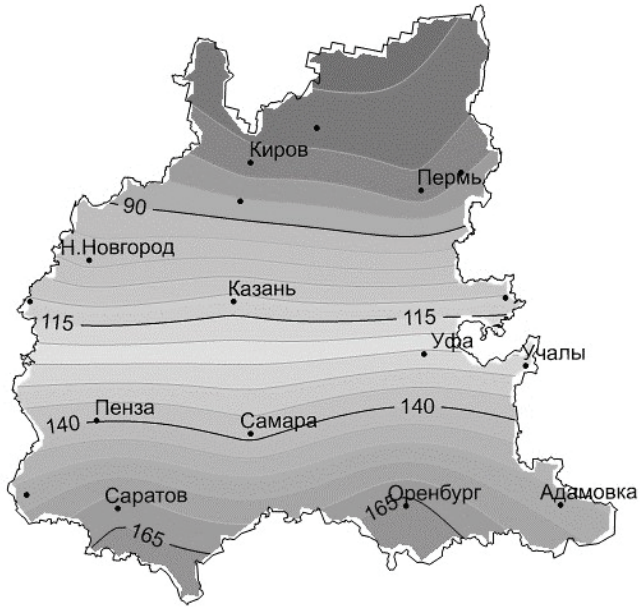
Средний годовой приход прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность при ясном небе, т.е. максимально возможный приход, изменяется по территории с севера на юг в пределах 4400-5200 МДж/м².

При ясном небе потоки прямой солнечной радиации по территории ПФО увеличиваются с запада на восток и с севера на юг. При этом наибольшее количество солнечного тепла 780-850 МДж/м² поступает в июне-июле, а в зимнее время 48-125 МДж/м² (в декабре) и 75-175 МДж/м² (в январе) оно оказывается наименьшим в году (рис. 1). Таким образом, среднегодовая амплитуда в количестве поступающего к земной поверхности при ясном небе солнечного тепла составляет около 822 МДж/м².

Максимум прямой радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, приходится на июнь. В отдельные годы максимум отмечается в мае или июле. Подобные смещения времени наступления максимума прихода прямой солнечной радиации относительно его среднего положения в июне связаны, прежде всего, с условиями циркуляции, режимом облачности и прозрачности атмосферы.

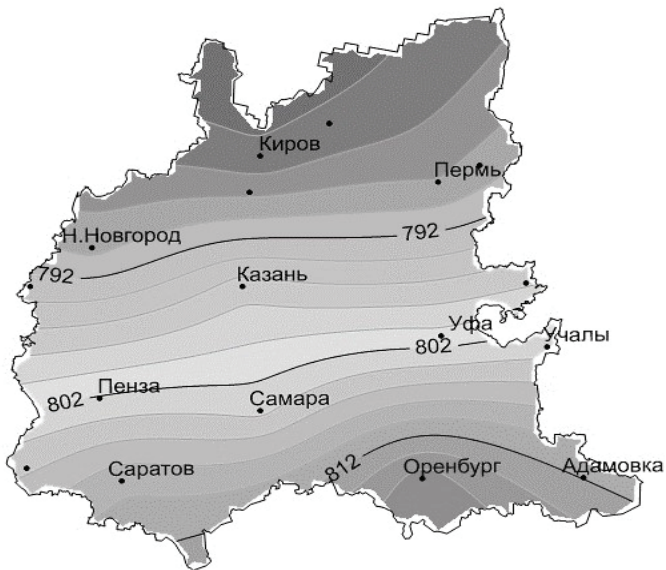
Отличительной чертой распределения среднемесячных значений суммарной радиации в летний период является установление ее высоких значений на всей рассматриваемой территории при малой пространственной изменчивости. Максимальное количество солнечного тепла получают южные района ПФО – 650-750 МДж/м² в июле (рис. 2). В осенние месяцы отмечается понижение сумм суммарной солнечной радиации. Причем наиболее значительно уменьшение происходит от октября к ноябрю от 118-226 МДж/м² к 45-121 МДж/м² (рис. 2)

а



Прямая солнечная радиация (МДж/м²) в январе

б

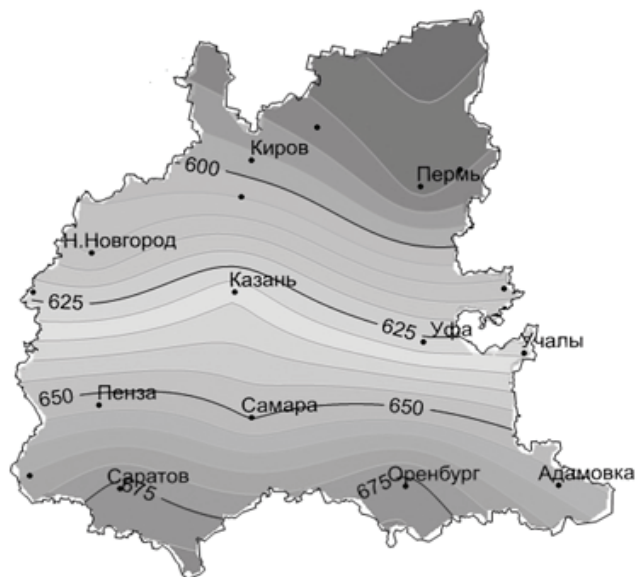


Прямая солнечная радиация (МДж/м²) в июле

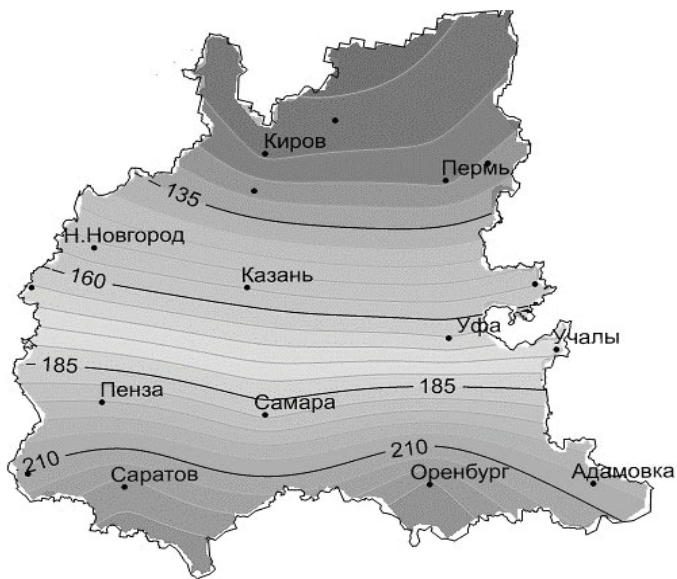
Рисунок 1. Суммы прямой солнечной радиации при ясном небе в январе (а) и июле (б), МДж/м²

Figure 1. The sums of direct solar radiation in clear skies in July (a) and January (b), MJ/m²

а



б



Суммарная солнечная радиация (МДж/м²) в октябре

Рисунок 2. Суммы суммарной солнечной радиации в июле (а) и в октябре (б), МДж/м²

Figure 2. Total solar radiation in July (a) and October (b), MJ/m²

Следует отметить, что распределение сумм солнечной радиации на территории ПФО носит в основном зональный характер при котором южные районы региона получают заметно больше солнечной энергии, чем северные.

Солнце является источником энергии природных процессов, в том числе фотосинтеза. Решающее значение для жизнедеятельности растений имеет коротковолновая радиация в интервале ($\lambda = 0.38 \dots 0.71$ мкм), называемая фотосинтетически активной радиацией (ФАР). ФАР является одним из важнейших факторов продуктивности сельскохозяйственных культур (Грингоф и др., 2005). Интенсивность ФАР рассчитывается по формуле по данным прямой, рассеянной или суммарной радиации:

$$\sum Q_{\text{ФАР}} = 0.43 * \sum S + 0.57 * \sum D, \quad (4)$$

где $\sum Q_{\text{ФАР}}$ – суммарная ФАР, Дж/м²; $\sum S$ – сумма прямой солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, Дж/м²; $\sum D$ – сумма рассеянной солнечной радиации, Дж/м².

Для приближенного расчета ФАР используют также данные о суммарной радиации с коэффициентом 0.52:

$$Q_{\text{ФАР}} = 0.52 * \sum Q. \quad (5)$$

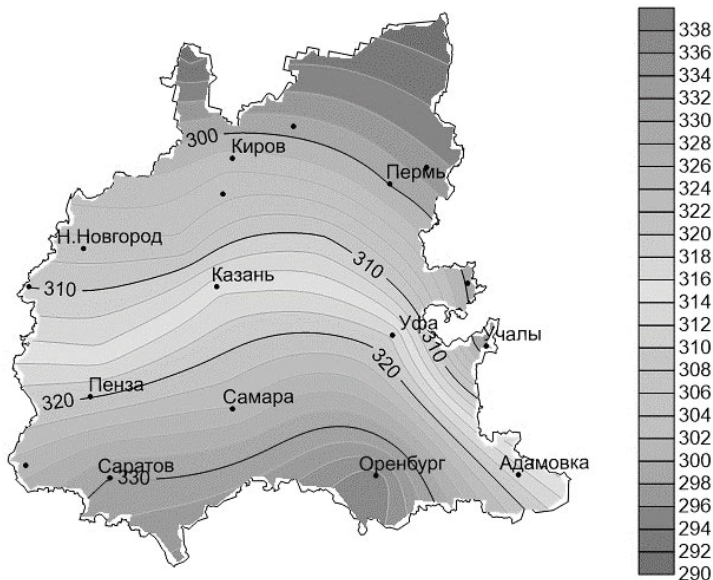
Для Казани величина средней многолетней суммы ФАР за период активной вегетации равна ~ 1300 МДж/м². ФАР в вегетационный период имеет квазизональное распределение по территории региона. Согласно расчетам, в апреле она возрастает от 218 (северо-восток) до 240 МДж/м² на юге ПФО, в мае от 276 до 308 МДж/м², в июне от 306 до 336 МДж/м², в июле от 300 до 330 МДж/м², в августе от 235 до 260 и в сентябре от 145 до 195 МДж/м² (рис. 3).

Для растений большое значение имеет продолжительность солнечного сияния. На рассматриваемой территории увеличение числа часов солнечного сияния происходит с северо-запада на юго-восток. Если на северо-западе продолжительность солнечного сияния за год составляет 1570-1600 час, то на юго-востоке она достигает 2300-2400 час. Уменьшение продолжительности солнечного сияния на северо-западе обусловлено в основном большей повторяемостью пасмурного состояния неба. Наибольшее число часов с солнечным сиянием отмечается в июне-июле, наименьшее в декабре.

В мае минимальные месячные суммы продолжительности солнечного сияния наблюдаются в северных районах Среднего Поволжья. Второй дополнительный минимум отмечается на юго-западе Пензенской области. Ярко

выраженный максимум (до 300 часов) наблюдается на юго-востоке Самарской области. Более резко, чем в мае, выражено возрастание месячных сумм продолжительности солнечного сияния с увеличением широты на севере Среднего Поволжья в июне.

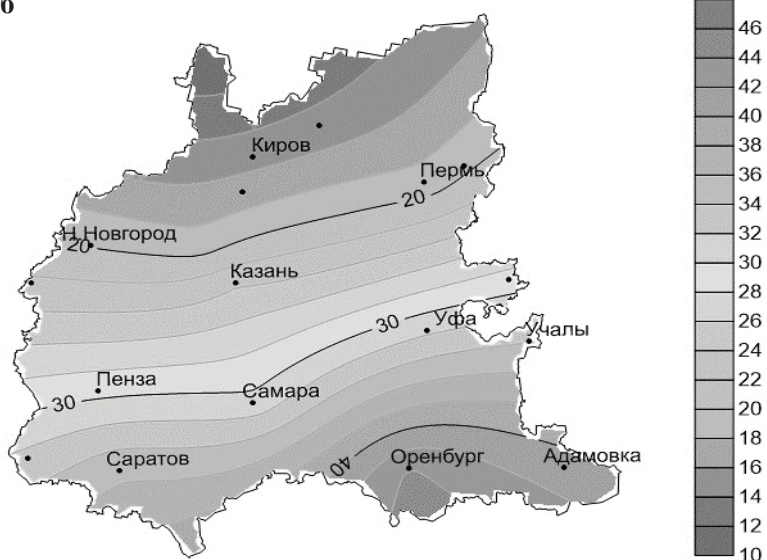
а



Фотосинтетическая активная радиация (ФАР)(МДж/м2)

в июле

б



Фотосинтетическая активная радиация (ФАР)(МДж/м2)

в декабре

Рисунок 3. Фотосинтетически активная радиация в апреле (а) и в июле (б), МДж/м²

Figure 3. Photosynthetically active radiation in April (a) and July (b), MJ/m²

В июле наибольшая продолжительность солнечного сияния наблюдается на юге территории – 330-345 часов, что составляет 70-75% от возможной продолжительности солнечного сияния, наименьшая же продолжительность его порядка 260-270 часов, т.е. 50-55% от возможного числа часов с солнечным сиянием за месяц (рис. 4), что обусловлено пространственно-временной изменчивости облачности (Переведенцев и др., 2013).

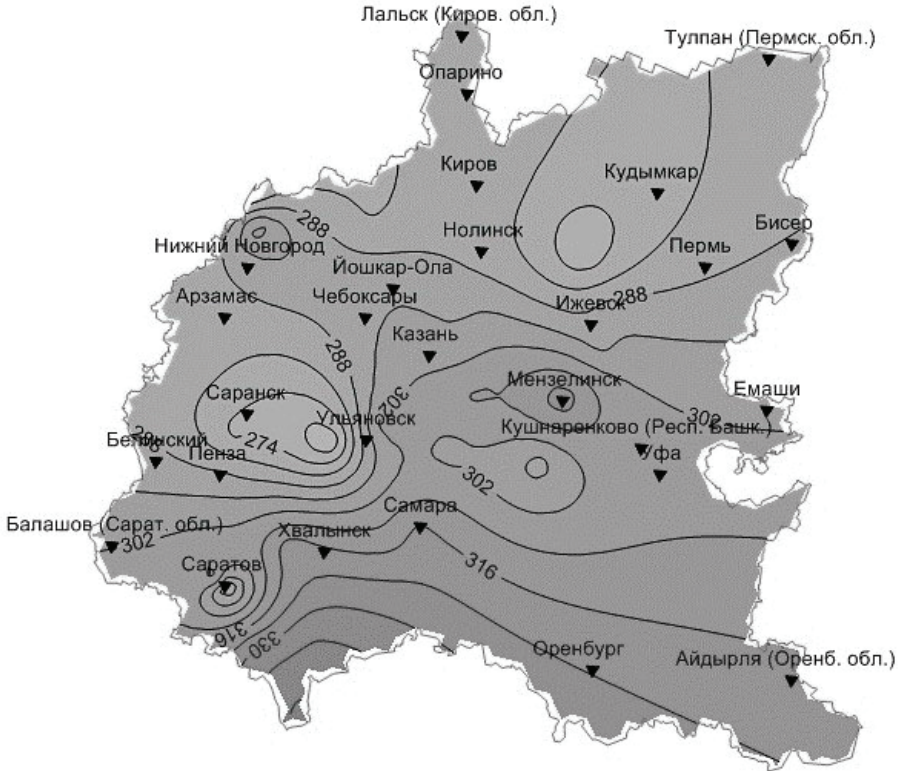


Рисунок 4. Продолжительность солнечного сияния в июле, час

Figure 4. Duration of sunshine in July, hour

В августе величина продолжительности солнечного сияния увеличивается с северо-запада на юго-восток. Максимальные суммы продолжительности солнечного сияния отмечаются на юге Самарской области (275-280 часов), минимальные на севере региона (235-245 часов).

Резкое уменьшение числа часов солнечного сияния наблюдается при переходе от сентября к октябрю. Так, в северных районах Кировской области в сентябре продолжительность солнечного сияния уменьшается от 110-115 часов до 40-45 часов в октябре, т.е. больше чем в два раза. В других районах рассматриваемой территории обычно продолжительность солнечного сияния в октябре почти в два раза меньше, чем в сентябре.

Рассмотрим основные параметры вегетационного периода, связанные с переходом ССТ через определенные пределы. Анализ полученных результа-

тов определения дат устойчивого перехода SST воздуха через значения 0, 5, 10 и 15°C весной и осенью, а также продолжительности периодов с температурами выше указанных значений. Анализ полученных результатов показывает, что весной переход SST через 0°C (начало теплого периода) происходит на юго-западе ПФО раньше, чем на северо-востоке. Так, на станции Балашов (Саратовская область) переход происходит на 82 сутки от начала года, а на станции Ныроб (северо-восток ПФО) на 99 день, разница составляет 17 суток. В среднем по региону переход SST через 0°C происходит на 91 день от начала года. Осенью, наоборот, на севере ПФО переход SST через 0°C осуществляется на несколько дней раньше, чем на юге. Так, на станции Ныроб это событие происходит на 290 день от начала года, а на станции Балашов на 317 день. В среднем по округу переход осуществляется на 304 сутки от начала года, а продолжительность теплого периода составляет 213 дней. При этом на севере она составляет 191 сутки, а на юге возрастает до 235, что естественно отражается на сельскохозяйственном производстве.

Естественно, что переходы SST через значения 5, 10 и 15°C происходят в более позднее время весной и заканчиваются раньше осенью, чем переходы через 0°C. Отметим лишь средние значения этих показателей по ПФО: весной переход SST через 5, 10 и 15°C происходит соответственно на 109, 122 и 142 сутки от начала года, а осенью на 281, 265 и 243 сутки. При этом средняя продолжительность периодов по ПФО с SST превышающей значения 5, 10 и 15°C соответственно равна 172, 143 и 101 суткам. Естественно, что распределение перечисленных показателей по территории зависит от физико-географических условий местности и наибольшие их изменения происходят в направлении с юго-запада на северо-восток.

Анализ рассчитанных коэффициентов наклона линейного тренда (КНЛТ) сроков переходов SST через определенные значения весной и осенью показывает, что весной переходы стали происходить раньше, а осенью позже на несколько дней, что увеличивает продолжительность теплого периода года. Так, для станции Казань, ЦГМС КНЛТ дат перехода SST весной через значения 0, 5, 10 и 15°C соответственно равны: -1.48; -0.4; -0.2; -4.2 дней/10 лет, осенью эти значения имеют положительный знак и равны: 2.37; 1.82; 1.37; 0.8 дней/10 лет. Таким образом, лето наступает весной заметно раньше, а осенью теплый период заметно задерживается.

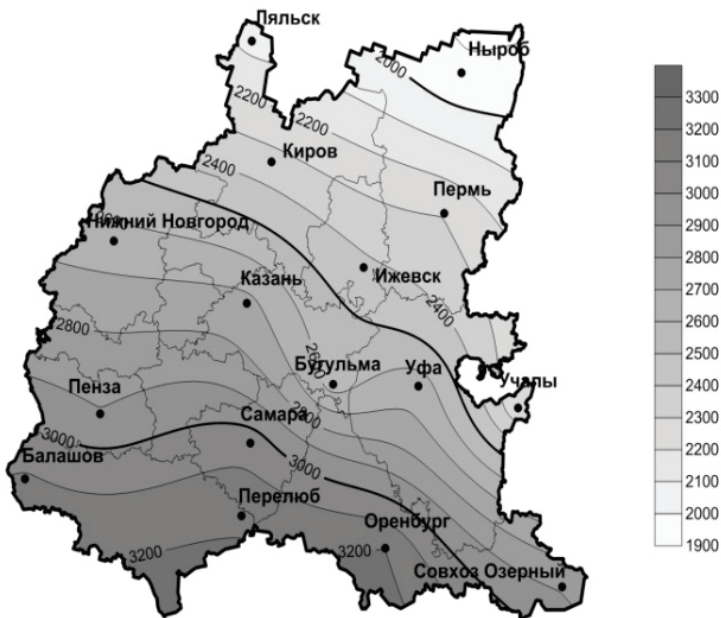
Рассмотрим пространственно-временное распределение по региону сумм положительных температур для периодов превышения SST пределов 0, 5, 10 и 15°C (рис. 5). Как видно из рис. 5, суммы положительных температур во всех случаях возрастают с северо-востока на юго-запад. Для периода с SST > 0°C сумма температур на северо-востоке ПФО (станция Ныроб) составила 2035°C, а на юге Саратовской области она достигла 3261°C (средняя величина по округу 2739°C). Для периода с SST > 5°C отмеченная выше закономерность сохраняется, и величина суммы температур возрастает от 1915°C (станция Ныроб) до 3171°C (станция Перелюб). Несколько превышают эту сумму показатели станции Оренбург (3199°C). В среднем по округу сумма равна 2637°C. Естественно, что суммы температур для периодов, когда SST превышает 10 и 15°C, меньше,

чем ранее отмеченные ввиду сокращения продолжительности этих периодов. Так, сумма температур, осредненная по территории ПФО для периодов с ССТ > 10 и 15°C, составляет соответственно 2342 и 1746°C. При этом наименьшие ее значения отмечаются на северо-востоке, а наибольшие на юге и юго-востоке. Полученное распределение сумм положительных температур по территории ПФО согласуется с данными статьи (Переведенцев и др., 2020), рассчитанных по данным реанализа ERA5 за 1979-2019 гг.

а



б



В



Г



Рисунок 5. Распределение сумм положительных температур для периодов превышения средней суточной температуры пределов 0 (а), 5 (б), 10 (в) и 15 (г) °С

Figure 5. Distribution of sums of positive temperatures for periods when the average daily temperature exceeds the limits 0 (a), 5 (b), 10 (c) and 15 (d) °C

Отмечается значительная межгодовая изменчивость сумм температур воздуха в рассматриваемый период. Так, в 2002 г. на станции Ныроб эта

сумма в период с $CCT > 10^{\circ}C$ составляла всего лишь $1020^{\circ}C$, а в 1977 г. она достигла $2139^{\circ}C$, на юго-востоке (станция Оренбург) максимального значения этот параметр достиг в 2012 г. ($3787^{\circ}C$). При этом, чаще всего минимальные значения сумм температур с $CCT > 10$ и $15^{\circ}C$ наблюдались в 1969, 1976, 1978 и 1990 годах, а максимальные в 2010, 2012, 2016 годах (рис. 6).

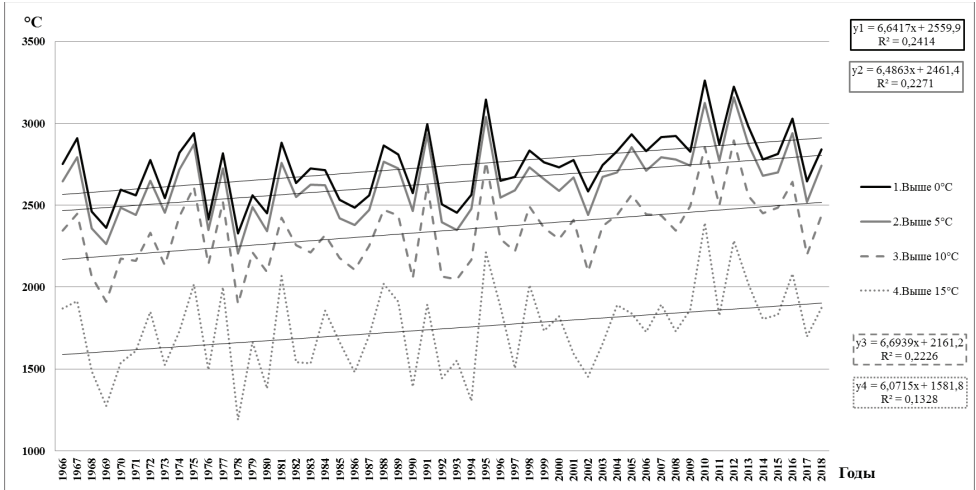


Рисунок 6. Многолетний ход сумм температур выше 0, 5, 10, $15^{\circ}C$, осредненных для ПФО (1966-2018 гг.)

По оси y – сумма активных температур, x – годы, R^2 – коэффициент детерминации

Figure 6. Long-term course of the sums of temperatures above 0, 5, 10, $15^{\circ}C$, averaged for the Volga Federal District (1966-2018)

The y axis is the sum of active temperatures, x is years

Анализ рассчитанных значений КНЛТ многолетнего хода сумм температур, осредненных для ПФО, показывает, что во всех случаях наблюдается рост сумм положительных температур. Оценка трендов показала, что они статистически значимы на уровне значимости менее 1%. Значения КНЛТ меняются по территории в достаточно широком диапазоне, как это видно из табл. 1. В среднем по округу для периода с $CCT > 0^{\circ}C$ КНЛТ= $67^{\circ}C/10$ лет; для периода с $CCT > 5^{\circ}C$ КНЛТ= $65^{\circ}C/10$ лет; для периода с $CCT > 10^{\circ}C$ КНЛТ= $67^{\circ}C/10$ лет и для периода с $CCT > 15^{\circ}C$ КНЛТ= $61^{\circ}C/10$ лет. Во всех случаях теплообеспеченность по территории ПФО возрастает.

С использованием рассчитанных значений ГТК и индекса увлажненности Сапожниковой дана оценка повторяемости различных условий засушливости и переувлажненности на территории ПФО в период 1966-2018 гг. Как видно из рис. 7, увеличение значений ГТК за вегетационный период (май-август) происходит с юга на северо-восток рассматриваемой территории. Наибольшие значения ГТК наблюдаются на северо-востоке ПФО (Пермский край), а наименьшие на юге (Оренбургская область), что свидетельствует о переувлажнении севера и засушливости юга. ГТК возрастает с юга на север от 0.5 до 1.5.

Таблица 1. Сумма (Σ) положительных температур ($^{\circ}\text{C}$) за период со среднесуточной температурой (ССТ) выше 0, 5, 10 и 15°C

Table 1. The sum (Σ) of positive temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for the period with the average daily temperature (CMT) above 0, 5, 10 and 15°C

Станция	ССТ > 0°C		ССТ > 5°C		ССТ > 10°C		ССТ > 15°C	
	Σ , $^{\circ}\text{C}$	КНЛТ, $^{\circ}\text{C}/10$ лет	Σ , $^{\circ}\text{C}$	КНЛТ, $^{\circ}\text{C}/10$ лет	Σ , $^{\circ}\text{C}$	КНЛТ, $^{\circ}\text{C}/10$ лет	Σ , $^{\circ}\text{C}$	КНЛТ, $^{\circ}\text{C}/10$ лет
Лальск	2193	67	2065	66	1702	65	1072	49
Ныроб	2035	55	1915	58	1557	44	981	35
Киров	2450	64	2340	62	2007	68	1377	65
Пермь	2403	60	2294	61	1958	62	1346	43
Ижевск	2524	47	2420	44	2113	45	1501	33
Нижний Новгород	2756	80	2638	78	2329	86	1670	87
Казань	2835	93	2732	90	2450	91	1849	93
Бугульма	2644	64	2554	64	2271	68	1651	62
Уфа	2764	69	2662	66	2381	68	1769	60
Учалы	2327	43	2226	42	1903	40	1216	40
Пенза	3012	75	2907	73	2628	79	2007	72
Самара	3157	90	3060	86	2805	93	2257	98
Балашов	3220	74	3113	68	2833	75	2247	66
Перелюб	3261	57	3171	54	2925	59	2407	50
Оренбург	3284	69	3199	66	2963	68	2468	63
Зерносовхоз Озерный	2962	58	2888	59	2646	61	2115	56
Среднее по ПФО	2739	67	2637	65	2342	67	1746	61

Примечание. КНЛТ – коэффициент наклона линейного тренда, $^{\circ}\text{C}/10$ лет.

В мае повторяемость условий «очень засушливо» ($\text{ГТК} < 0.5$) меняется от 20 до 70%, а градация «засушливо, недостаточно влажно» ($0.5 \leq \text{ГТК} \leq 1.0$) по территории составила 20-50%. Повторяемость избыточного увлажнения ($\text{ГТК} > 1$) в мае изменяется от 13.2% на юге ПФО (Саратовская и Самарская области) до 49.1% на северо-востоке региона (Пермский край).

В июне «очень засушливые» условия наблюдаются в Оренбургской области (до 54.7%), на остальной части территории от 15.7 до 28.3%. Градация «засушливо, недостаточно влажно» в июне повторяется в пределах 18-40%. Повторяемость избыточного увлажнения в июне изменяется от 5-15% на

юге региона (Оренбургская область) до 77.4% на северо-востоке ПФО (Пермский край).



Рисунок 7. Распределение ГТК по территории ПФО за вегетационный период (май-август)

Figure 7. Distribution of the HTC on the territory of the Volga Federal District for the growing season (May-August)

В июле очень засушливые условия имеют повторяемость от 5.7% (Кировская область) до 47.2% (Оренбургская область), а на остальной части территории 10-25%. Повторяемость условий «засушливо», «недостаточно влажно» в июле составляет 20-50%. Повторяемость избыточного увлажнения в июле изменяется от 9.4% на юге ПФО (Саратовская область) до 66% на северо-востоке региона (Пермский край).

В августе условия «очень засушливо» наблюдаются в Оренбургской области с максимальной повторяемостью 71.7%, по мере продвижения на северо-восток ПФО происходит её уменьшение. На большей части территории повторяемость засух составляет 6-40%. Повторяемость условий «засушливо, недостаточно влажно» в августе составляет 30-50%, лишь на северо-востоке отмечаются её минимальные значения (~17%). Избыточное увлажнение в августе изменяется от 5.7% на юге ПФО (Оренбургская область) до 77.4% на северо-востоке (Пермский край).

Анализ рассчитанных значений КУ Сапожниковой показал, что избыточное увлажнение ($KУ > 1$) наиболее часто повторяется в северной части ПФО (рис. 8, табл. 2). Так, на станциях Ляльск и Нырб величина КУ более чем в 90% случаев характеризует условия избыточного увлажнения и лишь в

6-7% недостаточного. В то же время на юге ПФО условия недостаточного увлажнения практически возникают ежегодно (станции Перелюб, Оренбург и Зерносовхоз Озерный). Даже в центре ПФО (станция Казань) повторяемость условий недостаточного увлажнения составляет 73.6% (в 39 годах из 53).

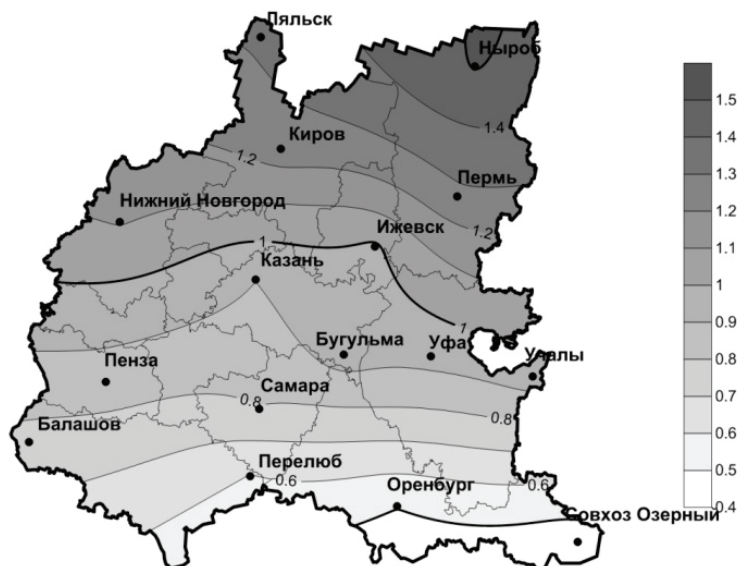


Рисунок 8. Осредненное значение КУ Сапожниковой (1966-2019гг.)

Figure 8. Average value of KU Sapozhnikova (1966-2019)

Дополнительно по данным станции Казань, ЦГМС для двух периодов 1966-2021 и 1976-2021 гг. рассчитывались коэффициенты увлажнения Сапожниковой (КУ) и гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК). Результаты расчётов представлены на рис. 9. Как видно из рис. 9 в обоих случаях наблюдается тенденция уменьшения рассматриваемых индексов, что свидетельствует о некотором возрастании засушливости в Татарстане. Представленные на рис. 9 линейные тренды КУ и ГТК не значимы для периода 1966-2021 гг. и значимы для периода 1976-2021 гг. на доверительном уровне не менее 2%. Кроме того, низкочастотные компоненты индексов имеют сходство. Следует отметить, что величина КНЛТ этих индексов в период 1976-2021 гг. втрое превышает КНЛТ, рассчитанного для периода 1966-2021 гг. Так, для периода 1966-2021 гг. КНЛТ КУ равен -0.02 ед./10 лет, КНЛТ ГТК = -0.037 ед./10 лет, а для периода 1976-2021 гг. значения КНЛТ равны соответственно: -0.061 ед./10лет и -0.112 ед./10лет. Среднее значение КУ для периода 1966-2021 гг. равно 0.98, ГТК 1.07. Практически величина ГТК близка к 1.0, что свидетельствует о сбалансированности прихода и расхода влаги.

Таблица 2. Повторяемость (%) и количество лет атмосферных условий увлажнения по КУ Сапожниковой

Table 2. Repeatability (%) and number of years of atmospheric conditions of moistening according to IS Sapozhnikova

Станции	Недостаточное увлажнение		Избыточное увлажнение	
	КУ<1		КУ>1	
	Количество лет	%	Количество лет	%
Лальск	4	7.5	49	92.5
Ныроб	3	5.7	50	94.3
Киров	7	13.2	46	86.8
Пермь	9	17.0	44	83.0
Ижевск	29	54.7	22	41.5
Нижний Новгород	15	28.3	38	71.7
Казань	39	73.6	14	26.4
Бугульма	29	54.7	23	43.4
Уфа	33	62.3	19	35.8
Учалы	28	52.8	25	47.2
Пенза	41	77.4	12	22.6
Самара	46	86.8	7	13.2
Балашов	44	83.0	8	15.1
Перелюб	52	98.1	1	1.9
Оренбург	53	100.0	0	0.0
Зерносовхоз Озерный	53	100.0	0	0.0
Среднее	30	57	22	42

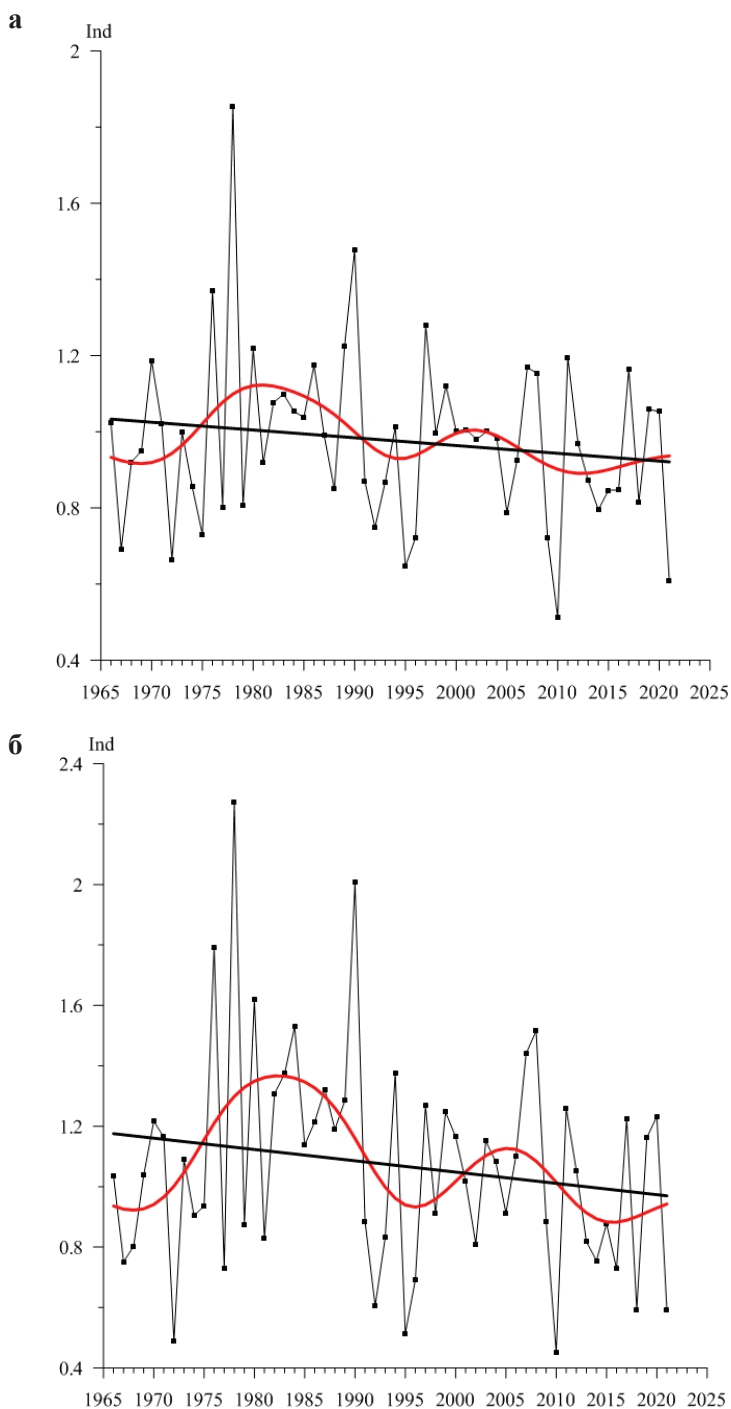


Рисунок 9. Многолетний ход коэффициента увлажнения Сапожниковой (IS IV_IX) (а) и гидро-термического коэффициента увлажнения Селянинова (ГТК) в Казани

Figure 9. Long-term variation of Sapozhnikova's moisture coefficient (IS IV_IX) (a) and Selyaninov's hydrothermal moisture coefficient (HTK) in Kazan

В заключении отметим, что в статье (Вильфанд и др., 2016) рассчитаны риски (вероятность, %) сильных засух ($ГТК \leq 0.60$) в мае, июне за период 1966-2015 гг. для субъектов Центрального и Приволжского федеральных округов. Сравнение этих данных с полученными авторскими результатами расчетов условий «очень засушливо» ($ГТК \leq 0.5$) для периода 1966-2018 гг. показывает, что более часто в обоих случаях сильные засухи на территории ПФО происходят в мае, чем в июне (за исключением станции Зерносовхоз Озерный). В августе вероятность сильной засухи в северной части ПФО невелика, в то же время она значительна на юго-востоке региона (достигает 50%) (рис. 10).



Рисунок 10. Повторяемость случаев со значением $ГТК < 0,5$ («очень засушливо») по территории ПФО за период май-сентябрь (1966-2018 гг.),%

Figure 10. The frequency of cases with the HTC value < 0.5 (“very dry”) in the territory of the Volga Federal District for the period May-September (1966-2018),%

Основные результаты

1. Солнечная радиация, имеющая годовой ход, обеспечивает энергетическую потребность сельскохозяйственных культур в вегетационный период на территории ПФО: в июне-июле на горизонтальную поверхность при ясном небе поступает до $780-850 \text{ МДж/м}^2$ прямой солнечной радиации, максимальный поток суммарной радиации в южных районах ПФО в летние месяцы достигает $650-750 \text{ МДж/м}^2$, величина средней многолетней суммы ФАР за вегетационный период в центре ПФО достигает 1300 МДж/м^2 . Продолжительность солнечного сияния

- на юге ПФО в июле достигает 330-345 часов, что составляет 70-75% от возможной продолжительности солнечного сияния.
2. Переход среднесуточных температур воздуха через 0°C весной на территории ПФО происходит в среднем на 91 сутки от начала года и завершается осенью на 304 сутки, продолжительность теплого периода в среднем составляет 213 суток. При этом наблюдается значительное широтное различие между рассматриваемыми показателями на территории ПФО. Средняя продолжительность периодов с ССТ, превышающими 5, 10 и 15°C , на территории ПФО составляет соответственно 172, 143 и 101 день. Показатели КНЛТ показывают, что весной отмечается положительная тенденция более раннего наступления теплого периода, а осенью более позднего завершения. Продолжительность теплого периода возрастает.
 3. Сумма активных температур ($\text{ССТ} > 10^{\circ}\text{C}$) возрастает с северо-востока от 1557°C до 2963°C при среднем значении по региону 2342°C . При этом скорость возрастания суммы активных температур в среднем по округу составляет $67^{\circ}\text{C}/10$ лет, колеблясь по территории от 40 до $93^{\circ}\text{C}/10$ лет. В среднем по региону сумма температур при $\text{ССТ} > 0^{\circ}\text{C}$ составляет 2739°C , возрастая с северо-востока от 2035°C до 3261°C на юге; сумма температур при $\text{ССТ} > 5^{\circ}\text{C}$ в среднем составляет 2637°C , возрастая с севера на юг от 1915°C до 3199°C ; сумма температур при $\text{ССТ} > 15^{\circ}\text{C}$ составляет в среднем 1746°C , возрастая от 981°C до 2468°C . Скорость роста сумм температур в среднем по территории соответственно равны 67, 65 и $61^{\circ}\text{C}/10$ лет.
 4. Дана оценка повторяемости засушливых и переувлажненных условий погоды по ГТК и Сапожниковой на территории ПФО для различных месяцев. Показано, что индексы ГТК и Сапожниковой имеют высокую степень корреляции. Коэффициенты наклона линейного тренда индексов ГТК и Сапожниковой свидетельствуют о слабой (значимой с 1976 г.) тенденции роста засушливости в регионе.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ и Кабинета Министров Республики Татарстан в рамках научного проекта № 22-27-20080.

Список литературы

Береза, О.В., Страшная, А.И., Лупян, Е.А. (2015) О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 12, № 1, с. 20-35.

Вильфанд, Р.М., Страшная, А.И., Береза, О.В. (2016) О динамике агрометеорологических показателей условий сева, зимовки и формирования уро-

жая основных зерновых культур, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 360, с. 45-78.

Грингоф, И.Г., Пасечнюк, А.Д. (2005) *Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения*, СПб., Гидрометеиздат, 551 с.

Логинов, В.Ф., Хитриков, М.А. (2021) Оценка изменений биоклиматического потенциала территории Беларуси с использованием вегетационного индекса NDVI, *Журнал Белорусского государственного университета. Серия География. Геология*, вып. 1, с. 3-12.

Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем (2012) Под ред. С.М. Семенова, Москва, Росгидромет, 508 с.

Павлова, В.Н., Караченкова, А.А. (2016) Наблюдаемые изменения климата и динамика агроклиматических ресурсов в XX-XXI столетиях на территории Приволжского федерального округа, *Труды ГГО*, вып. 583, с. 112-128.

Педь, Д.А. (1951) Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 38-39.

Переведенцев, Ю.П., Васильев, А.А., Шерстюков, Б.Г., Шанталинский, К.М. (2021) Климатические изменения на территории России в конце XX – начале XXI века, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 14-26.

Переведенцев, Ю.П., Мирсаева, Н.А. (2021) Становление и развитие метеорологических наблюдений и климатических исследований в Казанском университете, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 4, с. 5-25, doi:10.21513/2410-8758-2021-4-5-25.

Переведенцев, Ю.П., Соколов, В.В., Наумов, Э.П. (2013) *Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа*, Казань, Казанский ун-т, 272 с.

Переведенцев, Ю.П., Хабутдинов, Ю.Г., Гизатуллин, Р.Д., Алтухова, А.В. (2017) Агрометеорологические условия Приволжского федерального округа, *Российский журнал прикладной экологии*, вып. 1, с. 3-8.

Переведенцев, Ю.П., Шерстюков, Б.Г., Мирсаева, Н.А., Шанталинский, К.М., Гурьянов, В.В. (2022) Тенденция изменения основных климатических показателей на территории Приволжского федерального округа в XIX – XXI веках, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 63-91.

Переведенцев, Ю.П., Шерстюков, Б.Г., Шанталинский, К.М., Гурьянов, В.В., Аухадеев, Т.Р. (2020) Климатические изменения в Приволжском федеральном округе в XIX-XXI веках, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 36-46.

Страшная, А.И., Барталев, С.А., Максименко, Т.А., Чуб, О.В. (2014) Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа, *Труды ГМЦ*, вып. 351, с. 85-107.

Фролов, А.В., Страшная, А.Н. (2011) *О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур*, Сборник докладов, Москва, Триада ЛТД, с. 22-31.

Черенкова, Е.А. (2017) Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики, *Известия РАН. Серия Географическая*, № 5, с. 72-81.

References

Bereza, O.V., Strashnaya, A.I., Lupyan, E.A. (2015) О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных [On the possibility of forecasting the yield of winter wheat in the Middle Volga region based on the integration of ground and satellite data], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 12, no. 1, pp. 20-35.

Vil'fand, R.M., Strashnaya, A.I., Bereza, O.V. (2016) О динамике агрометеорологических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур [On the dynamics of agrometeorological indicators of the conditions of sowing, wintering and formation of the harvest of the main grain crops], *Trudy Gidrometcentra Rossii*, issue 360, pp. 45-78.

Gringof, I.G., Pasechniuk, A.D. (2005) *Agrometeorology and agrometeorological observations* [Agrometeorologiya i agrometeorologicheskie nablyudeniya], Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, 551 p.

Loginov, V.F., Hitrikov, M.A. (2021) Оценка изменений биоклиматического потенциала территории Беларуси с использованием вегетационного индекса NDVI [Assessment of changes in the bioclimatic potential of the territory of Belarus using the NDVI vegetation index], *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geografiya. Geologiya*, issue 1, pp. 3-12.

Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh system [Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems] (2012) In S.M. Semenov, Rosgidromet, Moscow, Russia, 508 p.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A. (2016) Nablyudaemye izmeneniya klimata i dinamika agroklimaticheskikh resursov v XX – XXI stoletiyah na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga [Observed climate changes and dynamics of agro-climatic resources in the XX-XXI centuries on the territory of the Volga Federal District], *Trudy GGO*, issue 583, pp. 112-128.

Ped', D.A. (1951) Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения [On determining the dates of stable transition of air temperature through certain values], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 38-39.

Perevedencev, Yu.P., Vasil'ev, A.A., Sherstyukov, B.G., Shantalinskij, K.M. (2021) Klimaticheskie izmeneniya na territorii Rossii v konce XX – nachale XXI veka [Climatic changes in Russia at the end of the 20th – beginning of the 21st century], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 14-26.

Perevedencev, Yu.P., Mirsaeva, N.A. (2021) Formation and development of meteorological observations and climate research at Kazan University [Stanovlenie i razvitie meteorologicheskikh nablyudeniy i klimaticheskikh issledovaniy v Kazanskom universitete], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 4, pp. 5-25, doi:10.21513/2410-8758-2021-4-5-25.

Perevedencev, Yu.P., Sokolov, V.V., Naumov, E.P. (2013) *Climate and Environment in Volga Federal Region* [Klimat i okruzhayushchaya sreda Privolzhskogo federal'nogo okruga], Kazanskij un-t, Kazan', Russia, 272 p.

Perevedencev, Yu.P., Habutdinov, Yu.G., Gizatullin, R.D., Altuhova, A.V. (2017) Agrometeorologicheskie usloviya Privolzhskogo federal'nogo okruga [Agrometeorological conditions of the Volga Federal District], *Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii*, issue 1, pp. 3-8.

Perevedencev, Yu.P., Sherstyukov, B.G., Mirsaeva, N.A., Shantalinskij, K.M., Gur'yanov, V.V. (2022) Tendenciya izmeneniya osnovnykh klimaticheskikh pokazatelej na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga v XIX-XXI vekah [The trend of changes in the main climatic indicators on the territory of the Volga Federal District in the XIX-XXI centuries], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 2, pp. 63-91.

Perevedencev, Yu.P., Sherstyukov, B.G., Shantalinskij, K.M., Gur'yanov, V.V., Auhadeev, T.R. (2020) Klimaticheskie izmeneniya v Privolzhskom federal'nom okruge v XIX-XXI vekah [Climate change in the Volga Federal District in the 19th – 21st centuries], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 36-46.

Strashnaya, A.I., Bartalev, S.A., Maksimenko, T.A., Chub, O.V. (2014) Agrometeorologicheskaya ocenka sostoyaniya ozimyh zernovykh kul'tur v period prekrashcheniya vegetacii s ispol'zovaniem nazemnykh i sputnikovyx dannyh na primere Privolzhskogo federal'nogo okruga [Agrometeorological assessment of the state of winter crops during the period of cessation of vegetation using ground and satellite data on the example of the Volga Federal District], *Trudy GMC*, issue 351, pp. 85-107.

Frolov, A.V., Strashnaya, A.N. (2011) *O zasuhe 2010 goda i ee vliyaniy na urozhajnost' zernovykh kul'tur* [On the 2010 drought and its impact on grain crop yields], Sbornik dokladov, Triada LTD, Moscow, Russia, pp. 22-31.

Cherenkova, E.A. (2017) Sezonnnye osadki na territorii Vostochno-Evropejskoj ravniny v periody teplyh i holodnyh anomalij temperatury poverhnosti Severnoj Atlantiki [Seasonal precipitation on the territory of the East European Plain during periods of warm and cold anomalies in the surface temperature of the North Atlantic], *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, no. 5, pp. 72-81.

Статья поступила в редакцию (Received): 09.09.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 14.09.2022.

Принята к публикации (Accepted): 16.09.2022.

Для цитирования / For citation:

Переведенцев, Ю.П., Павлова, В.Н., Парубова, Е.М., Мирсаева, Н.А., Николаев, А.А., Шанталинский, К.М. (2022) Современные тенденции изменения агроклиматических ресурсов на территории Приволжского федерального округа, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 4, с. 477-501, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-477-501.

Perevedentsev, Yu.P., Pavlova, V.N., Parubova, E.M., Mirsaeva, N.A., Nikolaev, A.A., Shantalinsky, K.M. (2022) Current trends in agroclimatic resources in Volga Federal District, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 4, pp. 477-501, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-477-501.