

УДК 551.583(470.5)

**ПОТЕНЦИАЛ ИСПАРЕНИЯ НА УРАЛЕ
В СВЕТЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА****А. А. Васильев, Д. Ю. Нохрин, Н. В. Глаз, Л. В. Уфимцева, В. И. Путятин**

В статье приводятся результаты климатических исследований по 14 метеостанциям Уральского региона за период 1966–2020 гг. Методом динамического моделирования дана оценка изменению относительной влажности воздуха, показателя испаряемости и климатического показателя увлажнения местности Томлейна. Приводятся среднегодовые значения, а также значения, рассчитанные на период вегетации растений. С использованием рандомизационного варианта критерия Уилкоксона для разностей пар установлено, что среднегодовая относительная влажность уменьшилась за изученный период на 1,3% ($P = 0,049$), испаряемость за год увеличилась на 77 мм или 14,1% ($P = 0,001$). Показатель увлажнения за вегетационный период изменился со 139,5 мм (преимущественно сухая местность) до 186,0 мм (очень сухая) или на 33,3% ($P = 0,020$). С использованием пространственной интерполяции методом ординарного кригинга построены карты распределения показателей на 1966 и 2020 годы. Все они показывают вхождение на Урал клина более сухого климата с юго-востока в северо-западном направлении, доходящего до г. Екатеринбурга и далее. При этом наибольшее иссушение местности наблюдается на юге Челябинской области. По климатическому показателю увлажненности территорий Уральского региона 4 зоны Челябинской области, 3 – Курганской и 3 – Свердловской области попадают в категорию очень сухих территорий, что составляет 71,4%. Здесь дефицит осадков по отношению к испаряемости за вегетацию превышает 150 мм. В категории умеренно-сухих находятся 2 зоны, умеренно-влажных – 2 и только 1 (Златоуст) – в категории преимущественно влажных территорий.

Ключевые слова: изменение климата, относительная влажность, испаряемость, климатический показатель увлажнения, тренд, кригинг, карты.

Глобальное изменение климата – важная научная проблема современности, от решения которой во многом зависит будущее человеческой цивилизации [1]. Непосредственное влияние глобального потепления климата на сельскохозяйственное производство обуславливает актуальность проведения климатических исследований [2–4]. Необходимо выявить региональные закономерности изменения локального климата и разработать упреждающие меры, направленные на снижение ущерба от потепления и эффективное использование положительных сторон этого процесса [5]. Общим недостатком климатических исследований на Южном Урале является то, что они не учитывают изменение относительной влажности воздуха, сосредотачиваясь на температуре воздуха и сумме осадков [6–9].

Относительная влажность воздуха формируется под влиянием температуры воздуха (связанной с радиационным режимом), суммы осадков, общей и местной циркуляции атмосферы, облачности и ветра [10]. Поэтому ее изменение может оказать существенное влияние на продукционный процесс культур. Чем ниже влажность воздуха, тем выше испаряемость воды с поверхности водоемов, почвы и растений. Испарение воды с поверхности растений в свою очередь играет большую роль в жизнедеятельности возделываемых культур. Во-первых, испарение с поверхности растения понижает его температуру и является верхним насосом, обеспечивающим работу корневой системы. Во-вторых, вода, поднимаемая из почвы корнями, представляет собой раствор различных минеральных солей, который служит для питания

и роста растения. В-третьих, от испаряемости через интенсивность процесса транспирации, определяющегося водоудерживающей способностью тканей, зависит водный обмен ткани и, соответственно, все жизненные процессы в растении, в том числе свойство переносить неблагоприятные условия внешней среды [11]. Кроме относительной влажности воздуха важную информацию о содержании влаги и ее испарении дают показатель испарения и климатический показатель увлажнения. **Цель исследований** – провести анализ изменения этих показателей на территории Челябинской области за период 1966–2020 гг.

Материал и методы исследования

Материалом для исследования послужили данные метеостанции «Челябинск, город» для г. Челябинска и временные ряды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных – для остальных населенных пунктов [12]. Анализировали относительную влажность воздуха и температуру, с использованием значений которых рассчитывали испаряемость и климатический показатель увлажнения за год и за вегетационный период.

Обработка данных и нахождение закономерностей в динамике отдельных показателей проводились в программе Excel с использованием методов динамического моделирования [13]. Для оценки статистической значимости изменения показателей от начального значения Y_0 до конечного Y_t использовали точный рандомизационный (Exact permutation) вариант критерия Уилкоксона для разностей пар; при этом значимыми считали различия при $P \leq 0,05$. Интерполяцию пространственных данных проводили методом ординарного кригинга. Расчеты и графические построения выполнены в пакетах PAST (version 4.03 [14]) и 3DField (version 4.5.2.0 [15]).

Результаты и их обсуждение

Относительная влажность воздуха. Исследование методом динамического моделирования показало, что среднегодовая относительная влажность воздуха в Верхотурье за анализируемый период увеличилась на 1,8%, Верхнеуральске – на 1,7%, в Туринске – на 1,5%, Красноуфимске – на 0,9%. Практически не изменился этот показатель в Шадринске (–0,1%) и Ивделе (–0,4%). Тогда как в Екатеринбурге средняя за год влажность воздуха уменьшилась

Таблица 1 – Изменение относительной влажности воздуха на Урале за период 1966–2019 гг.

Метеостанция	Среднегодовая относительная влажность воздуха, %			Относительная влажность воздуха за вегетацию (май-сентябрь), %		
	Y_0	Y_t	Тренд	Y_0	Y_t	Тренд
Ивдель	73,4	73,0	–0,4	66,5	65,8	–0,7
Верхотурье	72,6	74,4	1,8	70,1	72,4	2,3
Туринск	74,7	76,3	1,5	71,0	75,2	4,2
Екатеринбург	70,8	69,7	–1,1	67,2	65,2	–2,0
Верхнее Дуброво	74,5	71,2	–3,3	71,6	69,0	–2,6
Красноуфимск	74,7	75,6	0,9	71,0	72,7	1,7
Шадринск	71,9	71,8	–0,1	66,9	67,6	0,7
Курган	73,6	71,6	–2,0	68,2	64,8	–3,4
Златоуст	77,9	74,6	–3,3	73,8	72,1	–1,7
Челябинск*	72,1	69,2	–2,9	58,7	53,2	–5,5
Макушино	75,2	71,0	–4,2	68,3	64,4	–3,9
Троицк	71,0	68,4	–2,6	62,6	60,3	–2,3
Верхнеуральск*	70,8	72,5	1,7	64,6	68,7	4,1
Бреды	71,5	67,1	–4,4	61,0	56,6	–4,4
Среднее значение	73,2	71,9	–1,3	67,3	66,3	–1,0
Значимость различий	$W = 84,0; P = 0,049$			$W = 70,5; P = 0,274$		

* Челябинск – за период 1966–2020 гг., Верхнеуральск – за 1971–2019 гг.



на 1,1%, в Кургане – на 2,0%, в Троице – на 2,6%, в Челябинске – на 2,9%, в Верхнем Дуброве и Златоусте – на 3,3%, в Макушино – на 4,2%, а в Бредах – на 4,4% (табл. 1).

В целом по всем 14 метеостанциям среднегодовая относительная влажность воздуха на Урале за анализируемый период статистически значительно уменьшилась (в среднем на 1,3%). Описанные изменения наглядно представлены на рисунке 1. Из него видно, что помимо общего снижения влажности, особенно в южной зоне, существенно повысился контраст распределения влаги с появлением зоны высокой влажности в северо-восточной части рассматриваемой территории. Сходная картина наблюдалась и по влажности за период вегетации, однако данные различия были менее выражены и не были статистически значимыми.

Испаряемость. В данной статье под испаряемостью (потенциалом испарения) мы понимаем условную величину, характеризующую максимально возможное испарение при метеорологических условиях местности, если бы запас влаги был неограничен. Испаряемость выражается в миллиметрах слоя испарившейся воды и отличается от фактического испарения, которое ограничивается содержанием воды в почве.

Испаряемость рассчитывается по формуле Н. Н. Иванова:

$$E = 0,0018 \cdot (t + 25)^2 \cdot (100 - a),$$

где E – испаряемость, мм;

t – температура воздуха;

a – относительная влажность воздуха.

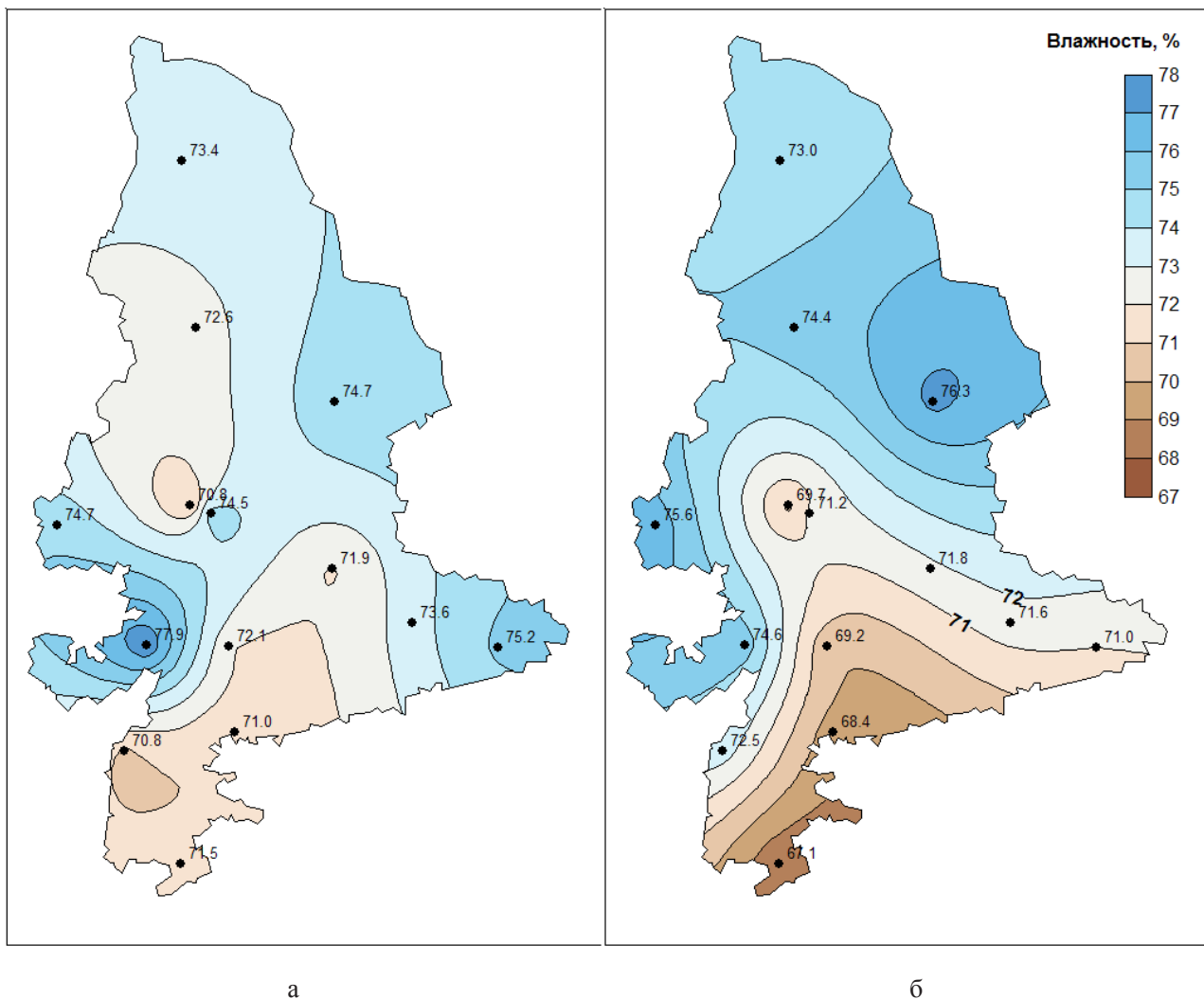


Рис. 1. Изменение среднегодовой относительной влажности воздуха с 1966 г. (а) к 2019 г. (б)

Расчет показателя испаряемости показал, что иссушающая способность воздуха в большинстве метеорологических пунктов Уральского региона увеличивается. В наибольшей степени годовая испаряемость увеличилась в Челябинске на (183 мм) и Бредах (на 175 мм). Больше чем на 100 мм выросла суммарная испаряемость в Кургане и Екатеринбурге. Далее в порядке убывания следуют: Верхнее Дуброво (увеличение на 93 мм), Шадринск (на 92 мм), Златоуст (на 89 мм), Троицк (на 88 мм), Макушино (на 78 мм) и Ивдель (на 64 мм). В Красноуфимске и Верхотурье прибавка от 13 до 20 мм (табл. 2).

Единственным пунктом, где произошло выраженное снижение суммарного показателя испаряемости, является Верхнеуральск. Этот показатель здесь уменьшился за анализируемый период на 43 мм. В Туринске испаряемость изменилась незначительно.

В целом за рассматриваемый период времени произошло статистически значимое увеличение показателя испаряемости на Урале (в среднем на 77,4 мм). Как видно из рисунка 2, рост испаряемости носил сходный с измене-

нием влажности клиновидный характер: с юго-востока на северо-запад территории.

Иссушающая способность воздуха за вегетационный период (май-сентябрь) в наибольшей степени увеличилась за 1966–2020 гг. на широте Челябинска – на 131 мм. Далее по убывающей расположились пункты: Бреды, где прибавка испаряемости составила 135 мм, Курган – 94, Екатеринбург – 86, Верхнее Дуброво – 66, Макушино – 59, Троицк – 57, Златоуст – 56, Ивдель – 43 и Шадринск – 26 мм. Практически не изменился этот показатель в Верхотурье и Красноуфимске. Тогда как в Туринске и Верхнеуральске испаряемость за вегетацию снизилась на 31 и 62 мм соответственно. В среднем по территории испаряемость за вегетационный период с 60–70-х гг. статистически значимо увеличилась на 46,5 мм.

Увлажнение. На Урале главным критерием для оценки условий произрастания культурных растений в течение вегетационного периода является водный баланс местности, то есть разность между поступлением воды с осадками и расходом ее на испарение [11]. Гидротермический коэффициент Селянинова для

Таблица 2 – Изменение испаряемости на Урале за 1966–2019 гг.

Метеостанция	Суммарная испаряемость за год, мм			Испаряемость за вегетационный период (май-сентябрь), мм		
	Y_0	Y_t	Тренд	Y_0	Y_t	Тренд
Ивдель	446,1	510,0	63,9	344,6	387,3	42,7
Верхотурье	505,4	518,4	13,0	382,7	384,7	2,0
Туринск	492,8	482,7	-10,1	385,2	354,5	-30,7
Екатеринбург	585,6	697,1	111,5	436,0	522,4	86,4
Верхнее Дуброво*	507,1	600,0	92,9	374,2	440,2	66,0
Красноуфимск	497,3	517,1	19,8	391,9	390,9	-1,0
Шадринск	576,9	668,7	91,8	470,5	496,4	25,8
Курган	564,1	693,3	129,2	451,8	546,1	94,4
Златоуст	426,5	515,7	89,2	326,0	381,5	55,5
Челябинск*	567,7	751,2	183,5	441,5	573,0	131,5
Макушино*	595,6	674,0	78,3	478,2	537,4	59,2
Троицк	599,9	687,8	87,9	480,4	537,1	56,7
Верхнеуральск*	594,0	551,1	-42,9	476,5	414,6	-61,8
Бреды	701,0	876,4	175,4	589,0	713,7	124,8
Среднее значение	547,1	624,5	77,4	430,6	477,1	46,5
Значимость различий	$W = 100,0; P = 0,001$			$W = 91,0; P = 0,013$		

* Челябинск – за период 1966–2020 гг., Верхнеуральск и Верхнее Дуброво – за 1971–2019 гг., Макушино – за 1985–2019 гг.



такой оценки не подходит, поскольку в формуле используется сумма температур воздуха. С этой целью нами предлагается применять коэффициенты увлажнения, рассчитанные на период вегетации. Подобных коэффициентов предложено достаточно много: радиационный индекс сухости Будыко, индекс засушливости де Мартона, коэффициент засушливости Горчинского, коэффициент влажности Ангстрема, коэффициент увлажнения Высоцкого – Иванова, индекс эффективности осадков и коэффициент увлажнения Торнтвейта и др. В данной работе мы использовали климатический показатель увлажнения местности Томлейна [16], представляющий собой разность между испаряемостью и количеством выпавших осадков за изучаемый период:

$$K = E - R,$$

где K – климатический показатель увлажнения (мм);

E – испаряемость, мм;

R – количество осадков, мм.

Шкала для оценки увлажненности местности по Томлейну (мм): более 150 – очень сухая; от 101 до 150 – преимущественно сухая; от 51 до 100 – умеренно сухая; от 1 до 50 – умеренно увлажненная; от 0 до –50 – преимущественно увлажненная; от –50 до –100 – влажная; и менее –100 – очень влажная.

Расчет климатического показателя по 14 метеостанциям Уральского региона показал, что на Урале лишь один район является преимущественно влажным (Златоуст, климатический

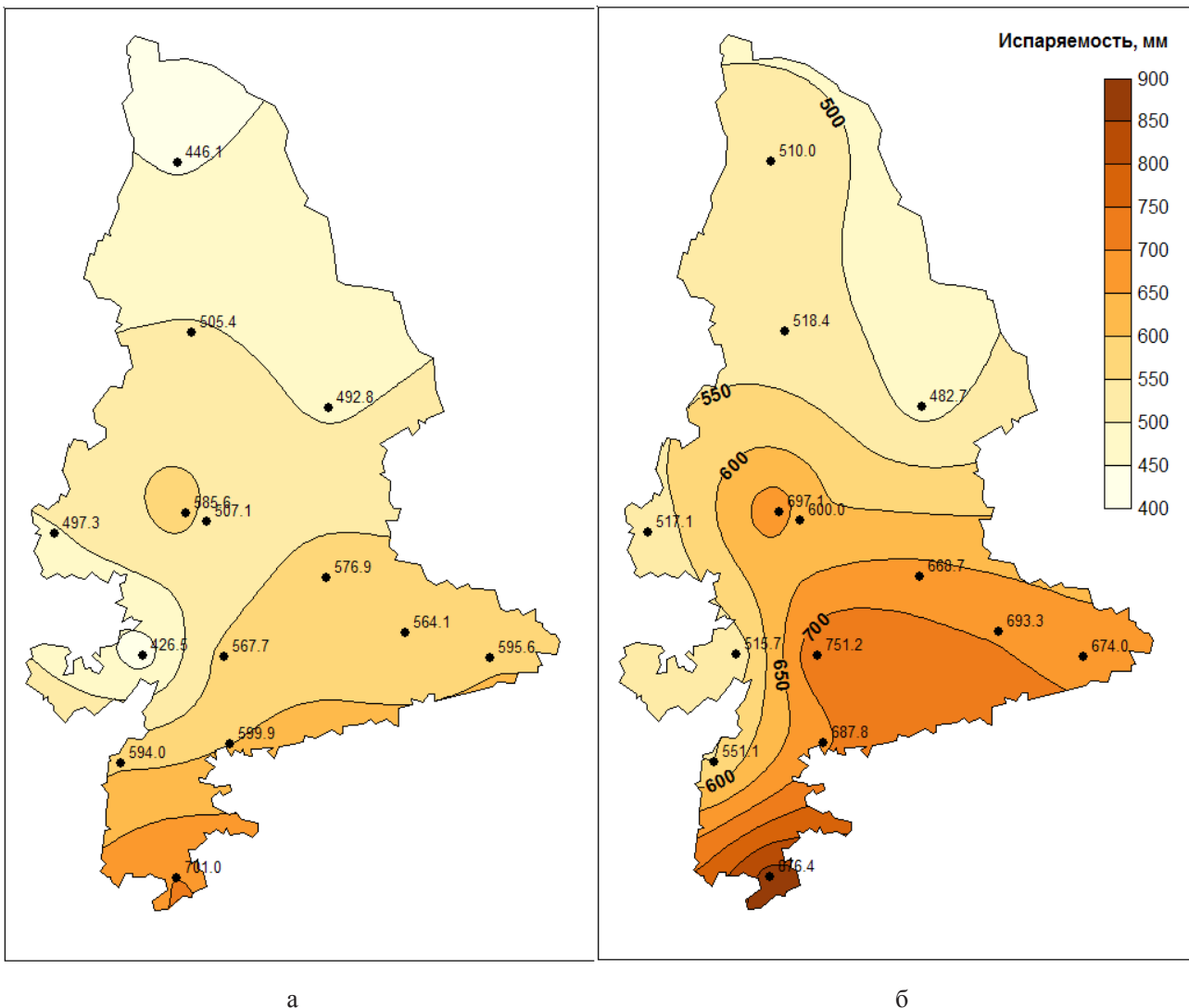


Рис. 2. Изменение суммарной годовой испаряемости на Урале с 1966–1971 гг. (а) к 2019–2020 гг. (б)

показатель в среднем за 1966–2019 гг. равен –50). Два района попали в категорию умеренно-влажных (Туринск и Верхнее Дуброво), один район умеренно сухой (Ивдель), а все остальные районы попадают в категорию очень сухих. Более того, засушливость большинства районов продолжает увеличиваться: Бреды – на 174 мм, Челябинск – на 128 мм, Курган – на 91 мм, Троицк – на 81 мм, Макушино – на 61 мм, Екатеринбург – на 51 мм, Верхотурье – на 34 мм, Шадринск – на 19 мм (табл. 3).

За последние полвека увлажненность горно-лесной зоны Челябинской области (Златоуст) по климатическому показателю перешла из категории «влажная» в категорию «преимущественно влажная», территория вблизи Верхнего Дуброва из категории «умеренно влажной» в категорию «умеренно сухой». Увлажненность местности вблизи Туринска, наоборот, повысилась и из «умеренно сухой» перешла в категорию «преимущественно влажная» (рис. 3). В целом следует констатировать статистически значимое изменение увлажненности на Урале за изученный период ($P = 0,020$) в сторону увеличения площадей более сухих территорий.

Заключение

Исследования показали, что глобальное изменение климата существенно влияет на относительную влажность воздуха, а как следствие – на иссушающую способность воздуха. В большинстве районов Урала потенциал испарения (за 1966–2020 гг.) увеличился: в Челябинске на 183 мм, в Бредах – на 175 мм, в Кургане – на 129 мм, в Екатеринбурге – на 111 мм, в Верхнем Дуброво – на 93 мм, в Шадринске – на 92 мм, в Златоусте – на 89 мм, в Троицке – на 88 мм, в Макушино – на 78 мм, в Ивделе – на 64 мм. Незначительная прибавка влаги отмечается в Красноуфимске (20 мм) и Верхотурье (13 мм). Снижение (на 43 мм) отмечено на широте Верхнеуральска.

По климатическому показателю увлажненности 10 районов Уральского региона (из 14) оказались в категории очень сухих территорий (по причине высокой и возрастающей под влиянием глобального потепления климата испаряемости воздуха). Один район (Ивдель) попал в категорию умеренно-сухих территорий, два (Туринск и Верхнее Дуброво) – в категорию умеренно-влажных, один район (Златоуст) относится к преимущественно влажным территориям.

Таблица 3 – Изменение климатического показателя увлажнения вегетационного периода на Урале за 1966–2019 гг. (мм)

Метеостанция	Климатический показатель увлажнения, мм			
	Y_0	Y_t	Среднее	Тренд
Ивдель	79,9	84,1	82,0	4,2
Верхотурье	140,2	173,7	156,9	33,5
Туринск	69,6	–5,0	32,3	–74,6
Екатеринбург	136,7	187,9	162,3	51,1
Верхнее Дуброво*	29,4	65,6	47,5	36,2
Красноуфимск	148,8	161,2	155,0	12,4
Шадринск	158,7	177,5	168,1	18,7
Курган	126,4	217,5	171,9	91,2
Златоуст	–97,1	–3,0	–50,0	94,1
Челябинск*	159,7	287,4	223,6	127,7
Макушино*	142,4	203,1	172,8	60,7
Троицк	241,7	322,4	282,1	80,7
Верхнеуральск*	237,2	178,4	207,8	–58,7
Бреды	379,2	553,2	466,2	174,1
Среднее значение	139,5	186,0	162,8	46,5
Значимость различий	$W = 89,0; P = 0,020$			

* Челябинск – за период 1966–2020 гг., Верхнеуральск и Верхнее Дуброво – за 1971–2019 гг., Макушино – за 1985–2019 гг.



Список литературы

1. Иванов А. Л. Глобальное изменение климата и его влияние на сельское хозяйство // Земледелие. 2009. № 1. С. 3–5.

2. Зейналов А. С. Экологические и фитосанитарные последствия изменения климата в насаждениях плодовых культур // Успехи современной науки. 2017. Т. 2. № 9. С. 94–100.

3. Кошкин Е. И., Андреева И. В., Гусейнов Г. Г. Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам // Агрехимия. 2019. № 12. С. 83–96. DOI: 10.1134/S0002188119120068.

4. Envisioning present and future land-use change under varying ecological regimes and their

influence on landscape stability / M. Prokopová [et al.] // Sustainability. 2019. Т. 11. № 17. С. 4654. DOI: 10.3390/su11174654.

5. Федотова Л. С., Кравченко А. В. В изменяющихся климатических условиях нужны новые подходы к возделыванию картофеля // Картофель и овощи. 2011. № 2. С. 20–22.

6. Глаз Н. В., Васильев А. А. Изменение климата // Дальневосточный аграрный вестник. 2018. № 4 (48). С. 32–39.

7. Васильев А. А. Влияние глобального потепления на климат Южного Урала // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 4. С. 77–78.

8. Long-term tendencies in climate change of the Urals due to global warming / A. A. Vasiliev,

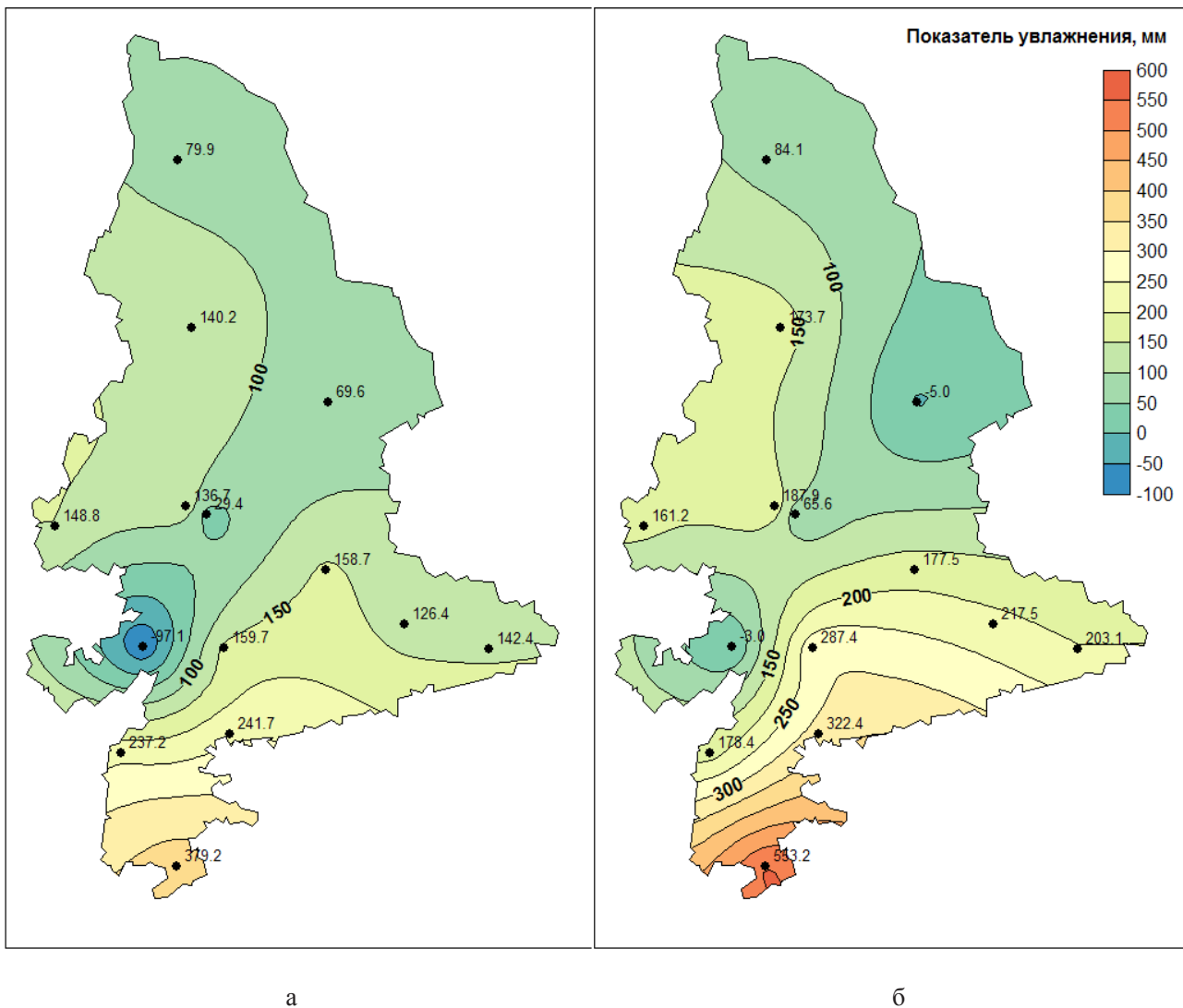


Рис. 3. Изменение климатического показателя увлажнения вегетационного периода на Урале в 1966–1985 гг. (а) к 2019–2020 гг. (б)

L. V. Ufimtseva, N. V. Glaz, D. Yu. Nokhrin // E3S Web of Conferences 222, 05001 (2020). DAIC 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202022205001.

9. Nesterenko Yu. M., Solomatin N. V., Khalin A. V. Climate and weather of the Southern Urals and their influence on agronomy // E3S Web of Conferences 222, 05015 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202022205015.

10. Хаустович И. П., Пугачев Г. Н. Оценка состояния растений по показателю испаряемости воздуха // Основы повышения продуктивности агроценозов : матер. Междунар. науч.-практ. конф. Мичуринск – Научоград РФ, 2015. С. 433–436.

11. Хаустович И. П., Пугачев Г. Н. Методики определения состояния растений по показателям погоды. Мичуринск – Научоград РФ, 2009. 26 с.

12. Веселов В. М., Прибыльская И. Р. Описание массива данных среднемесячной относительной

влажности воздуха на станциях России. Режим доступа : <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения 02.02.2021).

13. Динамическое моделирование при обработке экспериментальных данных / Н. А. Полев, В. В. Юрашев, И. С. Шатилов, А. Г. Замараев // Агрехимический вестник. 2001. № 1. С. 34–36.

14. Hammer O., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V.4. № 1. P. 9. Access mode : http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

15. Galouchko V. Contour maps software 3DField and 3DSurface. 2012. Access mode : <http://3dfmaps.com> (дата обращения: 05.02.2021).

16. Погода и урожай / пер. с чешск. З. К. Благовещенский. М. : Агропромиздат, 1990. 332 с.

Васильев Александр Анатольевич, д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник отдела картофелеводства, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: kartofel_chel@mail.ru.

Нохрин Денис Юрьевич, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории инструментальных методов исследований, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: nokhrin8@mail.ru.

Глаз Николай Владимирович, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, руководитель ЮУНИИСК – филиала ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: uniisk@mail.ru.

Уфимцева Лариса Викторовна, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией инструментальных методов исследований, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: lora708@yandex.ru.

Путятин Владимир Ильич, научный сотрудник отдела садоводства, Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

E-mail: kartofel_chel@mail.ru.

* * *