

**ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГОДОВОГО КОЛИЧЕСТВА
ТВЕРДЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
ПО ДАННЫМ ИХ СКОРРЕКТИРОВАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ
ЗА ПЕРИОД 1936–2021 гг.**

О.А. Мясникова

*ФГБУ «Главная Геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»
(ФГБУ «ГГО»), Санкт-Петербург*

Современная методика корректировки измеренных осадков позволяет получить их значения, свободные от основных составляющих систематической погрешности стандартных осадкомерных приборов (осадкомера Третьякова и дождемера с защитой Нифера), вызванной аэродинамическими свойствами приборов, процессами испарения, конденсации и смачивания в осадкосборнике, а также количеством «ложных» осадков, попадающих в прибор во время общей и низовой метелей. Применение данной методики решает вопрос о получении однородных временных (годовых, сезонных или иных) рядов скорректированных осадков за весь период инструментальных наблюдений.

На основе новой методики рассчитаны скорректированные годовые абсолютные и относительные значения твердых осадков и получены их статистически однородные ряды для сети климатических станций Росгидромета за период с 1936 по 2021 г. Рассчитаны и проанализированы временные тренды твердых осадков, оценен их вклад в величину изменений общих годовых сумм осадков по территории Западной Сибири. Рассмотрена связь между изменением температуры воздуха в период выпадения твердых осадков и их годовыми суммами.

Полученные в ходе исследования результаты изменений, происходящих в режиме увлажнения в холодный период территории Западной Сибири, представляют научный интерес, в том числе при разработке адаптационных мер к изменению и изменчивости климата.

Ключевые слова: климат, твердые осадки, однородность рядов наблюдений, корректировка осадков, временные изменения.

**TIME VARIATIONS OF ANNUAL SOLID PRECIPITATION
ON THE TERRITORY OF WESTERN SIBERIA ACCORDING
TO THEIR CORRECTED VALUES FOR THE PERIOD OF 1936–2021**

O.A. Myasnikova

Voeikov Main Geophysical Observatory, St Petersburg

The modern method of correcting measured precipitation makes it possible to obtain their values, free from the main components of the systematic error of standard precipitation gauges (Tretyakov precipitation gauge and precipitation gauge with Nifer protection), caused by the aerodynamic properties of the instruments, the processes of evaporation, condensation and wetting in the sediment collector, as well as the amount of “false” precipitation falling into the device during a general and blowing snow. The application of this technique solves the issue of obtaining homogeneous time (annual, seasonal or other) series of corrected precipitation amount for the entire period of instrumental observations.

Based on the new methodology, the corrected annual absolute and relative values of solid precipitation were calculated and their statistically homogeneous series were obtained for the network of climatic stations of Roshydromet for the period from 1936 to 2021. The time trends of solid precipitation are calculated and analyzed, their contribution to the magnitude of changes in the total annual precipitation over the territory of Western Siberia is estimated. The relationship between the change in air temperature during the period of solid precipitation and their annual amount is considered.

The results of the changes occurring in the humidification regime during the cold period of the territory of Western Siberia obtained during the study are of scientific interest, including in the development of adaptation measures to climate change and variability.

Key words: *climate, solid precipitation, record homogeneity, precipitation correction, time variations.*

Введение

В последнее десятилетие мировое сообщество уделяет все большее внимание разработке адаптационных мер к изменению и изменчивости климата.

Одним из основных требований к наблюдениям, служащим основой для оценки изменения климата, является однородность временных рядов данных [1] и, в частности, однородность рядов количества атмосферных осадков.

Высокое качество информации о количестве атмосферных осадков, получаемой от государственной наблюдательной сети, является актуальной проблемой на протяжении всего периода инструментальных наблюдений за атмосферными осадками. Необходимым условием для получения достоверных результатов измерения количества атмосферных осадков является отсутствие систематических различий между измеренными суммами осадков за разные промежутки времени на протяжении исследуемого периода наблюдений.

Основными причинами нарушения однородности временных рядов осадков для территории России являются: замена в 1950-х гг. дождемера

с защитой Нифера на осадкомер Третьякова с разными систематическими погрешностями на всех станциях и постах Росгидромета, изменение методик выполнения измерений, изменение числа сроков наблюдений за количеством осадков в сутки, а также изменение во времени условий местоположения приборов.

Количество атмосферных осадков, измеренных с помощью любого осадкомерного прибора, как правило, меньше, чем количество действительно выпавших осадков, вследствие имеющихся систематических погрешностей, связанных с конструкцией прибора и принятой методикой измерений.

К числу основных систематических погрешностей относятся: аэродинамическая (ветровой недоучет осадков), потери осадков на смачивание внутренней поверхности осадкосборника, искажения за счет процессов испарения и конденсации, а также наметание в осадкомер снега, поднятого с поверхности снежного покрова при метелях (так называемый эффект «ложных» осадков, когда количество измеренных осадков может оказаться преувеличенным по сравнению с действительным количеством осадков, выпавших из облаков).

Величины систематических погрешностей варьируют в зависимости от конструкции осадкомерного прибора, места его установки, вида атмосферных осадков и метеорологических условий их выпадения. В большинстве случаев они столь значительны, что сильно затрудняют использование сведений об осадках при изучении климата. Особенно значения этих погрешностей велики для твердых осадков.

С начала наблюдений осадки измерялись дождемерами различных конструкций. С 1887 г. основным прибором для измерения осадков был дождемер с защитой Нифера. В период с 1948 по 1959 г. дождемеры с защитой Нифера были постепенно заменены осадкомерами конструкции В.Д. Третьякова (О-1). Главной причиной замены приборов был слишком большой недоучет дождемером твердых осадков. Массовые полевые испытания осадкомера конструкции Третьякова показали, что этот прибор улавливает выпадающие твердые и смешанные осадки существенно лучше, чем дождемер, благодаря лучшим аэродинамическим свойствам планочной защиты.

По оценкам исследований 1960–1970 гг. [2–5], количество жидких осадков систематически преуменьшается на 10–15 % измеренной суммы для дождемера и осадкомера, а количество твердых и смешанных осадков – на 30–60 % для осадкомера и более чем на 50 % для дождемера. При скоростях ветра более 10 м/с количество ложных осадков в осадкомере в 3 раза может превышать уловленное им количество осадков из облаков.

Длительные и детальные исследования погрешностей осадкомера, проводившиеся с конца 1950-х до середины 1980-х гг. специалистами

ФГБУ «ГГО» и ФГБУ «ГГИ» [6–8], позволили разработать методику корректировки результатов измерения осадков осадкомером первоначально на уровне их средних многолетних значений [9]. В последующие годы была разработана усовершенствованная методика автоматизированной корректировки суточных значений осадков, поступивших из облаков на поверхность земли в пункте наблюдений, измеренных осадкомером [10–12] и дождемером [13], свободных от основных систематических погрешностей измерения осадков с использованием комплекса метеорологических параметров и сведений о характеристиках местоположения осадкомерного прибора. Применение автоматизированной методики корректировки смогло решить вопрос о получении однородных временных (годовых, сезонных или иных) рядов скорректированных осадков за весь период инструментальных наблюдений.

Целью данной работы является сравнительный анализ измеренных и скорректированных характеристик количества осадков за период с 1936 по 2021 г., а также исследование пространственного распределения коэффициентов линейных трендов для скорректированных сумм твердых осадков на территории Западной Сибири.

Исследования, связанные с определением тенденций изменения режима осадков, проводятся также специалистами ФГБУ «ИГКЭ» по разработанной ими методике мониторинга климата. Результаты ежегодно публикуются в [14], а также приведены в [15, 16].

Методика расчетов и результаты корректировки атмосферных осадков

На основе созданного во ВНИИГМИ-МЦД улучшенного архива синоптических данных из 3- и 6-часовых наблюдений, содержащего сведения начиная с 1936 г., в ФГБУ «ГГО» был подготовлен электронный архив исправленных суточных (срочных) сумм осадков, гомогенизированных путем устранения основных систематических погрешностей осадкомерных приборов для 557 климатических метеорологических станций. Архив регулярно пополняется, и на настоящий период его можно считать наиболее близким к эталонному.

На основе архива исправленных суточных (срочных сумм) осадков для 67 реперных климатических станций, расположенных на территории Западной Сибири, за исследуемый период были получены скорректированные данные: годовые суммы осадков, средние многолетние суммы осадков, а также годовые и средние многолетние суммы осадков разных видов (жидких, твердых, смешанных). По данным рядов исправленных осадков для всех станций получены коэффициенты линейных трендов, выполнена оценка их статистической значимости в соответствии с реко-

ментациями, изложенными в [17]. Для принятия гипотезы о наличии линейного тренда использован 95%-й уровень значимости. Оценка значимости определялась при условии, что $|\beta| > 2\sigma_\beta$, где β – коэффициент регрессии линии тренда, σ_β – его среднее квадратическое отклонение.

Для определения связи временных изменений годового количества твердых осадков на территории Западной Сибири с изменением температуры воздуха в период выпадения твердых осадков за период с 1936 по 2021 г., для всех станций были получены коэффициенты линейных трендов температуры воздуха и выполнена оценка их статистической значимости.

На территории Западной Сибири, имеющей значительную протяженность по долготе, сменяются шесть природных зон: тундра, лесотундра, тайга, зона смешанных и широколиственных лесов, лесостепь и степь. Континентальность нарастает к югу, по мере удаления от побережья Северного Ледовитого океана, что выражается в увеличении годовой амплитуды температур и уменьшении количества осадков. Для данной территории характерна значительная изменчивость как годового количества атмосферных осадков, так и их месячных сумм. Для получения более обобщенных результатов и их лучшей статистической обеспеченности все станции, расположенные на территории Западной Сибири, были распределены по трем регионам: территория Западной Сибири севернее 64° с.ш. (зона лесотундры), центральная часть Западной Сибири, расположенная между 64° с.ш. и 58° с.ш. (лесная зона), территория Западной Сибири южнее 57° с.ш. (зоны лесостепи и степи), и были рассчитаны средние арифметические значения отношений по станциям, расположенным в этих регионах.

Влияние корректировки на изменение климатических характеристик количества осадков за 83-летний период (с 1936 по 2021 г.) представлено в табл. 1. В ней приведены данные об исправленных (P_r) и измеренных (P''_r) средних многолетних годовых суммах осадков, их отношении (P_r/P''_r), а также отношение исправленных осадков к измеренным для

Таблица 1

**Среднее многолетнее годовое количество исправленных (P_r)
и измеренных (P''_r) осадков, их отношения (P_r/P''_r),
отношения осадков разных видов ($P_{тв}/P''_{тв}$), ($P_{ж}/P''_{ж}$), ($P_{см}/P''_{см}$)**

Станция, регион	P_r , мм	P''_r , мм	P_r/P''_r	$P_{тв}/P''_{тв}$	$P_{см}/P''_{см}$	$P_{ж}/P''_{ж}$
Севернее 64° с.ш.	544	435	1,25	1,41	1,15	1,21
Центральная часть Западной Сибири, между 64° с.ш. и 58° с.ш.	583	489	1,19	1,50	1,10	1,14
Южнее 58° с.ш.	473	389	1,22	1,45	1,12	1,20

жидких ($P_{\text{ж}}/P''_{\text{ж}}$), твердых ($P_{\text{тв}}/P''_{\text{тв}}$) и смешанных ($P_{\text{см}}/P''_{\text{см}}$) по выделенным регионам.

Анализ временных изменений годового количества твердых осадков в прибрежном районе арктической зоны (выше 67 параллели) не проводился из-за отсутствия в нем реперных климатических станций, также не анализировались временные изменения годового количества твердых осадков, измеренных на станциях, расположенных в горных районах, поскольку, в силу пестроты в распределении ветров и большого влияния местных особенностей, измеренные осадки несопоставимы между собой даже в близко расположенных пунктах [18].

Наибольшее годовое количество осадков выпадает в лесной зоне и связано с наибольшим развитием циклонической деятельности. К северу и к югу от этой зоны количество осадков убывает. Уменьшение осадков к северу от этой зоны связано главным образом с малым влагосодержанием преобладающего здесь арктического воздуха, а уменьшение к югу является следствием ослабления циклонической деятельности и повышения температуры.

Как видно из табл. 1, максимальные значения отношений скорректированных величин осадков к измеренным отмечаются в центральной части Западной Сибири – в лесной зоне. Эта закономерность в значительной степени объясняется зависимостью величины систематических погрешностей от преобладания того или иного вида осадков в их годовом количестве, т. е. чем больше доля твердых осадков и выше значения скорости ветра в период их выпадения, тем больше величина отношения. Скорректированное среднее многолетнее годовое количество осадков для всех трех регионов значительно превышает измеренное. Для района лесотундры превышение составляет порядка 30 %, для центральной части Западной Сибири и южного степного региона – порядка 20 %.

В целом из отношений скорректированных величин осадков разных видов к измеренным видно, что наибольшей корректировке подвергались твердые осадки, количество которых почти на 50 % больше измеренного, в отличие от скорректированного среднего многолетнего количества жидких осадков, которое больше измеренного на 20 %. Связано это с тем, что на измеряемое количество твердых осадков наиболее сильно влияет скорость ветра на высоте ветроизмерительного прибора, и соответственно, влияние корректировки более существенно [19].

Территориальное распределение значений $P_{\text{тв}}/P''_{\text{тв}}$, $P_{\text{ж}}/P''_{\text{ж}}$ и $P_{\text{см}}/P''_{\text{см}}$ зависит только от ветрового и влажностного режимов данной станции, ее защищенности. Минимальные отношения $P_{\text{тв}}/P''_{\text{тв}}$ для твердых осадков наблюдаются либо на защищенных в течение всего периода станциях, либо, наоборот, на открытых с высокими скоростями ветра, частыми метелями.

Таблица 2

**Твердые, смешанные и жидкие осадки в процентах
от средних многолетних годовых сумм измеренных и исправленных осадков
за период наблюдений**

Регион	Измеренные осадки (P''), %			Исправленные осадки (P), %		
	жидкие	смешан.	твердые	жидкие	смешан.	твердые
Севернее 64° с.ш.	57,2	6,8	36,0	52,6	6,5	40,9
Центральная часть Западной Сибири, между 64° с.ш. и 57° с.ш.	65,5	6,3	28,2	60,6	6,1	33,3
Южнее 57° с.ш.	70,1	7,5	22,4	65,0	7,3	27,7

Кроме расчета вышеуказанных характеристик, был определен вклад в общее количество измеренных и скорректированных атмосферных осадков разных видов осадков по выделенным регионам. Расчеты приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, в направлении с севера на юг прослеживается увеличение количества жидких осадков и планомерное уменьшение количества твердых. Наибольшая доля твердых осадков, как измеренных, так и исправленных, наблюдается в лесотундре, наименьшая – в южных и приграничных районах. Все три зоны характеризуются небольшой долей смешанных осадков, которая составляет 6–7 % от их общего числа. В результате корректировки количества измеренных осадков в их годовом количестве произошло закономерное перераспределение доли твердых, смешанных и жидких осадков. Для станций всех трех регионов доля твердых осадков увеличилась на 5 % вследствие их выдувания. Доля исправленных величин жидких осадков, соответственно, повсеместно уменьшается. Для северного региона доля скорректированных величин средних многолетних годовых твердых осадков составляет порядка 40 % от их общего числа, для центральной части Западной Сибири – около 33 % и для южного региона – 28 %.

Временные изменения количества твердых атмосферных осадков

Полученные в результате корректировки однородные исторические ряды действительного количества осадков за период с 1936 по 2021 г. позволили проследить временные изменения годового количества твердых осадков на исследуемых станциях.

По данным рядов исправленных величин осадков для всех станций получены коэффициенты линейных трендов, которые дают наиболее пол-

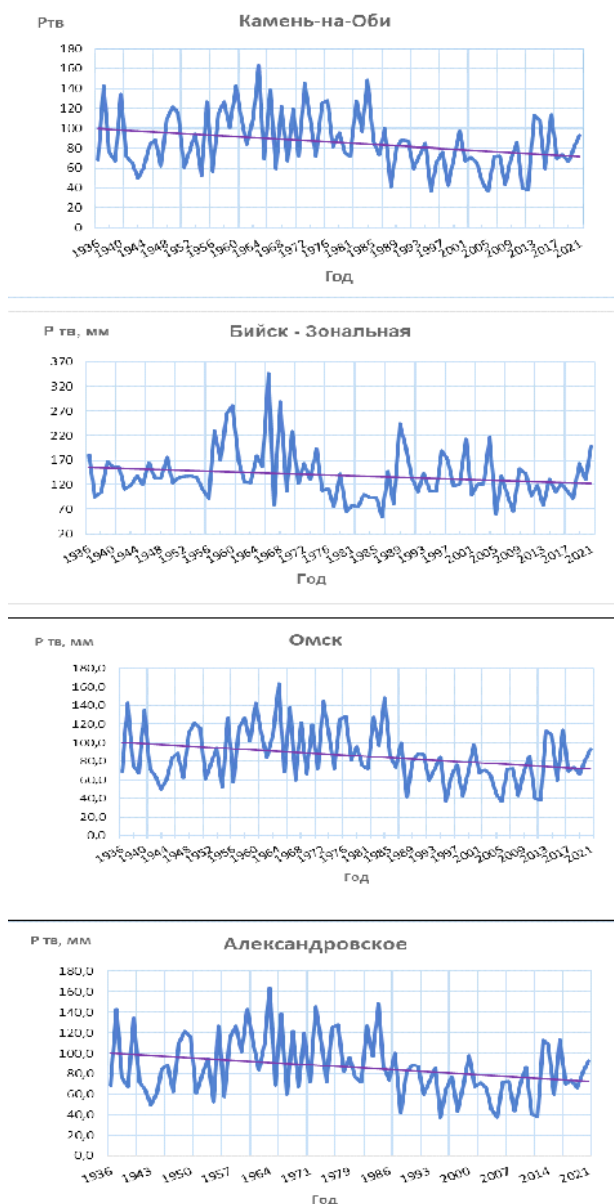


Рис. 1. Временные ряды исправленных значений годового количества твердых осадков и их линейные тренды для станций Камень-на-Оби, Бийск Зональная, Омск и Александровское с 1936 по 2021 г.

ную картину современных тенденций изменения количества твердых осадков на территории Западной Сибири.

Примеры временных рядов годовых сумм твердых осадков с устраненными систематическими погрешностями и их линейные тренды для станций, расположенных в различных районах Западной Сибири, представлены на рис. 1.

На рис. 2 представлена карта с нанесенными условными обозначениями статистически значимых и незначимых трендов по станциям, данные которых использовались для расчетов. Число статистически значимых положительных трендов составляет 19 %, значимых отрицательных – 33 % и незначимых 48 %.

На севере и юге Западной Сибири, за исключением территории Алтайского края, наблюдается увеличение годового количества твердых осадков на 20–50 мм, а в центральной части Западной Сибири, напротив, уменьшение на ту же величину. В Алтайском крае наблюдается уменьшение годового количества твердых осадков на 50–70 мм.

Для выявления связи изменений годовых сумм твердых осадков в холодный период года с изменениями температуры воздуха в период выпадения твердых осадков были получены временные ряды температуры

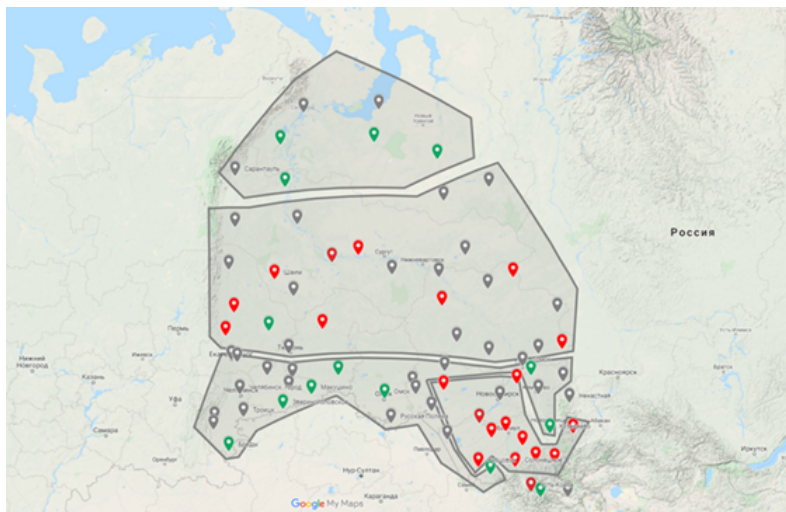


Рис. 2. Распределение статистически значимых и незначимых трендов временных изменений количества твердых атмосферных осадков по станциям Западной Сибири:

📍 – станции со значимыми отрицательными трендами; 📍 – станции со значимыми положительными трендами; 📍 – станции с незначимыми трендами

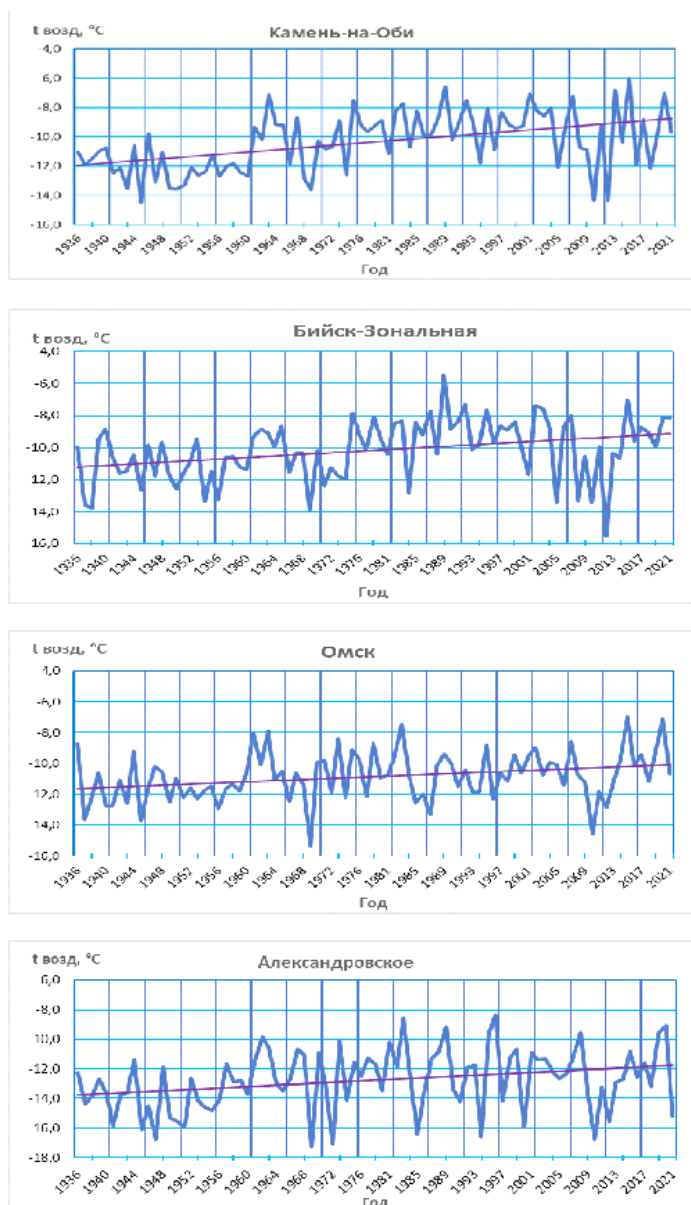


Рис. 3. Временные ряды температуры воздуха в период выпадения твердых осадков и их линейные тренды для станций Камень-на-Оби, Бийск Зональная, Омск и Александровское с 1936 по 2021 г.

воздуха в период выпадения твердых осадков, рассчитаны коэффициенты линейных трендов температуры воздуха и выполнена оценка их статистической значимости.

Примеры временных рядов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков и их линейные тренды представлены на рис. 3.

На станциях Камень-на-Оби и Бийск Зональная, расположенных в Алтайском крае, тренды временных рядов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков – значимые. Для других двух станций: станции Омск, расположенной в Омской области, и станции Александровское, находящейся в Томской области, – тренды незначимые.

В целом оценка статистической значимости трендов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков показала отсутствие значимого роста или понижения температур на всей территории Западной Сибири, за исключением территории Алтайского края, где положительные тренды оказались значимы. Аномальный рост зимних температур на территории Алтайского края подтверждается и специалистами ИГКЭ [14].

Сопоставление изменений годовых сумм твердых осадков в холодный период года и изменений температуры воздуха в период выпадения твердых осадков выявило, что увеличение их годового количества и, соответственно, доли твердых осадков, а также их уменьшение на территории Западной Сибири, за исключением Алтайского края, с изменением температуры не связаны, а объясняются их внутригодовой изменчивостью, обусловленной атмосферной циркуляцией и местными физико-географическими условиями.

Выводы

На основе архива срочных сумм осадков с устраненными систематическими погрешностями для территории Западной Сибири были получены скорректированные годовые суммы осадков, средние многолетние суммы осадков, а также годовые и средние многолетние суммы осадков разных видов: жидких, твердых, смешанных.

Влияние корректировки наиболее существенно для твердых осадков, количество которых на 40–50 % больше измеренного, так как на их измеряемое количество существенно влияет скорость ветра.

В результате корректировки количества измеренных осадков произошло закономерное перераспределение доли твердых, смешанных и жидких осадков в их годовом количестве. Для станций всех трех регионов доля твердых осадков увеличилась на 5 % вследствие их выдувания. Доля скорректированных жидких осадков, соответственно, повсеместно уменьшается.

На основании сформированных однородных временных рядов твердых осадков рассчитаны характеристики линейных трендов за исследуемый период с оценкой их статистической значимости. Корректировка осадков приводит к изменению временных трендов исправленного количества осадков по сравнению с измеренными: значения положительных трендов уменьшаются, а отрицательных увеличиваются по абсолютному значению, т. е. рост осадков ослабевает, а падение усиливается.

Оценка статистической значимости трендов температуры воздуха в период выпадения твердых осадков позволила сделать вывод о том, что увеличение годовых сумм твердых осадков, а также их уменьшение на территории Западной Сибири связано с их внутригодовой изменчивостью, за исключением территории Алтайского края, где отмечается аномальный рост температур и, соответственно, значимое уменьшение годового количества твердых осадков.

Признательность

Автор благодарит заведующую методическим отделом ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» канд. геогр. наук Светлану Юрьевну Гаврилову за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

Литература

1. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). Санкт-Петербург, 2020. 120 с.
2. Богданова Э.Г. Исследование ветровой погрешности измерения осадков // Труды ГГО. 1966. Вып. 195. С. 40–62.
3. Голубев В.С. Изучение точности учета атмосферных осадков // Труды ГГИ. 1969. Вып. 176. С. 149–164.
4. Дроздов О.А., Зубенков Л.И., Нечаев И.Н. Погрешности учета атмосферных осадков // Труды ГГО. 1965. Вып. 175. С. 24–30.
5. Струзер Л.Р., Нечаев И.Н., Богданова Э.Г. Систематические погрешности измерения атмосферных осадков // Метеорология и гидрология. 1965. № 10. С. 50–54.
6. Голубев В.С. Методика корректировки срочных и месячных величин атмосферных осадков и результаты ее поверки // Труды ГГИ. 1973. Вып. 207. С. 11–27.
7. Вопросы методики измерения атмосферных осадков / Под ред. Л.Р. Струзера // Труды ГГО. Вып. 215. Гидрометеиздат, 1968. 164 с.
8. Вопросы методики измерения атмосферных осадков / Под ред. Л.Р. Струзера, Д.П. Беспалова // Труды ГГО. Вып. 195. Гидрометеиздат, 1966. 222 с.
9. Струзер Л.Р., Нечаев И.Н., Богданова Э.Г., Федорова Е.А. Методика корректировки многолетних норм осадков // Метеорология и гидрология. 1965. № 11. С. 43–50.

10. Богданова Э.Г., Голубев В.С., Ильин Б.М., Драгомилова И.В. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах РФ // Метеорология и гидрология. 2002. № 10. С. 68–93.
11. Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Драгомилова И.В. Опыт применения усовершенствованной методики корректировки суточных сумм осадков в различных климатических условиях // Труды ГГО. 2003. Вып. 551. С. 23–50.
12. Голубев В.С., Коновалов Д.А., Богданова Э.Г., Ильин Б.М. Полная модель корректировки осадкомерных данных; методика и алгоритм оценки систематических составляющих погрешности // WMO, Report № 74. WMO/TD. 2000. № 1028. Р. 136–139.
13. Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю. Устранение неоднородности временных рядов осадков, вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова // Метеорология и гидрология. 2008. № 8. С. 87–102.
14. Ежегодный «Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 05.06.2023).
15. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
16. Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2022. 676 с.
17. Поляк И.И. Методы анализа случайных процессов и полей в климатологии. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 255 с.
18. Калинин Г.П., Левин А.Г. К вопросу об учете атмосферных осадков // Труды ГГО. 1965. Вып. 175. С. 67–75.
19. Богданова Э.Г., Ильин Б.М., Гаврилова С.Ю. Оценка влияния защищенности установки осадкомера на величину ветровой погрешности измерения осадков // Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 92–101.