

Оценка параметров снежного покрова по данным наблюдений на метеостанциях в небольших речных бассейнах на юге Западной Сибири

© 2022 г. Д.К. Першин^{1,2*}, Л.Ф. Лубенец², Д.В. Черных²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

*dmitrypersh@gmail.com

Evaluation of snow parameters at weather stations in small catchments in the south of Western Siberia

D.K. Pershin^{1,2*}, L.F. Lubenets², D.V. Chernykh²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

²Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

*dmitrypersh@gmail.com

Received May 14, 2021 / Revised November 19, 2021 / Accepted December 23, 2021

Keywords: *Western Siberia, snow water equivalent, snow depth, snow density, snow surveys, weather stations data.*

Summary

In this study, we analyzed the accuracy of snow observations at weather stations compared to the data of snow measurements in the vicinity of these stations. Also, the variations of measurement errors were estimated considering the inter-annual snowpack variability and landscape heterogeneity of the river basins. The studies were conducted in three catchments in the south of Western Siberia: forest-steppe the Kasmala River (2011–2020), low mountain the Mayma River (2015–2020), and steppe the Kuchuk River (2019–2020). The results showed that the accuracy of snow measurements at the weather stations was higher in the low mountain catchment than in the plain basins. Interannual differences in precipitation combined with wind transport influenced the most significant errors in the Kasmala catchment (relative error of snow depth on the snow gauge – 46,3%, and SWE on the permanent course – 17,3%). However, in the Mayma catchment, the snow depth measurements on the snow gauge agreed well with the catchment means in all years (mean relative error 7,7%). The relative error of snow depth measurements on the snow gauge in the Kuchuk catchment was 7,5%, and of SWE on the permanent snow course was 19,1%. The small snow depth error occurred due to the composition of the error distribution and large differences between open and forested areas.

Citation: Pershin D.K., Lubenets L.F., Chernykh D.V. Evaluation of snow parameters at weather stations in small catchments in the south of Western Siberia. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (1): 81–98. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422010118.

Поступила 14 мая 2021 г. / После доработки 19 ноября 2021 г. / Принята к печати 23 декабря 2021 г.

Ключевые слова: *Западная Сибирь, снегозапасы, толщина снежного покрова, плотность снега, снегомерные съёмки, наблюдения на метеостанциях.*

Сравниваются материалы наблюдений за снежным покровом на метеостанциях и снегомерные наблюдения в водосборных бассейнах, где расположены эти станции. Исследования вели в трёх бассейнах на юге Западной Сибири: в лесостепном бассейне р. Касмала (2011–2020 гг.), низкоромном бассейне р. Майма (2015–2020 гг.) и степном бассейне р. Кучук (2019–2020 гг.). Сравнение проводилось на трёх пространственно-временных уровнях изменчивости: межгодовом (влияние межгодовой изменчивости осадков); внутрибассейновом (влияние рельефа и растительности); внутригодовом (влияние метеорологических условий конкретного зимнего периода).

Введение

В условиях современных изменений климата характеристики сезонного снежного покрова существенно варьируют. В последние десятилетия в переходные сезоны по всей Евразии сокращаются площади снежного покрова и периоды его залегания [1]. Однако наблюдаемые тенденции

народны [2]. Кроме того, как показали последние исследования, невязки между основными источниками данных о снежном покрове (наземные, дистанционные и модельные) остаются высокими при изучении как временных, так и пространственных неоднородностей [3, 4]. В большинстве исследований отмечаются тенденции увеличения толщины снега и снегозапасов (водного эквивалента снежного покрова) как в целом в Север-

ной Евразии, так и на территории России [5, 6]. По данным Росгидромета, в среднем по России тренд максимальной толщины снега составляет 1,51 см/10 лет [2]. Для центральных и западных районов Сибири на основе данных сервиса GlobSnow 3.0 [6] он равен $3,1 \pm 2,9$ мм/10 лет. На фоне тенденций увеличения толщины снега и снегозапасов продолжительность залегания и площадь, занятая снежным покровом, последовательно снижаются [7, 8]. В среднем по России снижение числа дней со снежным покровом составляет $-1,17$ дней/10 лет [2]. Однако многие из отмеченных тенденций имеют свои региональные особенности и отклонения.

Наиболее существенные отличия в направленности тенденций отмечаются между измерениями на снегомерных маршрутах в окрестностях метеостанций (ГМС), на открытых и залесённых участках (лес/поле). Снегозапасы на маршрутах в «поле» последовательно растут (2,16 мм/10 лет), тогда как на лесных маршрутах они стабильно уменьшаются ($-1,49$ мм/10 лет) [2]. Снижаются и коэффициенты снегонакопления – отношение между снегозапасами на лесных и открытых участках, что частично объясняется уменьшением величины метелевого переноса снега [9].

Маршрутные снегомерные наблюдения на ГМС – важнейший источник информации для изучения многолетних закономерностей и верификации других источников данных о снежном покрове (модельных, дистанционных) [10]. Использование различных источников часто показывает совершенно разные результаты анализа многолетних тенденций [11]. Наблюдения за снежным покровом на ГМС представляют собой измерения в точке, репрезентативной лишь в некоторой окрестности, величина которой невелика и, самое главное, неизвестна. Наблюдения в определённой точке могут существенно отличаться от средних значений даже в небольших речных бассейнах, а участки, на которых значения близки к среднему, расположены случайным образом и трудно определимы априори [12].

Факторы, влияющие на основные параметры снежного покрова, изменяются в различных пространственно-временных масштабах [13]. Сочетания характеристик рельефа и растительности определяют пространственную дифференциацию параметров снежного покрова в масштабах

от десятков метров до нескольких десятков километров. В то время как межгодовые различия в количестве осадков, температурный и ветровой режимы, зависящие от метеорологических условий конкретных зим, обуславливают временную изменчивость характеристик снежного покрова. Отметим, что указанные процессы накладываются друг на друга и, например, специфика метеорологических условий отдельно взятых синоптических периодов и даже суток может определять значительную неоднородность даже на относительно небольших пространственных масштабах.

Задача настоящего исследования – оценить точность наблюдений за снежным покровом на ГМС по сравнению с данными снегомерных наблюдений в некотором пространственном окружении этих станций. Рассматривалось также изменение соотношения между этими двумя источниками данных о снежном покрове в условиях межгодовой изменчивости снежности зим, разницы метеорологических условий зимних периодов и неоднородности подстилающей поверхности. Территориальными единицами для проведения сравнительного анализа были речные бассейны, в пределах которых расположены ГМС и проводили снегомерные наблюдения. В контексте исследования под оценкой точности наблюдений понимается не только сравнение данных, полученных на ГМС, с результатами снегомерных наблюдений в речных бассейнах, но и некоторая физическая обоснованность соотношений между этими двумя источниками данных. Так, значения снегозапасов на постоянном маршруте ГМС (открытый маршрут «поле») потенциально должны быть близки со средними значениями снегозапасов на открытых участках в речном бассейне. Как и в ряде исследований [12, 14], при анализе относительных ошибок средних значений репрезентативными считались отклонения менее 10% бассейновых средних.

Материалы и методы

Территория исследования. Исследования проводили в трёх речных бассейнах – Кучук, Касмала и Майма. Территориально расположение бассейнов отражает переход от низменной Кулундинской равнины через возвышенное Приобское плато к низкогорьям Алтая (рис. 1). Территория исследо-



Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемых бассейнов на юге Западной Сибири: 1 – крупные города; 2 – границы исследуемых бассейнов; 3 – крупные реки; 4 – государственные границы; 5 – региональные границы. Топооснова: Bing Maps, OSM

Fig. 1. Locations of the investigated catchments in the south of Western Siberia 1 – cities; 2 – catchment borders; 3 – rivers; 4 – countries boundaries; 5 – regional boundaries. Base map: Bing Maps, OSM

вания охватывает диапазон абсолютных высот от 97 до 1471,4 м, что соответствует изменению годовой суммы осадков от 337 до 729 мм (табл. 1).

Бассейн р. Кучук (рис. 2, а) относится к бессточной области Обь-Иртышского междуречья. Территория бассейна охватывает Кулундинскую равнину и частично пологие северные склоны Приобского плато. Он расположен в подзонах засушливой и сухой степи или сухой субгумидной зоне [18, 19]. В пространственной структуре бассейна полностью доминируют сельскохозяйственные угодья. Отметим, что Кулундинская равнина – один из регионов России с наиболее ярко выраженными признаками опустынивания и деградации земель [20].

Бассейн р. Касмала (в работе используется часть бассейна, ограниченная гидропостом Касмала–Рогозиха, см. рис. 2, б) расположен в подзоне южной лесостепи [18] и относится к субгумидной зоне [19]. Это – репрезентативный участок для Приобского плато, на котором долины рек часто наследуют ложбины древнего стока [21]. В пространственной структуре терри-

тории также преобладают сельскохозяйственные угодья (59,7%). Значительную долю площади бассейна занимает ленточный бор, приуроченный к днищу ложбины древнего стока (около 12%), которая фактически разделяет бассейн на две части. Столь существенная неоднородность ландшафтной структуры влияет на условия снегонакопления за счёт различий в ветровом перераспределении и перехвате снега кронами деревьев (более подробно анализируется в работе [22]).

Бассейн р. Майма (см. рис. 2, в) расположен в пределах низкогорий северного Алтая и включает в себя участки лесостепных, подтаёжных и таёжных ландшафтов [23]. В ландшафтной структуре доминирует лесной пояс (более 90% общей площади). Небольшую долю занимают лесостепные ландшафты (6,1%). Широко распространены антропогенные модификации (сельскохозяйственные угодья, вырубки). Условия снегонакопления зависят главным образом от комбинации двух факторов – орографического и характера растительности (подробно рассмотрено в работе [24]).

Таблица 1. Основные топографические и климатические характеристики исследуемых бассейнов (составлено по данным [15, 16])

Характеристики	Бассейн		
	р. Касмала	р. Кучук	р. Майма
Площадь, км ²	1768,7	901,56	778,2
Диапазон абсолютных высот, м	167–290	97–301	251–1471
Среднегодовая сумма осадков, мм*	402	337	729
Сумма осадков за ноябрь–март, мм*	116	93,3	162
Средняя температура воздуха за ноябрь–март, °С*	–13,0	–12,5	–10,8
Число дней со средней скоростью ветра между сроками с более 7,7 м/с**	47	41	2
Максимальная толщина снежного покрова, см*	60	39	60

*Для бассейнов рек Касмала и Майма данные за 1956–2019 гг., для бассейна р. Кучук – за 2005–2019 гг. **В табл. 1 и 2 порог в 7,7 м/с выбран с учётом представленной в работе [17] средней скорости ветра, необходимой для возникновения метелевого переноса сухого снега.

Снегомерные наблюдения в речных бассейнах.

В данной работе использованы результаты нескольких серий наблюдений за снежным покровом. *Первый период* многолетних наблюдений в бассейне Касмалы охватывает 2010/11–2013/14 и 2016/17–2018/19 гг., а в бассейне Маймы – 2014/15–2018/19 гг. (здесь и далее мы оперируем зимними периодами из двух лет). Исследования проводили в период максимального снегонакопления: конец февраля – середина марта. *Второй период* измерений начался зимой 2019/20 г. в бассейнах рек Касмала, Кучук и Майма и предусматривал ежемесячные измерения (с ноября по февраль) на нескольких реперных участках и расширенные снегомерные работы в период максимального снегонакопления. Все результаты были объединены в единую базу данных, размещённую в открытом доступе, с подробным описанием обследованных участков и методов измерений [25].

Методики измерений для описанных периодов отличались. В *первый период* наблюдений исследования проводили по снегомерным маршрутам и снегомерным площадкам в соответствии с классическими рекомендациями Росгидромета [26, 27]. Расстояние между точками измерений толщины снежного покрова на маршрутах составляло 20 м. Плотность измерялась через каждые 100–200 м весовым снегомером ВС-43. Снегомерная площадка представляла собой два перпендикулярных трансекта, содержащих по 10 измерительных точек толщины снежного покрова через 5 м, реже 2 м – на крутых склонах и других сложных для измерений участках. Плотность снежного покрова измерялась в пяти точках. Во *второй период* измерения выполняли на снего-

мерных площадках, представляющих собой два перпендикулярных трансекта длиной по 60 м с интервалом измерений 2 м. Суммарно на одной площадке выполняли 61 измерение толщины и 13 измерений плотности снега. Такая схема была предложена в работе [28]. Местоположения маршрутов и площадок (см. рис. 2, а–в) выбирали исходя из данных об основных элементах мезорельефа, типах растительности и высотных уровнях, и они были практически полностью идентичны для двух серий наблюдений. Несмотря на различия в методиках измерений, характер распределения параметров снежного покрова в речных бассейнах оставался схожим год от года.

Общее число снегомерных маршрутов и площадок, а также точное число измерений по годам приведено в табл. 2. Методика наблюдений и локальные закономерности снегонакопления в бассейнах более подробно даны в работах [22, 24], а описание базы данных – в работе [25]. В настоящей статье наблюдения, выполненные авторами, называются «бассейновыми», а измерения на метеостанциях (ГМС) – «стационарными».

Данные наблюдений на ГМС. В работе использованы данные ГМС Ребриха (бассейн р. Касмала), Родино (бассейн р. Кучук) и Кызыл-Озек (бассейн р. Майма). Указанные ГМС расположены в исследуемых бассейнах или в непосредственной близости от них (см. рис. 2). Большинство метеопараметров (температура воздуха, сумма осадков, скорость и направление ветра, характеристики снежного покрова) по данным ГМС размещены в открытом доступе [15, 16]. Содержание и доступность данных снегомер-

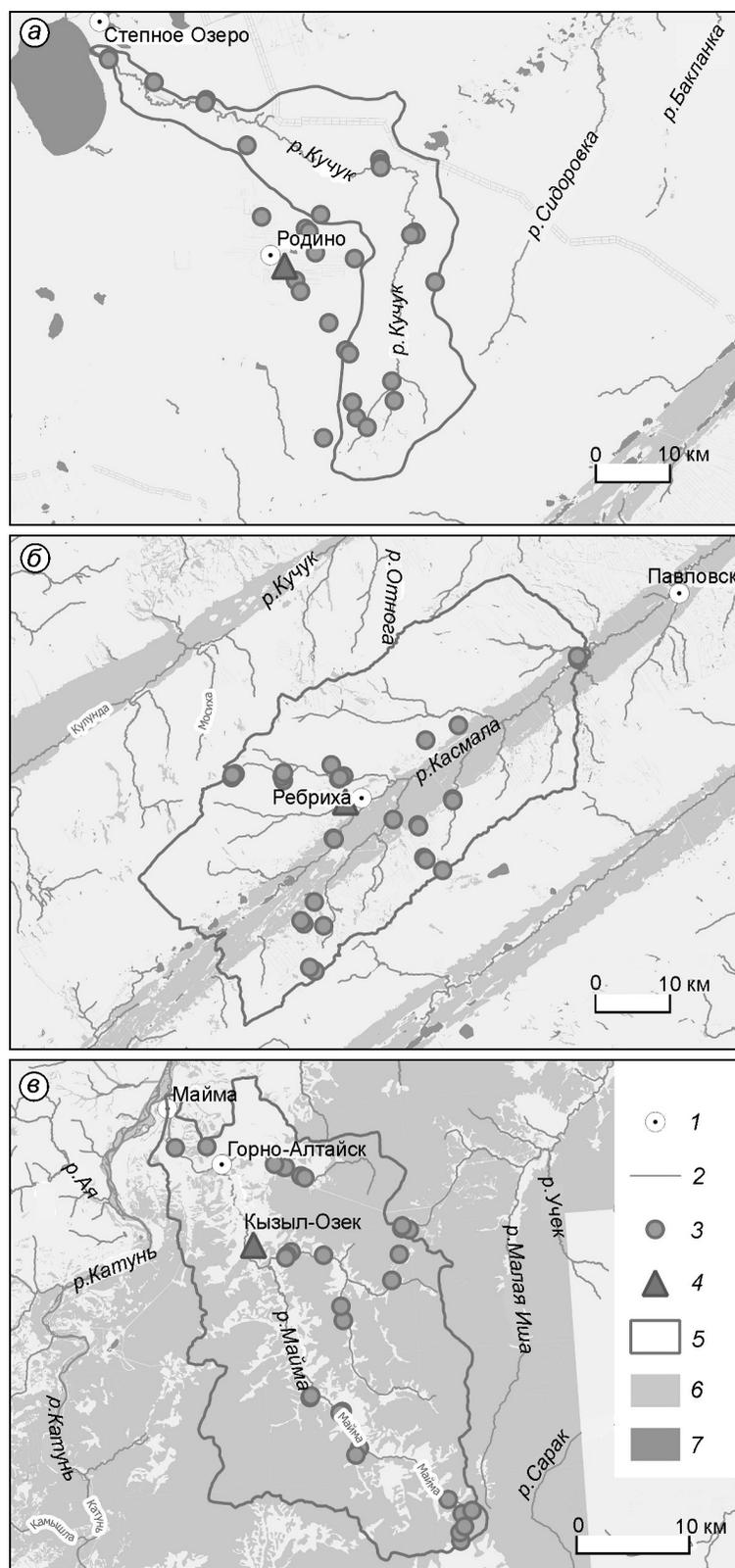


Рис. 2. Схема расположения снегомерных маршрутов, площадок и метеостанций в исследуемых бассейнах:

a – р. Кучук; *б* – р. Касмала; *в* – р. Майма; 1 – населённые пункты; 2 – реки; 3 – снегомерные маршруты и площадки; 4 – ГМС; 5 – границы речных бассейнов; 6 – леса; 7 – озёра. Топооснова: OSM

Fig. 2. Locations of snow courses, sites and weather stations in the explored catchments *a* – Kuchuk; *б* – Kasmala; *в* – Mayma; 1 – settlements; 2 – rivers; 3 – snow courses and sites; 4 – weather stations; 5 – catchment boundaries; 6 – forested areas; 7 – lakes. Base map: OSM

ных наблюдений (суточных измерений толщины снега по стационарной рейке и маршрутных снегомерных съёмок) весьма неоднородны по

разным ГМС. Архив данных маршрутных снегомерных съёмок по ГМС Ребриха доступен в базе данных [15], однако после 2014 г. съёмки

Таблица 2. Число измерений по годам наблюдений и метеорологические характеристики зимних периодов (составлено с использованием среднесуточных данных [15, 16])

Зимний период	Число маршрутов/площадок	Число измерений толщины/плотности снега	Сумма осадков за ноябрь–март, мм	Средняя температура воздуха за ноябрь–март, °С	Число дней со средней скоростью ветра между сроками с более 7,7 м/с	Максимальная толщина снежного покрова, см
<i>Бассейн р. Касмала</i>						
2010/11	7/0	629/19	107	–13,5	47	65
2011/12	9/0	698/77	50	–15,2	19	61
2012/13	9/0	565/78	135	–13,5	48	127
2013/14	9/0	565/78	108	–9,5	27	45
2016/17	9/0	606/78			–**	
2017/18	9/0	610/84	75	–12,8	23	60
2018/19	9/0	605/83	66	–12,5	27	81
2019/20	0/31*	2867/613	108	–8,2	42	116
<i>Бассейн р. Майма</i>						
2014/15	9/0	337/77	156	–8,7	0	77
2015/16	7/29	844/198	128	–6,9	0	41
2016/17	5/29	734/170	180	–9,3	0	75
2017/18	5/40	992/229	171	–10,0	1	56
2018/19	5/52	1151/297	101	–10,3	0	49
2019/20	0/30*	3294/702	222	–6,8	0	87
<i>Бассейн р. Кучук</i>						
2019/20	0/31*	2620/558	79	–7,6	35	58

*Схема проведения наблюдений в зимний период 2019/20 г. была изменена. **Отсутствие данных ГМС.

на станции были прекращены. На ГМС Кызыл-Озек маршрутные снегомерные съёмки проводятся, но в открытом доступе данных нет. Только по ГМС Родино данные снегомерных съёмок в полном объёме представлены в базе ВНИИГМИ-МЦД, и этот массив обновляется. Таким образом, исключительно суточные значения толщины снежного покрова по стационарной рейке – тот параметр, который был доступен одновременно для всех ГМС.

Неоднородность либо недоступность данных о маршрутных снегомерных съёмках (единственный источник данных о снегозапасах) – достаточно распространённая проблема, поэтому мы также использовали суточные значения толщины снежного покрова по стационарной рейке для перехода к снегозапасам. Плотность снежного покрова в данном случае рассчитывалась по широко применяемой статистической зависимости [29]

$$\rho_{h_i DOY_i} = (\rho_{\max} - \rho_0)(1 - \exp(-k_1 h_i - k_2 DOY_i)) + \rho_0, \quad (1)$$

где $\rho_{h_i DOY_i}$ – плотность снега на определённый день в году (DOY); ρ_{\max} , ρ_0 – максимальное и начальное значения плотности соответственно; k_1 ,

k_2 – параметры уплотнения снега для толщины и дня в году соответственно; h_i – толщина снега.

Входные параметры модели варьируют в зависимости от типов снежного покрова (более подробно рассмотрено в исследовании [29]). Для бассейна Маймы применялись параметры для тайги, для бассейнов Кучука и Касмала – степей (прерий). Таким образом, наряду с доступными данными маршрутных снегомерных съёмок (использованы данные маршрутов «поле»), применение формулы (1) позволило получить ряды значений снегозапасов с суточным разрешением. Отметим, что мы не ставили целью калибровку формулы (1) по данным наблюдений, а лишь использовали её в качестве примера простого моделирования при недостатке данных о плотности снега и снегозапасах.

Методика анализа. Сравнительный анализ данных бассейновых и стационарных наблюдений проводился с учётом временной (меж- и внутригодовой) и пространственной (внутрибассейновой) изменчивости параметров снежного покрова. Основные параметры для сравнения – толщина снежного покрова и снегозапасы

по данным стационарных измерений и бассейновых наблюдений. Анализ выполнялся на основе трёх групп данных, в каждой из которых результаты бассейновых наблюдений в целом, по отдельным природным комплексам или на определённую дату выступали в качестве референтного уровня для сравнения. Данные бассейновых наблюдений мы использовали в качестве условного базиса для оценки точности ввиду их большего пространственного охвата и числа измерений, хотя это – определённое допущение. Для анализа межгодовых различий использованы данные наблюдений по бассейнам Касмалы и Маймы в период максимума аккумуляции снега за все доступные годы (см. табл. 2). Анализ внутрибассейновых различий выполнялся с помощью данных бассейновых наблюдений также на период максимума снегонакопления 2019/20 г. в бассейнах Кучука, Касмалы и Маймы. При этом измерения были разделены по четырём группам природных комплексов: открытые луга, степи и пашни; долинные сообщества; хвойные леса; лиственные леса. Анализ внутригодовых различий проводили на основе данных реперных снегомерных площадок, где измерения выполняли в течение всего зимнего периода 2019/20 г. в трёх бассейнах (от трёх до шести площадок в бассейне, подробнее см. работу [25]). Во всех случаях для сравнения использовали значения наблюдений на ГМС непосредственно в день проведения бассейновых снегомерных наблюдений или осреднённые за период проведения наблюдений параметры.

В качестве метрик для оценки точности использованы: *среднее отклонение* (mean bias, MB); *медианное абсолютное отклонение* (median absolute deviation, MAD); *относительную ошибку* (relative error, RE), которые рассчитывали по следующим формулам:

$$MB = (\sum_{i=1}^n x_s - x_c)/n;$$

$$MAD = \text{median}(|x_{c_i} - \text{median}(x_s)|);$$

$$RE = |1 - (\bar{x}_s/\bar{x}_c)| \cdot 100\%,$$

где x_s , x_c – параметры снежного покрова по данным стационарных и бассейновых наблюдений соответственно; \bar{x}_s , \bar{x}_c – средние значения параметров снежного покрова по данным стационарных и бассейновых наблюдений соответственно.

Среднее отклонение отражает абсолютную величину отклонений и их направленность в по-

ложительную или отрицательную сторону. Однако средние отклонения чувствительны к наличию отклонений противоположных знаков и выбросам. Для нивелирования этих недостатков использовалось медианное абсолютное отклонение. Относительная ошибка отражает разницу в процентах между средними значениями толщины снега и снегозапасов по данным стационарных и бассейновых наблюдений.

При анализе пространственных различий параметров снежного покрова рассчитывались *коэффициенты корреляции* между измерениями на ГМС и данными снегомерных маршрутов, а также *пространственная корреляционная функция толщины снежного покрова*. Для расчёта использованы данные первого периода наблюдений в бассейнах Касмалы и Маймы (только маршруты и снегомерные площадки, стабильно представленные за весь период наблюдений). В бассейне Касмалы корреляция рассчитывалась на основе доступных до 2014 г. наблюдений на снегомерном маршруте ГМС. Значимость коэффициентов корреляции оценивалась с помощью *t*-критерия Стьюдента. Для построения оценки корреляционной функции использовались значения коэффициентов корреляции между стационарными и бассейновыми измерениями толщины снега, разбитые на интервалы расстояний по 5 км от ГМС. Анализ данных и расчёт метрик проводился в среде R (<https://www.r-project.org/>).

Результаты и обсуждение

Метеорологические условия в период наблюдений. Период исследований охватывал большой диапазон условий – от мало- до многоснежных зим (см. табл. 2). Иногда разница в поступающих зимних осадках была более чем двукратной, как например в 2011/12 и 2012/13 гг. в бассейне Касмалы или в 2018/19 и 2019/20 гг. в бассейне Маймы. Зимние температуры, напротив, колебались лишь в пределах 1–2 °С от нормы во всех бассейнах. Исключением была очень тёплая зима 2019/20 г. (температуры выше нормы на 4–5 °С). Значительные колебания ветрового режима характерны только для равнинных бассейнов Касмалы и Кучука. В многоснежные годы, как правило, наблюдается большее число дней с высокими скоростями ветра (более 40 дней).

Таблица 3. Средние отклонения, медианные абсолютные отклонения и относительная ошибка определения толщины снежного покрова и снегозапасов по данным ГМС относительно измерений в бассейнах р. Касмала и р. Майма

Год	Среднее отклонение		Медианное абсолютное отклонение		Относительная ошибка	
	толщины, см	снегозапасов, мм	толщины, см	снегозапасов, мм	толщины, %	снегозапасов, %
<i>Бассейн р. Касмала*</i>						
2010/11	13(–14)	83(–23)	15(13)	86(23)	31,6(34,0)	91,4(25,5)
2011/12	8(–8)	58(–13)	9(8)	59(14)	24,6(25,2)	81,5(18,5)
2012/13	48(–24)	274(–26)	50(22)	276(31)	64,6(31,5)	164,0(15,4)
2013/14	5(–6)	55(–8)	10(8)	59(14)	15,2(17,1)	69,1(9,71)
2017/18	25	120	26	120	73,6	161,0
2018/19	22	133	22	133	41,7	116,0
2019/20	47	241	45	238	72,9	160,0
<i>Бассейн р. Майма</i>						
2014/15	4	108	12	97	6,5	84,6
2015/16	–11	4	12	21	30,5	9,2
2016/17	–1	70	10	73	1,4	59,1
2017/18	–0,4	51	11	54	0,7	63,8
2018/19	2	60	9	63	4,5	74,6
2019/20	2	64	11	77	2,7	45,5

*В скобках для бассейна р. Касмала приведены значения ошибок относительно постоянного снегомерного маршрута ГМС. Для этого же бассейна ввиду отсутствия данных ГМС за 2016/17 г. расчёт ошибок для данного периода был невозможен.

В мало- и среднеснежные годы их число снижается до 19–27 дней (практически на 50% ниже нормы). В низкогорном бассейне Маймы число дней со скоростями ветра выше 7,7 м/с в среднем не превышает двух, что практически исключает влияние ветра на пространственную дифференциацию снежного покрова.

Межгодовые различия. Динамика и степень согласованности данных наблюдений на ГМС и бассейновых наблюдений существенно отличались в бассейнах Касмала и Маймы.

В бассейне Маймы значения толщины снега по стационарной рейке достаточно близки к медианным значениям по данным бассейновых наблюдений (среднее отклонение за все годы 1 см). Кроме того, значения отклонений толщины снега были стабильны в годы с разными метеорологическими условиями (табл. 3, рис. 3, а–б). Особенно наглядно это показывает диапазон значений медианных отклонений, который изменялся лишь в пределах 3 см за весь период наблюдений. Небольшие отклонения отмечены как в положительную, так и в отрицательную сторону. Из всех рассматриваемых лет только в 2015/16 г. относительная ошибка превышала 10%. Значения толщины снега по стационарной рейке в бассейне Касмала, напро-

тив, были существенно завышены относительно данных бассейновых наблюдений (среднее отклонение за все годы – 24 см). Относительные ошибки во все годы составили больше 10%, однако нестабильной была и динамика медианных отклонений. Наиболее высокие медианные отклонения толщины снега (более 40 см) отмечены в многоснежные 2012/13 и 2019/20 гг. Значения толщины снега на постоянном маршруте (данные до 2013/14 г.), напротив, отклонялись в отрицательную сторону относительно данных бассейновых наблюдений (среднее отклонение равно –13 см). При этом максимальное значение медианного отклонения также характерно для многоснежного 2012/13 г. Однако диапазон изменчивости и средних, и медианных отклонений был существенно ниже по сравнению со средними и медианными отклонениями по стационарной рейке.

Ограниченность временного охвата или полное отсутствие данных маршрутных снегомерных съёмок на ГМС не позволило в полной мере сравнить межгодовую изменчивость снегозапасов. В обоих бассейнах значения снегозапасов, рассчитанные по формуле (1), существенно превышали медианные значения по данным как бассейновых наблюдений, так и постоян-

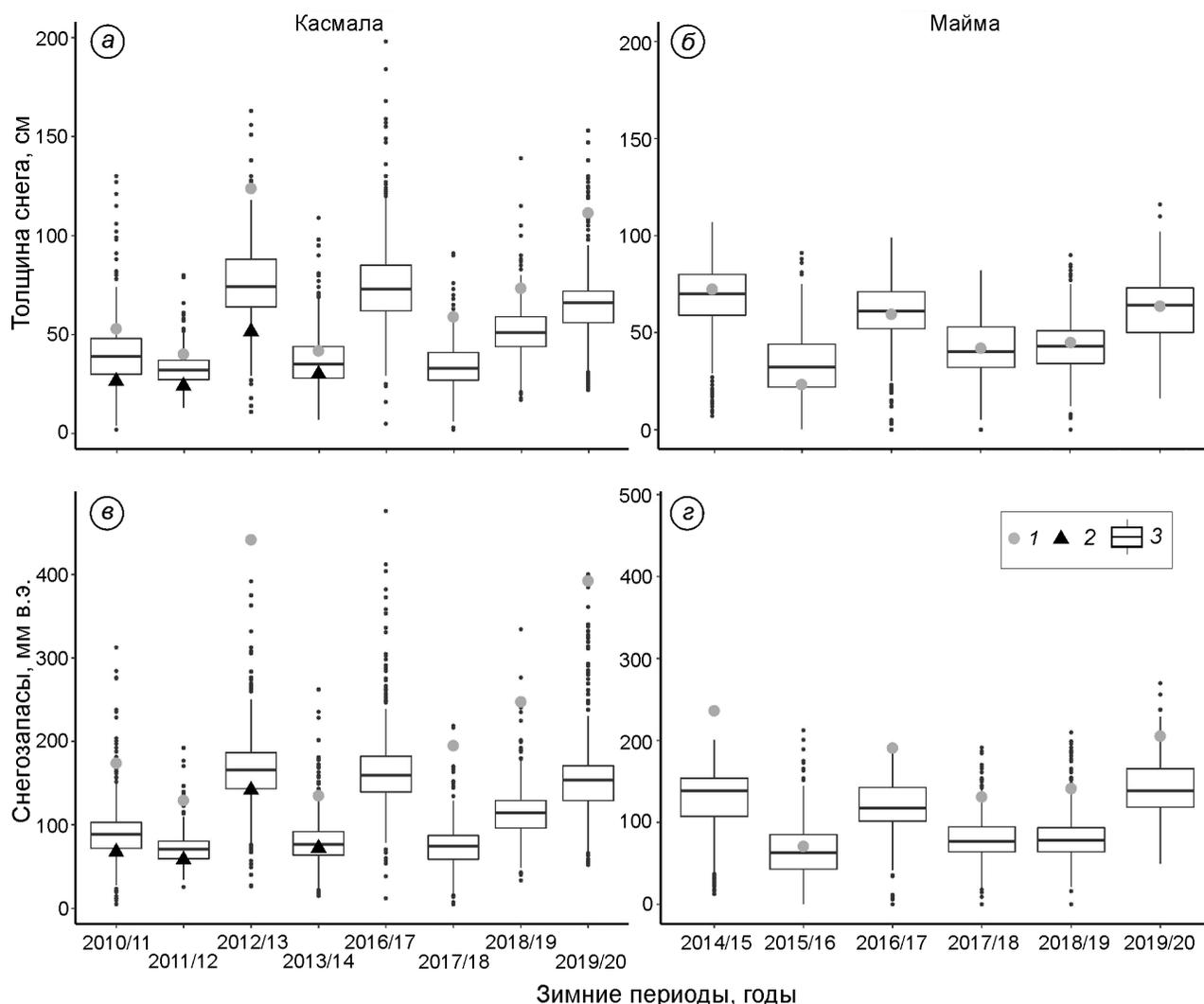


Рис. 3. Распределение значений толщины снежного покрова (а, б) и снегозапасов (в, г) в бассейнах Касмалы и Маймы по данным бассейновых наблюдений в период максимума снегонакопления (конец февраля – начало марта) и наблюдений на ГМС за тот же временной период в 2010/11–2019/20 гг.:

1 – толщина снега и снегозапасы на постоянном снегомерном маршруте ГМС в период бассейновых наблюдений; 2 – средние значения толщины снега и расчётных значений снегозапасов по стационарной рейке в период бассейновых наблюдений; 3 – нижний и верхний края «ящика» обозначают первый и третий квартили соответственно, центральная линия – медиану, «усы» соответствуют максимальному значению, но не более полутора межквартильных размахов; измерения, выходящие за данный интервал, отмечены как выбросы (чёрные точки)

Fig. 3. Distribution of snow depth (а, б) and SWE (в, г) values in the Kasmala and Mayma catchments according to the data of snow surveys during the period of peak accumulation and the same date weather stations data in 2010/11–2019/20:

1 – snow depth and SWE on a weather station permanent snow course at the same dates as snow surveys; 2 – mean snow depth and modelled SWE based on a snow gauge at the same dates as snow surveys; 3 – lower and upper edges of the «box» denote the first and third quartiles, respectively, the central line denotes the median, «whiskers» correspond to the maximum value, but not more than 1,5 interquartile range, measurements beyond this interval are marked as outliers (black dots)

ных маршрутов (см. рис. 3, в–г). Часто расчётные значения снегозапасов выходили за пределы полутора межквартильных размахов. Отклонения возникали в результате завышения моделью плотности снега в среднем на $0,11 \text{ г/см}^3$ (относительно данных бассейновых наблюдений). Также

за счёт систематического завышения толщины снега по постоянной рейке в бассейне Касмалы медианные отклонения снегозапасов в многоснежные годы (2012/13 и 2019/20 гг.) могли превышать собственно медианные значения (медианные отклонения составили более 200 мм).

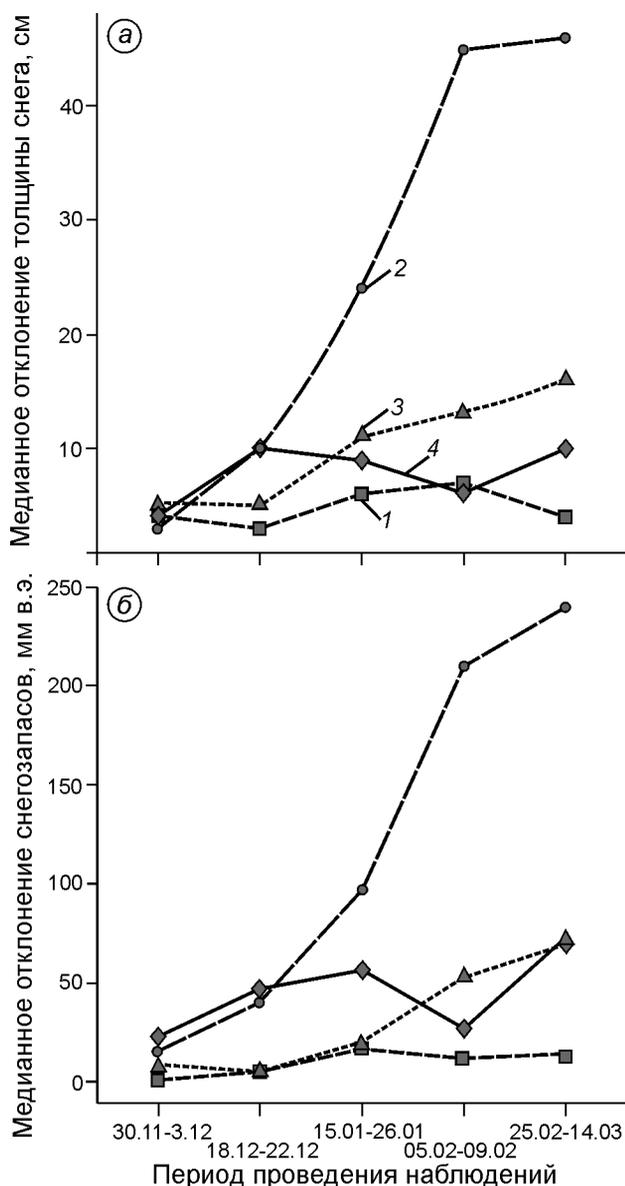


Рис. 4. Медианное абсолютное отклонение толщины снежного покрова (а) и снегозапасов (б) по данным измерений по стационарной рейке и маршрута метеостанции (при наличии) относительно бассейновых наблюдений за тот же период в течение зимы 2019/20 г.:

1 – Кучук (постоянный маршрут); 2 – Касмала; 3 – Кучук; 4 – Майма

Fig. 4. Median absolute deviation of snow depth (a) and SWE (б) between the weather stations snow gauge and course data (if available) and the same date snow surveys during the winter 2019/2020:

1 – Kuchuk (permanent snow course); 2 – Kasmala; 3 – Kuchuk; 4 – Mayma

Вместе с тем, измерения на постоянном маршруте в бассейне Касмалы занижали средние значения снегозапасов относительно бассейновых

данных (среднее отклонения за все годы составило –17 мм). Однако медианные отклонения снегозапасов на постоянном маршруте были существенно ниже аналогичных для расчётных снегозапасов (в среднем на 99 мм). Тем не менее, только в 2013/14 г. относительная ошибка снегозапасов на маршруте ГМС была ниже 10%.

Величины отклонений зависели как от локальных особенностей расположения станции и конфигурации постоянного снегомерного маршрута, так и от общего диапазона изменчивости параметров снежного покрова в бассейне в конкретный зимний период. В бассейне Касмалы в многоснежные и, как правило, в более ветренные годы общий диапазон изменчивости увеличивался и, накладываясь на локальные особенности снегонакопления в окрестностях самой ГМС, определял более высокие значения отклонений. В малоснежные годы (например, 2011/12 и 2013/14 гг.) диапазон изменчивости был небольшим, незначительными были и значения медианных и средних отклонений. Однако толщина снега по постоянной рейке была стабильно выше медианных значений по данным бассейновых наблюдений за счёт локальных особенностей снегонакопления на ГМС как и во все остальные годы (см. рис. 3, а). Хорошая согласованность стационарных и бассейновых данных в бассейне Маймы во многом обусловлена небольшим диапазоном изменчивости параметров снежного покрова в бассейне. Кроме того, ГМС расположена достаточно удачно, без каких-либо явных искажающих факторов. Такая согласованность – во многом случайное совпадение, установить которое без дополнительных наблюдений чрезвычайно сложно. Отметим, что сложность и разнонаправленность влияния метеорологических и ландшафтных факторов на снегонакопление в различные годы серьёзно усложняет задачу введения каких-либо поправочных коэффициентов к измерениям на ГМС для оценки бассейновых средних, хотя иногда определённые корректировки сделать вполне реально [30].

Внутригодовая изменчивость. Общая тенденция для всех трёх бассейнов – постепенное увеличение медианных отклонений от начала зимнего периода к периоду максимальной аккумуляции снега (рис. 4). Если в первые два срока наблюдений (ноябрь–декабрь) медианные отклонения были достаточно близки по всем трём

бассейнам (в пределах 10 см/50 мм), то уже в январе разрыв между бассейном Касмалы и двумя другими бассейнами был почти двукратным и в дальнейшем только увеличивался.

Возможно, столь существенный рост отклонений в бассейне Касмалы вызван многоснежной зимой с несколькими оттепелями и достаточно высокой интенсивностью метелевого перераспределения снега. Косвенно это выражается через значительное число дней со скоростями ветра между сроками выше 7,7 м/с (42 дня, см. табл. 2). Несмотря на схожесть температурного и ветрового режимов в бассейне Кучука, рост медианных отклонений и их абсолютные значения были существенно ниже, чем в бассейне Касмалы. Вероятно, свою роль сыграло меньшее количество снега (в абсолютных величинах). В иные годы мы можем наблюдать более существенные различия между данными ГМС и наблюдениями в бассейне. К сожалению, отсутствие в настоящее время ретроспективных данных не позволяет сделать какие-либо выводы на этот счёт. Вместе с тем медианные отклонения, рассчитанные по данным постоянного маршрута в бассейне Кучука, также показывают существенно меньшие колебания как толщины снега, так и снегозапасов (менее 10 см/25 мм). В бассейне Маймы, несмотря на значительные колебания толщины снега в течение зимы и интенсивные оттепели, рост медианных отклонений весьма умеренный. По всей видимости, практически полное отсутствие ветрового перераспределения снега играет роль стабилизирующего фактора, уменьшающего изменчивость и, как следствие, способствующего хорошей согласованности данных бассейновых и стационарных наблюдений.

Внутрибассейновые различия. Сходства и различия между данными наблюдений на ГМС и бассейновых наблюдений во многом зависели от изменчивости толщины и снегозапасов в пределах природных комплексов внутри бассейнов. При этом величина и направленность отклонений между стационарными наблюдениями и измерениями в пределах отдельных природных комплексов часто очень сильно отличались даже в границах одного бассейна.

Бассейн Маймы характеризовался самой низкой изменчивостью толщины снега и снегозапасов по различным типам природных комплексов. Величина медианных отклонений толщины

составляла от 6 до 12 см. Толщина снега в пределах хвойных лесов в среднем была занижена по сравнению с наблюдениями на ГМС, тогда как лиственные леса и долинные сообщества имели положительные средние отклонения (рис. 5, д). Измерения толщины снега на открытых участках хорошо согласовывались с наблюдениями на ГМС, где постоянная рейка также расположена на открытом участке. Ввиду завышения расчётной плотности снега значения снегозапасов всех природных комплексов были существенно ниже рассчитанных по данным ГМС (см. рис. 5, е) с медианными отклонениями от 55 до 72 мм.

В *бассейне Касмалы* (см. рис. 5, а, б) условия зимы 2019/20 г. и расположение ГМС приводили к существенному превышению значений как толщины, так и снегозапасов над измерениями в пределах всех типов природных комплексов. Медианные отклонения толщины снега составляли от 39 до 53 см, снегозапасов — от 226 до 262 мм.

В *бассейне Кучука* наблюдалась максимальная дифференциация толщины снега и снегозапасов между различными типами природных комплексов. Средние отклонения относительно уровня наблюдений на ГМС распределены практически бимодально (см. рис. 5, в). Открытые и залесённые участки сильно контрастируют между собой, образуя фактически два максимума плотности распределения. Однако если рассматривать бассейн в целом, то значение медианных отклонений толщины снега было равно 12 см (размах 4–17 см), что несколько выше, но вполне сравнимо с бассейном Маймы (в среднем 9 см). Объясняется это тем, что уровень значений толщины снега, измеренных по стационарной рейке на ГМС, находился между измерениями по открытым и залесённым участкам, что вызывало достаточно низкие медианные и средние отклонения (см. рис. 5, в). В данном случае низкие значения отклонений могут вводить в заблуждение о хорошей согласованности измерений по постоянной рейке и данных бассейновых наблюдений. Это — лишь совпадение, которое не отражает физических процессов аккумуляции снежного покрова в бассейне в первую очередь потому, что измерения по стационарной рейке не были близки к значениям по другим открытым участкам в бассейне. В свою очередь данные постоянного снегомерного маршрута в бассейне Кучука хорошо соотносились с данными измерений на открытых участках

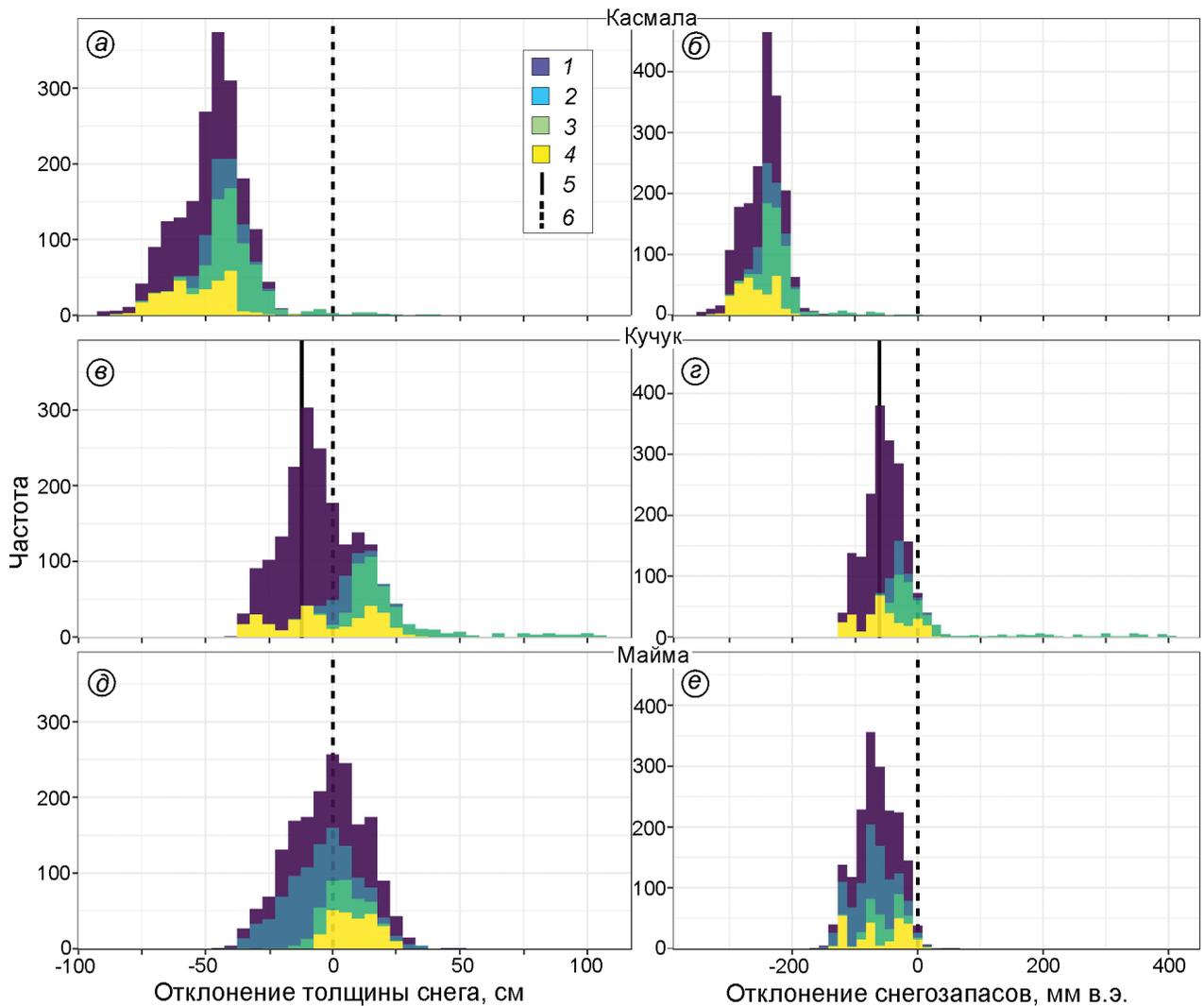


Рис. 5. Распределение значений отклонений толщины снежного покрова и снегозапасов в различных природных комплексах бассейнов рек Касмалы (а, б), Кучука (в, з) и Маймы (д, е) в период максимума снегонакопления относительно наблюдений на метеостанциях за тот же временной период в 2019/20 г.:

1 – открытые луга, степи и с/х угодья; 2 – хвойные леса; 3 – лиственные леса; 4 – долинные сообщества; 5 – уровень значений на постоянном маршруте; б – средний уровень значений по стационарной рейке

Fig. 5. Mean bias distributions of snow depth and SWE for different ecosystems in the Kasmala (a, б), Kuchuk (в, з) and Mayma (д, е) catchments during the period of peak accumulation regarding the same date weather stations data in 2019/20: 1 – open meadows, steppes and arable lands; 2 – coniferous forests; 3 – deciduous forests; 4 – valley communities; 5 – level of values on the permanent snow course; б – average level of values on the snow gauge

(сплошная линия на рис. 5, в, з). Медианное отклонение толщины снега составляло 6 см, снегозапасов – 14 мм. Относительные ошибки толщины и снегозапасов были менее 10%. Но если использовать этот критерий для бассейна Кучука в целом, то репрезентативными окажутся только значения толщины снега по стационарной рейке. Это ещё раз подтверждает, что хорошая согласованность данных по самым разным критериям может быть абсолютно случайным совпадением.

Распределение ошибок близко к нормальному по всем типам природных комплексов в бассейне Маймы, на открытых участках и в хвойных лесах в бассейнах Касмалы и Кучука. В лиственных лесах и долинных сообществах в равнинных бассейнах наблюдались выраженная асимметрия и мультимодальность распределения ошибок. Последнее связано со значительно большей неоднородностью распределения снежного покрова из-за накопления снега на опушках в колочных лесах,

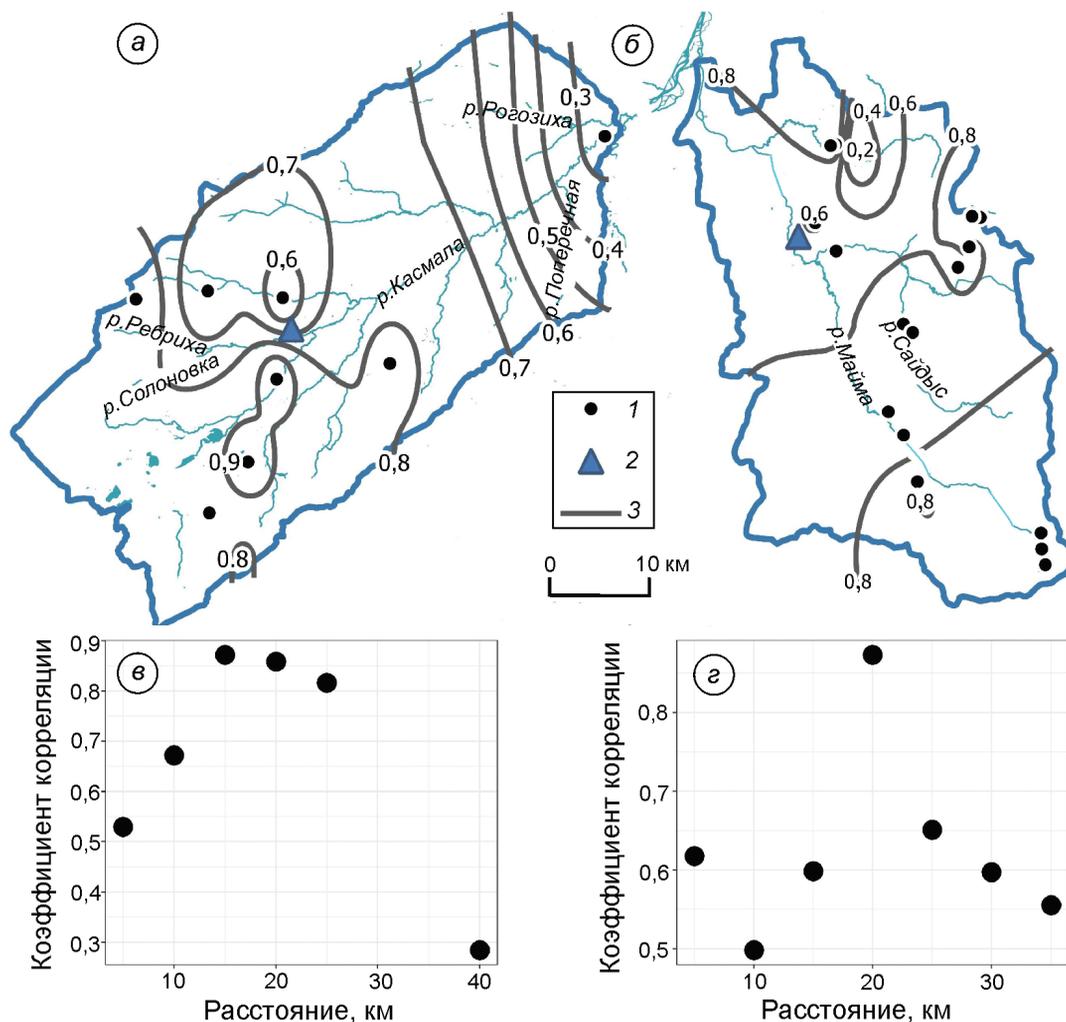


Рис. 6. Пространственная дифференциация коэффициентов корреляции и графики корреляционных функций в бассейнах рек Касмала (а, в) и Майма (б, з):

1 – маршруты и снегомерные площадки, использованные для расчётов корреляции; 2 – метеорологические станции; 3 – изокорреляты

Fig. 6. Spatial distribution of correlation coefficients and correlation functions graphs in the Kasmala (а, в) and Maya (б, з) rivers catchments:

1 – snow courses and sites used for correlation analysis; 2 – weather stations; 3 – isocorrelates

а также с мозаичной растительностью и сложным рельефом в долинах. Тем не менее, только на открытых участках в бассейне Маймы 95%-й доверительный интервал ошибок толщины снега включал ноль (уровень значений по стационарной рейке). Доверительные интервалы ошибок смоделированных значений снегозапасов повсеместно не включали нулевое значение. В бассейне Кучука доверительный интервал ошибок снегозапасов относительно измерений на постоянном маршруте, напротив, включал ноль для открытых участков.

Стационарные и бассейновые наблюдения значимо коррелируют (при $p < 0,001$) практиче-

ски по всем снегомерным маршрутам в бассейнах Касмалы и Маймы. Во многом это обусловлено синхронностью межгодовой изменчивости параметров снежного покрова. Статистически не значимы были только коэффициенты корреляции между стационарными наблюдениями и измерениями толщины снега на крутых южных склонах в бассейне Маймы (коэффициенты корреляции ниже 0,2). Однако пространственная дифференциация коэффициентов корреляции была существенно более неоднородна (рис. 6, а, б). В бассейне Касмалы самые высокие значения коэффициентов корреляции ($> 0,9$)

отмечены с близкими к ГМС лесными маршрутами, тогда как самый ближний и преимущественно открытый снегомерный маршрут имел коэффициент около 0,6. Скорее всего, свою роль здесь также сыграло весьма специфическое расположение снегомерного маршрута ГМС, занижающее значения параметров снежного покрова. В бассейне Маймы наиболее высокая корреляция отмечена с маршрутами и снегомерными площадками в схожих с ГМС открытых долинных местоположениях. В целом, как показывают графики корреляционных функций (см. рис. 6, в, г), на масштабе небольших речных бассейнов (несколько десятков километров) не наблюдается выраженного затухания функции в зависимости от расстояния от ГМС и чёткой зависимости, описывающей поведение функции. Во многом теснота связей зависит от близости характеристик местоположений снегомерных маршрутов в бассейне и ГМС (параметров мезорельефа и растительности) или от иных случайных факторов. Кроме того, в бассейне Маймы не наблюдалось какой-либо зависимости от изменения абсолютной высоты (изменяется пропорционально расстоянию от метеостанции). Определённое затухание корреляционных связей отмечено в бассейне Касмалы на расстояниях более 40 км от ГМС. Но и здесь мы не можем точно сказать, связано это с удалением от ГМС или представляет собой следствие специфических характеристик снегомерного маршрута.

Рассмотренные здесь результаты хорошо соотносятся с исследованиями по оценке репрезентативности для окружающей территории станций мониторинга снегозапасов SNOTEL в Северной Америке [31, 32]. Было показано, что лишь около половины станций SNOTEL имеют ошибку в пределах 10% средней толщины снега на окружающей территории. Кроме того, ошибки, как правило, не зависят от расстояния от станций, а связаны с характеристиками окружающей территории: абсолютными высотами, инсоляцией, характером растительности. С учётом сильной пространственной неоднородности параметров снежного покрова и ограниченности применения точечных данных наиболее оптимально применять методы ассимиляции данных из различных источников — наземных, дистанционных и модельных. Обзор данных методов приведён в работе [33].

Выводы

Исследования на примере трёх речных бассейнов на юге Западной Сибири показали, что данные наблюдений за снежным покровом на метеостанциях существенно отличаются от результатов измерений в окрестностях этих станций. Кроме того, расхождения возникают как у наблюдений по стационарной рейке, так и на постоянных снегомерных маршрутах. Подобные закономерности ранее отмечались в Северной Америке [31, 32], однако для данного региона Сибири они получены впервые. На равнинных бассейнах межгодовые различия в снежности зим в сочетании с различной интенсивностью метелевого переноса вызывают увеличение расхождений между стационарными и бассейновыми данными.

В бассейне Касмалы отклонения измерений толщины снега по стационарной рейке увеличиваются в многоснежные и ветреные годы и уменьшаются вместе со снижением общей изменчивости в малоснежные годы (относительная ошибка — от 73,6 до 15,2%). Вместе с тем расположение метеостанции в любом случае способствует превышению значений толщины снега над бассейновым средним уровнем (в среднем на 24 см). В низкогорном бассейне Маймы, напротив, при практически полном отсутствии влияния метелевого перераспределения значения толщины снега по стационарной рейке и средние по бассейну были близки в годы с разной снежностью (относительная ошибка составляет 0,8–30,5%).

Распределение отклонений по разным типам природных комплексов показало, что расположение метеостанции может случайным образом повлиять на уменьшение различий между стационарными и бассейновыми данными. В бассейне Кучука значительные различия между открытыми и залесёнными местоположениями приводили к неоднородному распределению отклонений с двумя пиками плотности распределения. Уровень наблюдений толщины снега по стационарной рейке на метеостанции располагался между этими пиками, что обусловило небольшую относительную ошибку (7,4%). Оценка пространственной корреляции между стационарными и бассейновыми наблюдениями показала практически полное отсутствие изменений силы кор-

реляционных связей по мере удаления от метеостанции. На уровне небольших речных бассейнов корреляция в большей степени зависела от локальных характеристик местоположения как метеостанции, так и снегомерных маршрутов.

Данные постоянных снегомерных маршрутов (при их доступности) гораздо лучше описывают изменчивость параметров снежного покрова, однако также существенно зависят от характеристик маршрута. В бассейне Касмалы измерения на постоянном маршруте занижают значения толщины и снегозапасов по сравнению с бассейновыми средними (–13 см/–17 мм). В бассейне Кучука измерения на маршруте хорошо сходятся со значениями толщины снега и снегозапасов по пашням и степям (отклонения –1 см/1 мм). В целом, значения отклонений по постоянным маршрутам в абсолютных величинах существенно ниже таковых для измерений по стационарной рейке. Иными словами: данные с постоянного снегомерного маршрута в большинстве случаев будут предпочтительнее данных по стационарной рейке. Однако репрезентативность данных постоянного маршрута в лучшем случае ограничивается участками, схожими с расположением самого маршрута.

Взаимное расположение постоянного снегомерного маршрута и метеостанции – ключевой фактор потенциальной применимости данных к более обширной окрестной территории. В ус-

ловиях активного влияния метелевого перераспределения расположение станции с большой долей вероятности будет вызывать какие-либо отклонения в положительную или отрицательную сторону. Использование простой параметризации плотности для перехода к снегозапасам показало, что, кроме завышения моделью самих значений плотности (на 0,11 г/см³), специфика расположения метеостанции может увеличивать различия между расчётными и измеренными значениями снегозапасов.

Благодарности. Снегомерные наблюдения до зимы 2018/19 г., их обработка и последующий анализ выполнялись в рамках Государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (№ 1021032422891-7). Анализ репрезентативности на различных уровнях и проведение наблюдений в зимний период 2019/20 г. выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-35-60006).

Acknowledgments. Snow surveys until winter 2018/19, their processing and analysis were carried out within the framework of the state project of the Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (№ 1021032422891-7). The representativeness analysis on various scales and observations during winter 2019/20 were funded by the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-35-60006).

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г.В. Алексеев, М.Д. Ананичева, О.А. Анисимов и др. М.: Росгидромет, 2014. 93 с.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
3. Китаев Л.М., Желтухин А.С., Коробов Е.Д., Аблеева В.А. Снежный покров: особенности локального распределения в лесных массивах как возможный источник погрешностей спутниковых данных // Изв. РАН. Серия геогр. 2020. Т. 84. № 6. С. 855–863. doi: 10.31857/S2587556620060072.
4. Китаев Л.М., Титкова Т.Б., Турков Д.В. Точность воспроизведения межгодовой изменчивости снегозапасов Восточно-Европейской равнины по данным спутниковой информации на при-

References

1. *Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii.* Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation. G.V. Alexeev, M.D. Ananicheva, O.A. Anisimov et al. Moscow: Roshydromet, 2014. 264 p. [In Russian].
2. *Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2020 god.* Report on climate features on the territory of Russian Federation in 2020. Moscow: Roshydromet, 2021: 104 p. [In Russian].
3. *Kitaev L.M., Zheltukhin A.S., Korobov E.D., Ableeva V.A.* Snow Cover: Characteristics of Local Distribution in Forests as Possible Source of Satellite Data Errors. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya.* Proc. of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series. 2020, 84 (6): 855–863. doi: 10.31857/S2587556620060072. [In Russian].

- мере продукта GlobSnow (SWE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 164–175. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-164-175.
5. Bormann K.J., Brown R.D., Derksen C., Painter T.H. Estimating snow-cover trends from space // Nature Climate Change. 2018. № 8. P. 924–928. doi: 10.1038/s41558-018-0318-3.
 6. Pulliainen J., Luojus K., Derksen K., Mudryk L., Lemmetyinen J., Salminen M., Ikonen J., Takala M., Cohen J., Smolander T., Norberg J. Patterns and Trends of Northern Hemisphere Snow Mass from 1980 to 2018 // Nature. 2020. № 581 (7808). P. 294–98. doi: 10.1038/s41586-020-2258-0.
 7. Hammond J.C., Saavedra F.A., Kampf S.K. Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016 // Intern. Journ. of Climatology. 2018. № 38. 4369–4383. doi: 10.1002/joc.5674.
 8. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI в. по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–33. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-25-33.
 9. Сосновский А.В., Осокин Н.И., Черняков Г.А. Динамика снегозапасов на равнинной территории России в лесу и в поле при климатических изменениях // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 183–190. doi: /10.15356/2076-6734-2018-2-183-190.
 10. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 87–96.
 11. Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 73–86. doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86.
 12. Grünwald T., Lehning M. Are flat-field snow depth measurements representative? A comparison of selected index sites with areal snow depth measurements at the small catchment scale // Hydrological Processes. 2015. № 29. P. 1717–1728. doi: 10.1002/hyp.10295.
 13. Blöschl G. Scaling issues in snow hydrology // Hydrological Processes. 1999. № 13. P. 2149–2175. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199910)13:14/15<2149::AID-HYP847>3.0.CO;2-8.
 14. López-Moreno J.I., Fassnacht S.R., Beguería S., Latron J.B.P. Variability of Snow Depth at the Plot Scale: Implications for Mean Depth Estimation and Sampling Strategies // Cryosphere. 2011. V. 5. № 3. P. 617–29. <https://doi.org/10.5194/tc-5-617-2011>.
 15. Электронный ресурс: Всерос. НИИ гидрометеорологической информации / Официальный сайт
 4. Kitaev L.M., Titkova T.B., Turkov D.V. Accuracy of reproduction of interannual variability of snow storages of the East European Plain by satellite data illustrated by the example of the GlobSnow (SWE) product. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020, 17 (1): 164–175. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-164-175. [In Russian].
 5. Bormann K.J., Brown R.D., Derksen C., Painter T.H. Estimating snow-cover trends from space. *Nature Climate Change*. 2018, 8: 924–928. doi: 10.1038/s41558-018-0318-3.
 6. Pulliainen J., Luojus K., Derksen K., Mudryk L., Lemmetyinen J., Salminen M., Ikonen J., Takala M., Cohen J., Smolander T., Norberg J. Patterns and Trends of Northern Hemisphere Snow Mass from 1980 to 2018. *Nature*. 2020, 581 (7808): 294–98. doi: 10.1038/s41586-020-2258-0.
 7. Hammond J.C., Saavedra F.A., Kampf S.K. Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016. *Intern. Journ. of Climatology*. 2018, 38: 4369–4383. doi: 10.1002/joc.5674.
 8. Titkova T.B., Vinogradova V.V. Snow occurrence time on the Russia’s territory in the early 21st century (from satellite data). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 25–33. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-25-33. [In Russian].
 9. Sosnovsky A.V., Osokin N.I., Chernyakov G.A. Dynamics of snow storages in forests and fields of Russian plains under climate changes. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (2): 183–190. doi: /10.15356/2076-6734-2018-2-183-190. [In Russian].
 10. Bulygina O.N., Korshunova, N.N., Razuvaev V.N. Monitoring snow cover on the territory of Russia. *Trudy Gidrometcentra Rossii*. Proc. of Hydrometcentre of Russia. 2017, 366: 87–96. [In Russian].
 11. Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryaeva A.V., Kitaev L.M. Regional features of present winter snow accumulation variability in the North Eurasia from data of observations, reanalysis and satellites. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (4): 73–86. doi: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86. [In Russian].
 12. Grünwald T., Lehning M. Are flat-field snow depth measurements representative? A comparison of selected index sites with areal snow depth measurements at the small catchment scale. *Hydrol. Process*. 2015, 29: 1717–1728. doi: 10.1002/hyp.10295.
 13. Blöschl G. Scaling issues in snow hydrology. *Hydrological Processes*. 1999, 13: 2149–2175. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199910)13:14/15<2149::AID-HYP847>3.0.CO;2-8.
 14. López-Moreno J.I., Fassnacht S.R., Beguería S., Latron J.B.P. Variability of Snow Depth at the Plot Scale: Implications for Mean Depth Estimation and Sam-

- Всерос. НИИ гидрометеорологической информации. <http://www.meteo.ru>.
16. Электронный ресурс: Архив погоды. <http://www.rp5.ru>.
 17. *Li L., Pomeroy J.W.* Estimates of Threshold Wind Speeds for Snow Transport Using Meteorological Data // *Journ. of Applied Meteorology*. 1997. V. 36. № 3. P. 205–213. doi: 10.1175/1520-0450(1997)036<0205:EO-TWSF>2.0.CO;2.
 18. Алтайский край. Атлас. Т. 1. М.–Барнаул, 1978. 222 с.
 19. *Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* Биоклиматическая субгумидная зона на равнинах России: засухи, опустынивание/деградация // *Аридные экосистемы*. 2018. Т. 24. № 1 (74). С. 13–20.
 20. *Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A.* Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia // *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2008. V. 54. № 6. P. 585–603. doi: 10.1080/03650340802342268.
 21. *Золотов Д.В., Черных Д.В.* Репрезентативность модельного бассейна р. Касмалы для сравнительных ландшафтно-гидрологических исследований на Приобском плато // *Изв. АлтГУ. Сер. биол. науки, науки о Земле, химия*. 2014. № 3/1 (83). С. 133–138.
 22. *Черных Д.В., Золотов Д.В., Першин Д.К., Бiryukov Р.Ю.* Пространственно-временная дифференциация снежного покрова в бассейне р. Касмалы (Алтайский край) // *Водные ресурсы*. 2019. Т. 46. № 4. С. 359–369. doi: 10.31857/S0321-0596464359-369.
 23. *Лубенец Л.Ф., Черных Д.В.* Ландшафтное картографирование бассейна р. Майма (Русский Алтай) // *Геодезия и картография*. 2018. Т. 79. № 11. С. 15–24. doi: 10.22389/0016-7126-2018-941-11-15-24.
 24. *Лубенец Л.Ф., Черных Д.В., Першин Д.К.* Особенности пространственной дифференциации снежного покрова в низкогорных ландшафтах Русского Алтая (на примере бассейна р. Майма) // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 1. С. 56–64. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-56-64.
 25. *Pershin D., Chernykh D., Lubenets L., Biryukov R., Zolotov D.* Snow surveys in the south of the Western Siberia (Russia) // *Mendeley Data*. 2020. V. 4. doi: 10.17632/8f4ky92by9.4.
 26. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 300 с.
 27. Руководство по снегомерным работам в горах. Л.: Гидрометеоиздат, 1958. 148 с.
 28. *Jost G., Weiler M., Gluns D.R., Younes A.* The Influence of Forest and Topography on Snow Accumulation and Melt at the Watershed-Scale // *Journ. of pling Strategies. Cryosphere*. 2011, 5 (3): 617–29. <https://doi.org/10.5194/tc-5-617-2011>.
 15. RIHMI–WDC Official website: <http://www.meteo.ru>.
 16. Weather archive, website: <http://www.rp5.ru>.
 17. *Li L., Pomeroy J.W.* Estimates of Threshold Wind Speeds for Snow Transport Using Meteorological Data. *Journ. of Applied Meteorology*. 1997, 36 (3): 205–213. doi: 10.1175/1520-0450(1997)036<0205:EO-TWSF>2.0.CO;2.
 18. *Altajskij kraj. Atlas. T. 1.* Atlas of the Altai Krai. V. 1. M.–Barnaul, 1978: 222 p. [In Russian].
 19. *Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B.* Bioclimatic Subhumid Zone of Russian Plains: Droughts, Desertification, and Land Degradation. *Aridnye ekosistemy. Arid Ecosystems*. 2018, 1 (74): 13–20. [In Russian].
 20. *Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A.* Indicators of desertification in the Kulunda Steppe in the south of Western Siberia. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2008, 54 (6): 585–603. doi: 10.1080/03650340802342268.
 21. *Zolotov D.V., Chernykh D.V.* The representativity of the Kasmala River Model Watershed for Comparative Landscape-Hydrological Studies at the Ob Plateau. *Izvestia Altayskogo Universiteta. Izvestiya of Altai State University. Ser. biol. nauki, nauki o Zemle, himiya*. 2014, 3/1 (83): 133–138. [In Russian].
 22. *Chernykh D.V., Zolotov D.V., Pershin D.K., Biryukov R.Y.* Space and time differentiation of snow cover in the Kasmala river basin, Altai krai. *Vodnye resursy. Water Resources*. 2019, 46 (4): 359–369. doi: 10.31857/S0321-0596464359-369. [In Russian].
 23. *Lubenets L.F., Chernykh D.V.* Landscape structure of Maima river basin (Russian Altai). *Geodeziya i kartografiya. Geodesy and Cartography*. 2018, 79 (11): 15–24. doi: 10.22389/0016-7126-2018-941-11-15-24. [In Russian].
 24. *Lubenets L.F., Chernykh D.V., Pershin D.K.* Features of spatial differentiation of snow cover in low-mountain landscapes of the Russian Altai (case study of the Maima river basin). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (1): 56–64. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-56-64. [In Russian].
 25. *Pershin D., Chernykh D., Lubenets L., Biryukov R., Zolotov D.* Snow surveys in the south of the Western Siberia (Russia). *Mendeley Data*. 2020. Version 4. doi: 10.17632/8f4ky92by9.4.
 26. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stanciyam i postam.* Guidance to hydrometeorological stations and posts. Is. 3. Pt. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985: 300 p. [In Russian].
 27. *Rukovodstvo po snegomernym rabotam v gorah.* Manual on snow-measuring works in the mountains. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1958: 148 p. [In Russian].
 28. *Jost G., Weiler M., Gluns D.R., Younes A.* The Influence of Forest and Topography on Snow Accumu-

- Hydrology. 2007. V. 347. № 1–2. P. 101–115. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.09.006.
29. *Sturm M., Taras B., Liston G.E., Derksen C., Jonas T., Lea J.* Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes // *Journ. of Hydrometeorology*. 2010. V. 11. № 6. P. 1380–94. doi: 10.1175/2010JHM1202.1.
30. *Beaton A.D., Metcalfe R.A., Buttle J.M., Franklin S.E.* Investigating Snowpack across Scale in the Northern Great Lakes–St. Lawrence Forest Region of Central Ontario, Canada // *Hydrological Processes*. 2019. V. 33. № 26. P. 3310–29. doi: 10.1002/hyp.13558.
31. *Molotch N.P., Bales R.C.* Scaling snow observations from the point to the grid element: Implications for observation network design // *Water Resources Research*. 2005. V. 41. W11421. doi: 10.1029/2005WR004229.
32. *Meromy L., Molotch N.P., Link T.E., Fassnacht S.R., Rice R.* Subgrid variability of snow water equivalent at operational snow stations in the western USA // *Hydrological Processes*. 2013. V. 27. P. 2383–2400. doi: 10.1002/hyp.9355.
33. *Largeron C., Dumont M., Morin S., Boone A., Lafaysse M., Metref S., Cosme E., Jonas T., Winstral A., Margulis S.A.* Toward Snow Cover Estimation in Mountainous Areas Using Modern Data Assimilation Methods: A Review // *Frontiers in Earth Science*. 2020. V. 8. doi:10.3389/feart.2020.00325.
29. *Sturm M., Taras B., Liston G.E., Derksen C., Jonas T., Lea J.* Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes. *Journ. of Hydrometeorology*. 2010, 11 (6): 1380–94. doi: 10.1175/2010JHM1202.1.
30. *Beaton A.D., Metcalfe R.A., Buttle J.M., Franklin S.E.* Investigating Snowpack across Scale in the Northern Great Lakes–St. Lawrence Forest Region of Central Ontario, Canada. *Hydrological Processes*. 2019, 33 (26): 3310–29. doi: 10.1002/hyp.13558.
31. *Molotch N.P., Bales R.C.* Scaling snow observations from the point to the grid element: Implications for observation network design. *Water Resources Research*. 2005, 41: W11421. doi:10.1029/2005WR004229.
32. *Meromy L., Molotch N.P., Link T.E., Fassnacht S.R., Rice R.* Subgrid variability of snow water equivalent at operational snow stations in the western USA. *Hydrological Processes*. 2013, 27: 2383–2400. doi: 10.1002/hyp.9355.
33. *Largeron C., Dumont M., Morin S., Boone A., Lafaysse M., Metref S., Cosme E., Jonas T., Winstral A., Margulis S.A.* Toward Snow Cover Estimation in Mountainous Areas Using Modern Data Assimilation Methods: A Review. *Frontiers in Earth Science*. 2020, 8. doi:10.3389/feart.2020.00325.