

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-95-110>

УДК 551.506.3+551.582.2

Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land на территории Пермского края

А.Д. Крючков, Н.А. Калинин

*Пермский государственный национальный
исследовательский университет, г. Пермь, Россия
meteo@psu.ru*

Проанализирована согласованность информации о высоте снежного покрова, содержащейся в реанализе ERA5-Land, данным метеорологических станций Пермского края. Исследования проведены на материалах за период с октября 1990 по май 2020 года. Показано, что межгодовая изменчивость снежного покрова в целом успешно отображается указанной версией реанализа. Данные о наличии снега более качественно воспроизводятся в период возникновения снежного покрова, чем в период схода. В реанализе ERA5-Land наблюдается систематическое завышение высоты снежного покрова по отношению к фактическим наблюдениям, а распределение ошибок по территории Пермского края носит преимущественно меридиональный характер. В сезонной изменчивости снежного покрова согласно реанализу наблюдается смещение максимумов в сторону их более раннего наступления по отношению к фактическим наблюдениям.

Ключевые слова: снежный покров, реанализ, метеорологические станции, сезонная изменчивость, межгодовая изменчивость

Comparison of snow cover characteristics according to weather stations and ERA 5-Land reanalysis in the Perm region

A.D. Kryuchkov, N.A. Kalinin

*Perm State University, Perm, Russia
meteo@psu.ru*

The consistency of information on the snow depth contained in the ERA 5-Land reanalysis with data of weather stations of the Perm region is analyzed. The study is performed for the period from October 1990 to May 2020. It is shown that the interannual variability of the snow cover is generally successfully reflected by the current version of the reanalysis. Data on the snow availability are more accurately reproduced during the period of formation of the snow cover than during its melt. The performed calculations demonstrate a systematic overestimation of the snow depth in the ERA 5-Land reanalysis relative to the actual observations and a predominantly meridional error distribution on the territory of the Perm region. The maximum values in the seasonal variability of the snow cover occur earlier in the reanalysis than in the actual observations.

Keywords: snow cover, reanalysis, weather stations, seasonal variability, interannual variability

Введение

Многие физические процессы, управляющие климатической системой, сильно зависят от наличия снега на земле. Благодаря таким свойствам, как высокое альbedo и излучательная способность, поглощение тепла при таянии и низкая шероховатость, снежный покров резко изменяет приповерхностный энергетический обмен и, следовательно, состояние окружающей среды, что особенно проявляется в Северном полушарии. Обладая низкой теплопроводностью, снег предохраняет почву от промерзания, а посевы от вымерзания. Стоит заметить, что снег является важной частью глобального круговорота воды, содержит в себе огромные запасы влаги, которые при таянии существенно влияют на речной сток [2].

Основным источником сведений о состоянии снежного покрова на данный момент являются наблюдения за характеристиками снега на гидрометеорологических станциях. Однако существующие данные сети наблюдений распределены неравномерно. Кроме того, информация по отдельным пунктам не всегда бывает доступна. Данная проблема особенно актуальна в регионах с высокой контрастностью залегания снежного покрова из-за обширного пространства и сложного рельефа, например в Пермском крае. Указанные факторы сильно влияют на уровень знаний о формировании и пространственно-временном распределении характеристик снежного покрова, в том числе при восстановлении условий прошлых лет.

Одним из перспективных источников данных о снежном покрове являются результаты дистанционного зондирования, полученные с помощью искусственных спутников Земли. Для восполнения ограниченности наземных наблюдений применение спутниковых измерений рассматривается в плане более широкого пространственного охвата территории, благодаря чему можно увидеть динамику процессов, связанных со снегом. При анализе состояния местности немаловажным фактором является объективность на момент съёмки. С другой стороны, существует ряд проблем, связанных с состоянием снежного покрова, влиянием на него растительности и наличием облачности во время зондирования, что характерно для Пермского края [8].

В сложившейся ситуации потенциальными источниками данных о снежном покрове являются реанализы. Их преимущество заключается в полноте и однородности предоставляемых данных, а также охвате труднодоступных для наземных наблюдений территорий. В работах [9–14, 16] проведены исследования различных реанализов, по результатам которых можно сделать вывод об адекватном воспроизведении характеристик снежного покрова на глобальном уровне реанализом ERA-INTERIM Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF).

Исследования возможности применения ERA-INTERIM для изучения распределения характеристик снежного покрова на региональном уровне,

приведенные в [3, 7, 9–11 16], показали неоднозначные результаты. Так, верификация характеристик снежности на территории Пермского края [3] выявила некоторые проблемы, связанные в первую очередь с низким пространственным разрешением, применяемым в указанном реанализе.

В то же время реанализы постоянно совершенствуются, исправляются ошибки более ранних версий, улучшается разрешение во времени и пространстве. Качество таких изменений также требует специальной оценки.

Целью данной работы является исследование сезонной и межгодовой изменчивости высоты снежного покрова в Пермском крае по данным стационарных наблюдений и последней версии реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA 5-Land.

Материалы и методы

В данном исследовании использованы следующие материалы за период с октября 1990 по май 2020 года:

1. Средние значения высоты снежного покрова, полученные путем деления суммы высоты снежного покрова за месяц на число дней со снегом. Информация по 25 метеорологическим станциям Пермского края представлена в метеорологических ежемесячниках [5].

2. Среднемесячные данные по высоте снежного покрова из реанализа ERA 5-Land. Используемый реанализ является детализированной версией информации о поверхности суши обновленного глобального реанализа ECMWF ERA 5, предоставляющего ежечасные данные по многим параметрам состояния атмосферы, земли и моря вместе с оценками неопределенности. Информация представляет собой мгновенное значение высоты снежного покрова, осредненное по квадрату сетки с пространственным разрешением 9 км ($0,1 \times 0,1^\circ$) [15]. Из почасовых данных рассчитываются средние ежемесячные значения. Осреднение по квадрату сетки позволяет извлекать необходимую информацию из массива глобальных данных напрямую по координатам метеорологических станций без дополнительных расчетов.

Для каждой станции проводилось сопоставление высоты снежного покрова (в сантиметрах) по результатам измерений и данным реанализа ERA 5-Land как за весь период (1990–2020 гг.), так и с разделением по десятилетиям. Рассматривалось наличие или отсутствие снежного покрова в начале (в Пермском крае по данным долгосрочных наблюдений снежный покров появляется преимущественно в октябре) и конце (в мае) его залегания. Произведен расчет разности сопоставляемых величин, которая в дальнейшем была принята за величину ошибки. Текущие отклонения были вычислены как для всего холодного периода, так и отдельно по месяцам. Приведены ошибки в абсолютном значении, рассчитанные по формуле:

$$\Delta X = X_{\phi} - X_r,$$

где ΔX – абсолютная ошибка измерения; X_{ϕ} – значение фактического наблюдения; X_r – значение реанализа.

Расчет относительных ошибок производился по формуле

$$E = \frac{|\Delta X|}{X_{\phi}} \cdot 100 \%.$$

В качестве дополнительной меры сходства рассчитаны коэффициенты корреляции между данными наблюдений и реанализа ERA 5-Land.

Оценка адекватности воспроизведения реанализом ERA 5-Land сведений о наличии снега

Соответствие сведений о наличии снега по данным метеорологических станций Пермского края и реанализа ERA 5-Land в октябре наблюдается в 87 % случаев. Совпадение по всем пунктам наблюдений зафиксировано в 10 из 30 исследуемых лет, последний раз в 2015 году. Наименьшее число совпавших данных в октябре встречается в Чернушке (22 случая из 30), наибольшее – на станциях Вая, Чердынь, Коса, Октябрьский (29 случаев из 30). В целом отмечается постепенный рост числа совпадений с юго-запада на северо-восток, причем основной вклад в проявление данной зависимости вносит последнее десятилетие (2010–2020 гг.).

Анализ расхождений данных в октябре за тридцатилетний период показывает, что 49 % ошибок возникает при недооценке реанализом появления в той или иной местности снежного покрова. В остальных случаях реанализ, наоборот, показывает наличие снега на станциях, где его не зафиксировали наблюдатели. На общем фоне выделяются октябрь 1998 г., когда одновременно в 13 пунктах наблюдений не совпала информация из исследуемых источников, и октябрь 2005 г. с 12 ошибками. В первом случае массив реанализа преимущественно показал наличие снежного покрова, а фактические наблюдения не зафиксировали искомую характеристику, а во втором – снежный покров отмечен на метеорологических станциях, но не отображен в реанализе.

В мае информация о наличии снежного покрова из двух исследуемых источников совпала в 73 % случаев. За тридцатилетний период не зафиксировано ни одного совпадения одновременно во всех сравниваемых пунктах. С другой стороны, если в октябре в Чернушке отмечено минимальное число совпадающих данных, то в мае, наоборот, наблюдается максимум из возможных значений. В противоположность этой южной станции можно отметить Добрянку, где данные совпали лишь в 14 случаях из 30. В среднем по краю соответствие выявлено в 22 случаях из 30, что меньше значений октября на 4 пункта. При этом можно отметить

некоторую концентрацию наибольших совпадений на юге исследуемой территории.

Разбор случаев несовпадения данных указывает на то, что в мае большая часть ошибок (80 %) связана с фактическим отсутствием снежного покрова там, где его определяет реанализ. В остальных случаях метеорологические наблюдения зафиксировали наличие снега, но в реанализе соответствующих данных не обнаружено. Максимальные несоответствия получены в мае 2014 г. (14 станций). Еще для восьми лет ошибки есть от 10 до 12 пунктов наблюдений.

Стоит отметить, что в ряде случаев не было абсолютного отсутствия данных и реанализ ERA 5-Land показывает наличие снега, однако приведенные значения толщины снежного покрова в 0,4 см и менее принимались равными нулю. Если же высота снежного покрова по реанализу определялась как 0,5 см и более, то этот момент фиксировался как случай с наличием снега.

Высота снежного покрова

Анализ данных за 30 лет показывает, что среднемесячные значения высоты снежного покрова, которые содержатся в реанализе ERA 5-Land, в целом превышают станционные данные (табл. 1). Превышение, осредненное за год, характерно для 21 пункта наблюдений из 24 (88 % станций; информация по Чермозу рассматривается отдельно), составив в среднем 6 см. На станции Кудымкар отмечено совпадение исследуемых характеристик, а для Ножовки и Осы реанализ занижает показатели на 5 и 7 см соответственно. Относительная ошибка составляет 32 % в годовом выражении.

Значения средней ошибки 5 см и менее соответствуют преимущественно станциям, расположенным на западе Пермского края (рис. 1а), что можно считать хорошим результатом. Исключением является пункт наблюдений в Чайковском, для которого реанализ завышает показания в среднем на 10 см. С другой стороны, малая величина ошибки выявлена в Перми (5 см), Чердыни (4 см) и Кунгуре (3 см), расположенных восточнее.

Наибольшие показатели (10 см и более), кроме Чайковского, получены для Добрянки (12 см), Березников (10 см) и станций, расположенных на востоке Пермского края вблизи Уральского хребта. Например, в Губахе среднее отклонение составляет 11 см, в Лысьве – 15 см, а для станции Вая исследуемая характеристика составила 18 см.

Подобная закономерность прослеживается и при анализе относительных ошибок (рис. 1б). На западе Пермского края величины отклонений в относительном выражении изменяются от 12 до 29 %, в то время как для восточных станций данная характеристика составляет 40–65 %.

Исходя из приведенных выше расчетов можно предположить, что изменения величины ошибки носят в целом меридиональный

характер, т. е. наблюдается прямая зависимость роста отклонений данных реанализа от фактических наблюдений при перемещении с запада на восток. Значения на отдельных станциях, не соответствующие данному положению, являются скорее исключениями и зависят от локальных условий местности.

Таблица 1. Средние значения абсолютной ошибки высоты снежного покрова, см

Table 1. Average absolute error values of the snow depth, cm

Станция	Месяц								Среднее
	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	
Вая	-4	-17	-24	-26	-20	-13	-26	-12	-18
Нырб	0	-7	-14	-16	-10	-2	-11	-2	-8
Чердынь	0	-6	-10	-10	-4	4	-7	-1	-4
Усть-Черная	1	-3	-7	-5	1	7	0	1	-1
Гайны	1	-4	-9	-11	-6	2	-4	0	-4
Коса	0	-4	-9	-10	-6	1	-4	0	-4
Кочево	0	-4	-7	-7	-5	0	-6	0	-3
Березники	0	-6	-12	-14	-14	-10	-18	-3	-10
Кудымкар	1	-1	-4	-4	-1	4	0	0	0
Губаха	1	-6	-14	-15	-14	-9	-22	-8	-11
Бисер	-1	-9	-15	-17	-12	-2	-16	-6	-10
Добрянка	0	-6	-14	-18	-18	-17	-19	-1	-12
Верещагино	0	-3	-5	-8	-7	-5	-6	1	-4
Лысьва	-1	-9	-18	-23	-23	-23	-26	-2	-15
Пермь	1	-1	-7	-10	-8	-6	-8	1	-5
Кын	0	-8	-15	-16	-13	-11	-16	-2	-10
Оханск	0	-5	-11	-14	-12	-10	-10	0	-8
Б. Соснова	0	-2	-8	-9	-7	-6	-3	0	-4
Кунгур	1	-4	-10	-10	-5	-2	3	1	-3
Оса	1	2	6	13	18	15	3	0	7
Ножовка	1	1	0	5	11	13	6	1	5
Чайковский	0	-4	-12	-16	-15	-16	-16	-1	-10
Чернушка	0	-5	-14	-15	-11	-5	1	0	-6
Октябрьский	1	-6	-14	-17	-14	-9	-8	-0	-9
Чермоз 1	2	6	12	21	27	28	10	1	13
Чермоз 2	1	-2	-7	-9	-8	-6	-11	-1	-5
Чермоз среднее	1	2	3	6	10	11	-1	0	4
Среднее	0	-5	-10	-11	-8	-4	-9	-1	-6

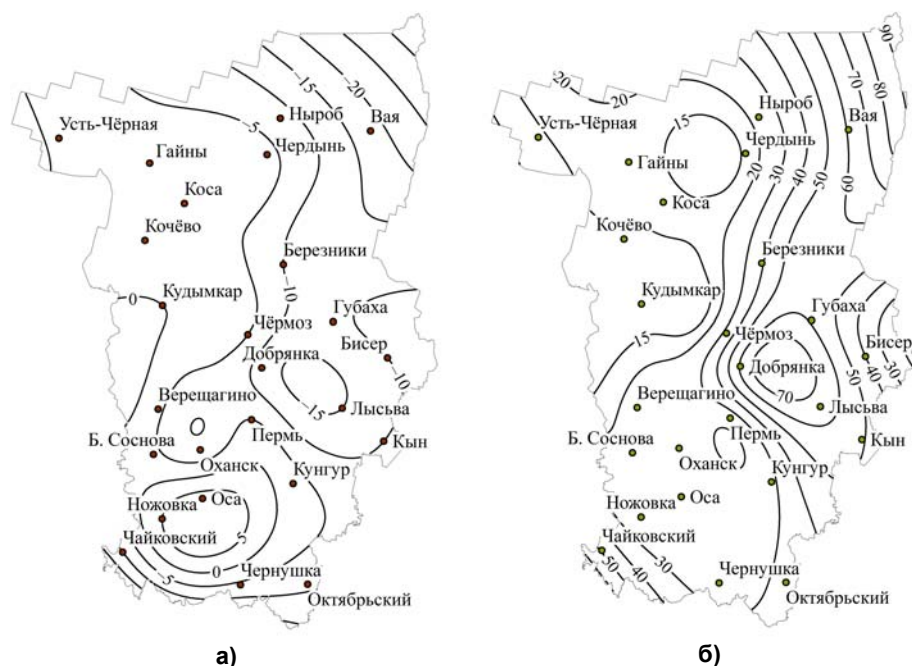


Рис. 1. Разница между наблюдениями на метеорологических станциях Пермского края и данными реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.: средняя абсолютная ошибка, см (а); средняя относительная ошибка, % (б).
Fig. 1. The difference between observations at meteorological stations in the Perm Region and the ERA 5-Land reanalysis data for the period 1990–2020: average absolute error, cm (a); average relative error, (б).

Отдельное внимание стоит уделить станции Чермоз. Указанный пункт наблюдений находится почти на границе двух квадратов пространственной сетки реанализа. Отметим, что подобное положение имеют несколько метеорологических станций, однако только для Чермоза, ввиду его особенного географического положения, данный фактор имеет критическое значение. Условия репрезентативности метеостанции выполняются, однако пункт наблюдения находится на возвышенности, которая с трех сторон окружена водоемами, поэтому зимой происходит заметное перераспределение снежных масс [6]. Физико-географические условия приводят к тому, что станция Чермоз отличается наименьшими показателями высоты снежного покрова среди станций Пермского края [4].

В то же время соответствующие Чермозу и ближайšie к нему квадраты пространственной сетки реанализа ERA 5-Land отличаются существенными различиями. При этом подобных контрастов не наблюдается в отношении других станций. В зависимости от попадания в ту или иную ячейку реанализ может как превышать фактические наблюдения,

так и существенно их занижать. Расхождения в данных представлены на рис. 2.

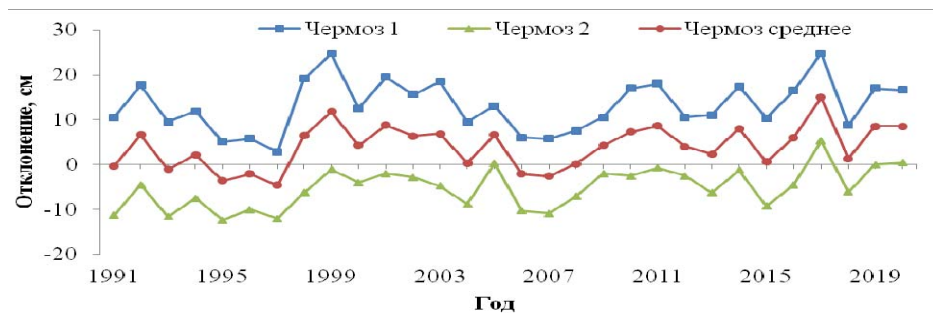


Рис. 2. Разница между наблюдениями на метеорологической станции Чермоз и данными реанализа ERA 5-Land в двух квадратах (Чермоз 1 и Чермоз 2), а также средние значения (Чермоз среднее) за период 1990–2020 гг.

Fig. 2. The difference between the observations at the Chermoz meteorological station and the ERA 5-Land reanalysis data in two grid boxes (Chermoz 1 and Chermoz 2), and the average values (Chermoz average) for the period 1990–2020.

Стоит отметить, что используемые в данном исследовании координаты станции Чермоз соответствуют квадрату, в котором значения реанализа оказываются значительно ниже измеряемых на метеорологической станции (Чермоз 1). При этом ближе к фактическим наблюдениям находятся показатели соседней ячейки (Чермоз 2). Было произведено линейное интерполирование значений путем расчета среднего арифметического для получения пограничной информации. Рассчитанные значения также представлены на рис. 2.

Вычисленные пограничные значения оказываются в среднем ближе к данным наблюдений. Отклонение от фактических значений составляет 4 см, в то время как для квадрата сетки № 1 (Чермоз 1) разница показателей достигает 13 см, а для второй ячейки (Чермоз 2) – 5 см со знаком минус. Однако в последние годы заметна тенденция к росту данных наблюдений на станции Чермоз по отношению к информации, содержащейся в массиве ERA 5-Land. В частности, в последние 2 года складывается ситуация, когда данные второго квадрата (Чермоз 2) оказываются ближе к фактическим наблюдениям, чем проинтерполированные значения.

Сезонная изменчивость высоты снежного покрова

Результаты расчета коэффициентов корреляции между данными метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land отдельно по месяцам (30 случаев для выборочной совокупности) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между данными метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land
Table 2. Correlation coefficients between observational data and reanalysis ERA 5-Land

Станция	Месяц								Среднее
	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	
Вая	0,62	0,65	0,67	0,78	0,72	0,70	0,79	0,65	0,94
Ныроб	0,70	0,83	0,75	0,65	0,69	0,65	0,70	0,70	0,95
Чердынь	0,89	0,87	0,85	0,82	0,67	0,66	0,77	0,86	0,96
Усть-Черная	0,27	0,91	0,77	0,87	0,74	0,72	0,71	0,53	0,95
Гайны	0,64	0,87	0,86	0,87	0,81	0,79	0,79	0,71	0,96
Коса	0,69	0,84	0,87	0,90	0,82	0,81	0,80	0,88	0,96
Кочево	0,74	0,85	0,85	0,84	0,75	0,77	0,75	0,55	0,96
Березники	0,70	0,73	0,84	0,77	0,72	0,70	0,63	0,71	0,94
Кудымкар	0,82	0,77	0,87	0,79	0,83	0,85	0,78	0,82	0,96
Губаха	0,67	0,54	0,63	0,67	0,79	0,74	0,76	0,70	0,95
Бисер	0,84	0,88	0,79	0,76	0,81	0,80	0,69	0,61	0,95
Добрянка	0,63	0,52	0,88	0,83	0,84	0,69	0,65	0,81	0,96
Верещагино	0,86	0,84	0,49	0,86	0,83	0,80	0,63	0,80	0,96
Лысьва	0,79	0,65	0,85	0,84	0,90	0,81	0,65	0,34	0,95
Пермь	0,89	0,70	0,92	0,86	0,87	0,84	0,76	0,73	0,97
Кын	0,74	0,57	0,67	0,74	0,63	0,44	0,41	0,36	0,91
Оханск	0,91	0,64	0,83	0,75	0,76	0,73	0,72	0,85	0,96
Б. Соснова	0,81	0,68	0,83	0,82	0,84	0,80	0,67	-0,07	0,96
Кунгур	0,88	0,69	0,84	0,78	0,76	0,75	0,86	0,96	0,93
Оса	0,82	0,62	0,77	0,56	0,66	0,61	0,73	0,88	0,91
Ножовка	0,85	0,65	0,81	0,75	0,81	0,77	0,82	0,97	0,95
Чайковский	0,63	0,74	0,82	0,76	0,87	0,68	0,80	0,76	0,96
Чернушка	0,31	0,81	0,78	0,70	0,69	0,67	0,73	0,93	0,92
Октябрьский	0,81	0,75	0,76	0,82	0,85	0,82	0,74	0,73	0,96
Чермоз 1	0,83	0,61	0,86	0,76	0,63	0,61	0,78	0,18	0,91
Чермоз 2	0,79	0,61	0,87	0,76	0,65	0,59	0,78	0,19	0,91
Чермоз среднее	0,81	0,61	0,87	0,76	0,64	0,59	0,78	0,19	0,91

Примечание. Жирным шрифтом выделены незначимые величины коэффициентов корреляции.

Оценка значимости для малого числа выборочных случаев выполнена с использованием предложенного Р. Фишером метода зэт (z) для доверительной вероятности 0,95. Метод z основан на том, что между коэффициентом корреляции (r) и показателем z существует определенная

функциональная связь, позволяющая переводить r в z и наоборот: $z \approx \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}$. Полученную с помощью z величину выборочного порога достоверности коэффициента корреляции сопоставляют по таблице Стьюдента, а затем находят доверительные границы коэффициентов корреляции [1].

Анализ среднего многолетнего сезонного хода высоты снежного покрова с 1990 по 2020 год показывает, что максимальные значения по станционным данным приходятся на март, в то время как в реанализе максимум наступает в феврале, а в марте зафиксировано некоторое снижение средней высоты (рис. 3). В результате в марте наблюдается относительно небольшое (13 %) превышение данных ERA 5-Land над фактическими наблюдениями. В апреле, в период активного снеготаяния, разница становится более значительной. Наибольшие отличия в двух типах данных, несмотря на высокий уровень связи (коэффициент корреляции равен 0,78), наблюдаются в зимние месяцы, в частности в январе.

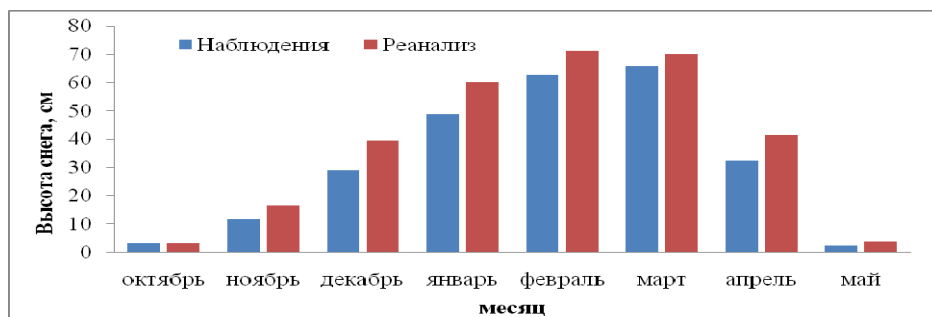


Рис. 3. Средние многолетние месячные значения высоты снежного покрова по данным станционных наблюдений и реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.

Fig. 3. Average long-term monthly values of snow cover height according to the data of station observations and reanalysis of ERA 5-Land for the period 1990-2020.

При более тщательном изучении особенностей сезонного хода высоты снежного покрова отдельно по станциям выявлено, что наступление максимумов исследуемой характеристики в марте согласно фактическим наблюдениям отмечается в 21 пункте из 25. В Перми и Лысьве наибольшие значения высоты снега наблюдаются как в марте, так и феврале, а на станциях Оса и Чайковский максимумы наступают в феврале, после чего высота снежного покрова начинает снижаться. По данным реанализа обратная картина (наибольшие значения в феврале) характерна для 19 пунктов наблюдений, в том числе для Чайковского. В пяти случаях, среди которых Лысьва, отмечается равенство во второй и третий месяцы

зимы, и только для станции Бисер, как и при фактических наблюдениях, максимум наступает в марте. Таким образом, сезонный ход высоты снежного покрова в исследуемых массивах данных полностью совпадает только в трех пунктах наблюдений.

Согласно анализу тесноты связей, можно отметить высокие значения коэффициентов корреляции в течение сезона на станции Кудымкар, которые изменяются от 0,77 до 0,87. Данный пункт наблюдений отличается также наименьшими значениями среднемесячных отклонений (4 см и менее), а в процентном соотношении существенные ошибки (34 %) в Кудымкаре зафиксированы только в мае.

Средняя и даже слабая связь между двумя массивами данных прослеживается на станции Кын. В ноябре коэффициент корреляции составляет 0,57, а относительная ошибка достигает 78 %. В зимние месяцы значения r изменяются от 0,63 до 0,74, а в весенние месяцы связь вновь ослабевает, значение коэффициента корреляции в мае опускается до 0,36, а относительная ошибка в данном пункте наблюдений при этом составляет 144 %. На этом фоне отклонение в 17 % в марте можно считать положительным результатом, который объясняется наступлением в этом месяце периода максимального снегонакопления.

Стоит отметить, что большие значения относительной ошибки являются результатом осреднения данной характеристики по всем месяцам за 30 лет. В отдельные месяцы для разных пунктов наблюдений относительная ошибка может, как отсутствовать, так и достигать четырехзначной величины.

Для большинства станций Пермского края уровень связи в исследуемый период изменяется от среднего до высокого. Например, в Кунгуре и Ножовке в мае коэффициент корреляции имеет значения 0,96 и 0,97 соответственно, в то время как в этот же месяц в Усть-Черной данная характеристика составляет 0,53.

Исследование среднемесячных отклонений показывает, что в период максимального снегонакопления средняя абсолютная ошибка 5 см и менее (относительная ошибка до 10 %) отмечается на 10 станциях. При этом в Кочево зафиксировано полное совпадение данных станционных наблюдений и реанализа. В 10 пунктах наблюдений отклонение составляет 10 см и более, причем на 4 станциях величина ошибки превышает 15 см, достигая максимального значения в Лысьве 23 см (относительная ошибка 39 %).

Общая тенденция, характерная для среднегодовых значений, в марте отчетливо не прослеживается. В частности, для станции Бисер, расположенной на востоке края, среднее превышение в указанном месяце составляет всего 2 см (табл. 1). Стоит отметить, что в текущей версии европейского реанализа отмечается качественное улучшение представления данных по сравнению с реанализом ERA-INTERIM. Результаты сопоставления фактических наблюдений и ERA 5-Land для Бисера в целом

показывают уменьшение величины расхождения по сравнению с расчетами в предыдущем исследовании [3].

Межгодовая изменчивость высоты снежного покрова

В последнем столбце табл. 2 приведены результаты расчета коэффициентов корреляции между данными метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land для межгодовой изменчивости (240 случаев для выборочной совокупности). Расчеты произведены для последовательных рядов данных о высоте снежного покрова с октября 1990 по май 2020 года (исключены месяцы, в которых снежный покров отсутствует). Оценка значимости выполнена с использованием критерия Стьюдента для доверительной вероятности 0,95 [1].

Превышение данных реанализа ERA 5-Land над значениями инструментальных измерений, о котором упоминалось выше, отчетливо прослеживается при исследовании межгодовой изменчивости высоты снежного покрова по всей территории Пермского края (рис. 4). Большая часть экстремумов, наблюдаемых на кривой станционных наблюдений, отображается и на графике реанализа. В холодные периоды 1998–1999, 2005–2006, 2007–2008, 2010–2011, 2016–2017 и 2019–2020 гг. можно видеть некоторое расхождение тенденций.

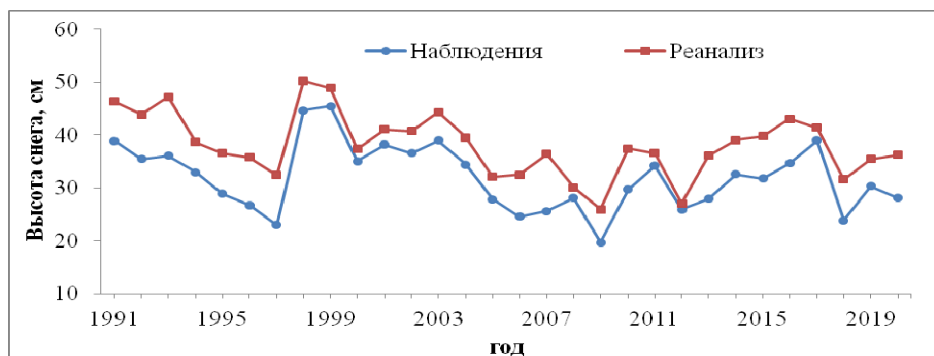


Рис. 4. Средняя высота снежного покрова на территории Пермского края по данным станционных наблюдений и реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.

Fig. 4. Average snow depth on the territory of the Perm Region according to the data of station observations and reanalysis of ERA 5-Land over the 1990–2020 period.

В целом уровень связи между двумя типами данных можно считать очень высоким – коэффициент корреляции изменяется от 0,91 до 0,97. При этом наименьшая величина данной характеристики получена для станций Кын, Оса и Чермоз (0,91), наибольшая – для станции Пермь (0,97). Станция Кын отличается большими значениями средних ошибок

в период с 1990 по 2000 г. – в годовом выражении отклонение составляет минус 17 см. В последующие десятилетия величина ошибки постепенно сокращается. В период 2010–2020 гг. среднегодовая ошибка составляет минус 3 см. Для станции Чермоз также отмечается постепенное уменьшение ошибки в течение 30 лет (данные расчеты актуальны для второго квадрата пространственной сетки). В Перми существенных изменений на протяжении трех десятилетий не наблюдается.

Среди остальных станций можно выделить Осу, для которой величина отклонений тоже постепенно снижается на протяжении трех десятилетий. До 2000 г. среднегодовая ошибка составила минус 12 см, затем ее размер сократился до минус 1 см. Небольшое снижение отмечается для станций Ныроб, Кочево, Ножовка и Октябрьский. В то же время зафиксирован рост величины отклонения в Губахе и Кунгуре. Для последней станции ошибка изменилась от минус 1 до минус 8 см.

Заключение

Сравнение данных наблюдений на метеорологических станциях Пермского края и реанализа ERA 5-Land свидетельствует о повышении качества воспроизведения последним характеристик снежного покрова по сравнению с реанализом ERA-INTERIM. Это связано в первую очередь с увеличением пространственно-временного разрешения представляемой информации в реанализе ERA 5-Land, что привело к уменьшению средней величины ошибки для некоторых пунктов наблюдений. Межгодовая изменчивость снежного покрова в среднем по Пермскому краю также адекватно воспроизводится данным реанализом. Однако при этом необходимо отметить и некоторые особенности, выявленные в настоящем исследовании. В частности, реанализ ERA 5-Land завышает значения высоты снежного покрова по отношению к наблюдениям для большей части метеорологических станций Пермского края. Не выявлено отклонений (в среднем за 30 лет) только на станции Кудымкар. На станциях Оса и Ножовка обнаружено систематическое занижение реанализом показаний инструментальных измерений.

Изменения величины ошибки по территории Пермского края носят в целом меридиональный характер, когда наблюдается прямая зависимость роста отклонений данных реанализа от фактических наблюдений при перемещении с запада на восток, за исключением отдельных станций.

Исследование сезонной изменчивости показывает смещение в сторону более раннего наступления максимумов высоты снежного покрова в реанализе ERA 5-Land по отношению к фактическим значениям. Анализ метеорологических наблюдений, в том числе и снегомерных съемок, на станции Чермоз с использованием информации, содержащейся в реанализе ERA 5-Land, требует индивидуального подхода из-за особенностей физико-географического положения указанного пункта наблюдений.

Список литературы

1. *Исаев А.А.* Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
2. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Связов Е.М.* Моделирование процессов снегонакопления и снеготаяния на водосборе Воткинского водохранилища с использованием модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 57-68.
3. *Крючков А.Д.* Верификация характеристик снежного покрова по данным реанализа ERA-INTERIM и метеорологических станций Пермского края за 1978–2018 гг. // Цифровая география: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 2020. Т. 1. С. 390-393.
4. *Крючков А.Д., Истомина О.В.* Динамика снежного покрова на территории Пермского края за период 1988–2018 гг. // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29. Вып. 2. С. 243-251.
5. Метеорологические ежемесячники. 1990–2020 гг. Ч. 2. Вып. 9. № 1-5, 10-13.
6. Метеорологическая станция в г. Чермоз. Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. [Электронный ресурс] URL: <http://meteo.perm.ru/meteostantsii-permskogo-kraaya/37-meteorologicheskaya-stantsiya-v-g-chermoz> (Дата обращения 06.02.2021).
7. *Попова В.В., Морозова П.А., Туткова 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.
8. *Пьянков С.В., Шихов А.Н.* Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь: Раритет-Пермь, 2014. 296 с.
9. *Турков Д.В., Сократов В.С.* Расчет характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального тепловлагообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56, № 3. С. 369-380.
10. *Хан В.М.* О статистических связях глубин снежного покрова с приземной температурой воздуха над территорией северной Евразии // Труды научного семинара НАН Украины и РФФИ «Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования», 5–7 октября 2011 г., Киев. С. 47-56.
11. *Хан В.М., Рубинштейн К.Г., Шмакин А.Б.* Сравнение сезонной и межгодовой изменчивости снежного покрова в бассейнах рек России по данным наблюдений и реанализов // Известия РАН, ФАО. 2007. Т. 43, № 1. С. 69-80.
12. *Brown R.D., Derksen C.* Is Eurasian October snow cover extent increasing? // Environ. Research Letters. 2013. No. 8. P. 024006.
13. *Brun E., Peings Y., Vionnet V., Boone A., Decharme B., Douville H., Karbou F., Morin S.* Using reanalyses for studying past Eurasian snow cover and its relationship with circulation variability // ECMWF-WWRP/THORPEX Workshop on Polar Prediction, 24–27 June 2013, 10 p.
14. *Brun E., Vionne V., Boone A., Decharme B., Peings Ya., Valette R., Karbou F., Morin S.* Simulation of Northern Eurasian Local Snow Depth, Mass, and Density Using a Detailed Snowpack Model and Meteorological Reanalyses // Journ. of Hydrometeorology. 2013. No. 14. P. 203-219.
15. *Muñoz Sabater J.* ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (<date of access>). 2019. 10.24381/cds.68d2bb30.

16. Khan V., Holko L., Rubinstein K., Breiling M. Snow cover characteristics over the main Russian river basins as represented by reanalyses and measured data // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2008. Vol. 47. P. 1819-1833.

References

1. Isaev A.A. Statistika v meteorologii i klimatologii. Moscow: Moscow State University, 1988. 248 p. [in Russ.].

2. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Sviyazov E.M. Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015, vol. 40, no. 11, pp. 749-757. DOI: 10.3103/S1068373915110059.

3. Kryuchkov A.D. Verification of snow cover characteristics according to data of ERA-INTERIM reanalysis and meteorological stations of Perm region for 1978-2018. Digital geography proceedings of the All-Russian scientific practical conference with international participation in 2 vols. Perm, 2020, vol. 1, pp. 390-393. [in Russ.].

4. Kryuchkov A.D., Istomina O.V. Snow cover dynamic on the territory of the Perm region in the 1988–2018 period. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 243-251. [in Russ.].

5. Meteorologicheskie ezheemesyachniki. 1990–2020. Vol. 9 (2), no. 1-5, pp. 10–13. [in Russ.].

6. Meteorologicheskaya stantsiya v g. Chermoz. Perm Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Available at: <http://mete.perm.ru/meteostantsii-permskogo-kрая/37-meteorologicheskaya-stantsiya-v-g-chermoz> (<date of access 06.02.2021>). [in Russ.].

7. Popova V.V., Morozova P.A., Titkova T.B., Semenov V.A., Cherenkova E.A., Shiryayeva 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, vol. 55, no. 4, pp. 73-86. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86. [in Russ.].

8. Pyankov S.V., Shikhov A.N. Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya: rezhim, monitoring, prognoz. Perm, Raritet-Perm, 2014, 296 p. [in Russ.].

9. Turkov D.V., Sokratov V.S. Calculating of snow cover characteristics on a plain territory using the model SPONSOR and data of reanalyses (by the example of Moscow region). *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2016, vol. 56, no. 3, pp. 369-380. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380. [in Russ.].

10. Khan V.M. Statistical links of snow cover depths with surface air temperature over the territory of northern Eurasia: Tre. Scientific. "Problems and Achievements of Long-Term Meteorological Forecasting" at the NationalGs of Ukraine and RFFI, October 5–7, 2011, pp. 47-56. [in Russ.].

11. Khan V.M., Rubinshtein K.G., Shmakin A.B. Comparison of seasonal and interannual variability of snow cover in Russian watersheds according to observations and reanalyses. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 59-69. DOI: 10.1134/S0001433807010070.

12. Brown R.D., Derksen C. Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environ. Research Letters.*, 2013, no. 8, pp. 024006. DOI: 10.1088/17489326/8/2/024006.

13. Brun Eric, Peings Yannick, Vionnet Vincent, Boone Aaron, Decharme Bertrand, Douville Herv'e, Karbou Fatima and Morin Samuel. Using reanalyses for studying past Eurasian snow cover and its relationship with circulation variability. ECMWF-WWRP/THORPEX Workshop on Polar Prediction, 24–27 June 2013, 10 p.

14. Brun E., Vionne V., Boone A., Decharme B., Peings Ya., Valette R., Karbou F., Morin S. Simulation of Northern Eurasian Local Snow Depth, Mass, and Density Using a Detailed Snowpack Model and Meteorological Reanalyses. *Journ. of Hydro-meteorology*, 2013, no. 14, pp. 203–219.

15. Muñoz Sabater J. ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019. DOI: 10.24381/cds.68d2bb30.

16. Khan V., Holko L., Rubinstein K., Breiling M. Snow cover characteristics over the main Russian river basins as represented by reanalyses and measured data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2008, vol. 47, pp. 1819–1833.

*Поступила 03.03.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;
принята в печать 21.06.2021.*

*Submitted 03.03.2021; approved after reviewing 25.05.2021;
accepted for publication 21.06.2021.*