

КАЧЕСТВО ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ РЕАНАЛИЗА ERA 5-LAND ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ

© 2023 г. А. Д. Крючков^{1,*}, Н. А. Калинин¹, И. А. Сидоров¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*e-mail: Candy55man@ya.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 06.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Рассмотрены вопросы соответствия информации о среднемесячной высоте снега, содержащейся в реанализе ERA 5-Land, данным наблюдательной сети Пермского края. Показано, что ERA 5-Land завышает фактические значения этого параметра. В сезонном выражении максимумы снегонакопления в реанализе сдвинуты в сторону более раннего наступления, в межгодовом – ERA 5-Land в целом соответствует фактической изменчивости высоты снега.

Ключевые слова: реанализ ERA 5-Land, характеристики снежного покрова, подразделения гидрометеорологического мониторинга, Пермский край

DOI: 10.31857/S2076673423030055, **EDN:** KLPXPM

ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров – важный климатообразующий фактор. Изучение характеристик снежности основывается на информации сети гидрометеорологического мониторинга. Результаты исследований взаимного влияния снежного покрова и окружающей среды для разных районов России и мира приведены, например, в трудах (Kunkel и др., 2016; Евсева и др., 2017; Котова, 2019; Коршунова и др., 2021). Соответствующая работа проводится в условиях дефицита сведений о параметрах снега, что обусловлено низкой плотностью сети станций и их неравномерным распределением. Это серьёзная проблема для многих регионов, в том числе Пермского края, поэтому в последнее время всё чаще используют данные спутниковых измерений (Попова и др., 2015; Астафуров и др., 2018), моделирования (Турков и др., 2017; Куракина, Михайлова, 2020; Калинин и др., 2022), различных реанализов (Хан и др., 2007; Турков и др., 2016) или комбинированных подходов. К последним относится разработанная в Гидрометцентре России технология расчёта снегонакопления SnoWE, используемая для всей территории России (Казакова, 2015; Чурюлин и др., 2018).

Использование спутниковой информации при большом пространственном охвате имеет ограничения при наличии облачности (в видимом диапазоне) или в силу несовершенства восстановле-

ния характеристик снега (в микроволновом диапазоне) из-за неоднородности растительного покрова или присутствия ледяных прослоек в снежной толще (Чурюлин и др., 2018; Китаев и др., 2020). В модельных расчётах в качестве предикторов и верификаторов применяются интерполированные в узлы регулярной сетки данные наблюдений метеорологических станций, что вне зависимости от методов интерполяции служит источником дополнительных погрешностей, а также требует высококачественных входных параметров.

Преимущество применения информации, содержащейся в реанализах, заключается в её согласованности в пространстве и времени, охватывающей достаточно большой по длительности период в глобальном или региональном масштабах, а также бесплатном свободном доступе к готовым к использованию в стандартных форматах данным посредством специализированных веб-платформ (Sheffield и др., 2006). В то же время, как и в случае со всеми численными метеорологическими продуктами, данные реанализа должны быть верифицированы путём сравнения с фактическими наблюдениями.

Исследования характеристик снежного покрова с использованием реанализов проводятся преимущественно на основе продуктов серии ERA Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) (Мартынова и др., 2021,

Шихов и др., 2022). Например, в модели SPONSOR Института географии РАН (Турков и др., 2016, 2017; Китаев и др., 2020) в качестве входной информации применяются данные реанализа ERA-Interim. Как показано в работах (Хан и др., 2007; Турков и др., 2016; Pelosi и др., 2020) выбор обусловлен наиболее адекватным воспроизведением погодных параметров, в том числе снега, по сравнению с другими реанализами.

Цель работы – изучение сезонной и межгодовой изменчивости высоты снежного покрова в Пермском крае по данным сети гидрометеорологического мониторинга и реанализа ЕЦСПП ERA 5-Land. Продолжено исследование соответствия информации о высоте снега, которая содержится в архиве представленного реанализа, данным наблюдательных подразделений (далее – НП) Росгидромета в Пермском крае (Крючков, 2021, Крючков, Калинин, 2021, Сидоров, 2022), путём увеличения количества сопоставляемых пунктов за счёт привлечения материалов наблюдений гидрологических постов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходной информацией послужили среднемесячные данные о высоте снежного покрова из реанализа ERA 5-Land (Era 5-Land..., 2023) и результаты многолетних (1990–2020 гг.) наблюдений за высотой снежного покрова на 25 метеорологических станциях и 31 гидрологическом посту Пермского края (Метеорологический ежемесячник..., 1990–2020).

Необходимость привлечения дополнительной информации определена недостаточной плотностью стационарных наблюдений за характеристиками снега из-за особенностей физико-географического положения Пермского края (многообразие форм рельефа, обусловленное переходом от Восточно-Европейской равнины на западе к Уральским горам на востоке и развитой гидрографической сетью, неравномерно распределённая растительность). Анализ достаточности материалов, которые содержат данные о параметрах снежности, с учётом условно необходимого удаления от пункта наблюдений не более чем на 50 км (минимальное расстояние между двумя станциями в Пермском крае), показал, что действующая сеть метеорологических станций обеспечивает покрытие территории региона, соответствующее обозначенному ограничению на 44% (Сидоров, 2021). Если на севере региона (в пределах Верхнекамской, Камско-Кельтминской и Язьвинско-Вишерской низменностей) распределение снега относительно равномерно, то центральная, юго-восточная и восточная части Пермского края отличаются разнообразием форм рельефа и растительности, что приводит к значительным неоднородностям залегания снежного покрова, для

оценки которых данных только стационарных наблюдений недостаточно. С учётом радиуса 50 км использование информации гидропостов даёт возможность увеличить общую обеспеченность территории края данными о характеристиках снежного покрова до 76%.

Среднее за месяц значение высоты снежного покрова на наблюдательных пунктах получено путём деления суммы данных ежесуточных наблюдений по стационарным снегомерным рейкам за месяц на число дней со снегом. Информация по пунктам Пермского края и методика расчёта характеристик снега представлены в материалах Уральского УГМС (Метеорологический ежемесячник..., 1990–2020 гг.). Многолетние ряды параметров снежности, опубликованные в указанном источнике, отвечают критериям однородности.

В рамках анализа проводилось сопоставление результатов расчётов среднемесячных значений высоты снега (в сантиметрах) с массивом данных ERA 5-Land. Одной из задач была проверка наличия или отсутствия сведений о снежном покрове в начале (октябрь) и конце (май) его залегания по данным реанализа, если соответствующая информация отражена в материалах наблюдательных пунктов. При вычислении использованы материалы с высотой снега не менее 0.5 см.

В дальнейшем был произведён расчёт разности сравниваемых величин, которая принята за величину ошибки. Методика расчётов описана в (Крючков, 2021). Результаты расчётов, равные 5 см и менее, считались незначительной ошибкой, т.е. реанализ достаточно точно воспроизводит реальные значения высоты снега, от 5 до 10 см – малозначимой, когда реанализ можно использовать с учётом дополнительной коррекции, от 10 до 15 см – значительной и более 15 см – неудовлетворительной, когда реанализ в силу каких-то причин не отражает реальную картину.

При формировании картографических изображений пространственного распределения ошибок для улучшения воспроизведения результатов интерполяции на границах Пермского края дополнительно были привлечены данные многолетних наблюдений за характеристиками снежного покрова наиболее близко расположенных к исследуемому региону станций республик Удмуртия (3), Башкортостан (2), Коми (3), Ханты-Мансийского автономного округа (1) и Свердловской области (3) из архивов Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) (Булыгина и др., 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка адекватности воспроизведения реанализом ERA 5-Land сведений о наличии снега. Увеличение детализации сведений о наличии снежного покрова за счёт привлечения данных гидрологических постов привело к снижению количества совпадений между фактическими наблюдениями и реанализом как для октября, так и для мая по отношению к случаю, когда используется информация только станций. Как известно, реанализ — это результат моделирования гидрометеорологических процессов на основе доступной фактической информации. Следовательно, одной из причин расхождений можно назвать пока ещё недостаточное качество моделирования формирования и перераспределения снежного покрова в ERA 5-Land.

В октябре соответствие информации в двух массивах отмечается в 73% случаев, что на 14% меньше, чем в (Крючков, Калинин, 2021). Минимальное число совпавших данных зафиксировано на посту Троица (рис. 1, а), который относится к Камскому водохранилищу, максимально возможное — в Нововильвенском, в долине реки, расположенной в гористой местности, покрытой хвойным лесом. Отметим, что по данным станций полного совпадения сведений за рассматриваемый период ни по одному подразделению нет. С другой стороны, все зоны с согласованностью данных в 50% и менее связаны с показателями постов. Особенности расположения постов приводят к тому, что гидрометеорологическая информация, которая поступает из подобных наблюдательных пунктов, характерна для небольшой прилегающей территории и, в силу масштаба, используется в реанализе, может не отображаться в нём. Неточности при сравнении реанализа и фактических наблюдений при таком подходе будут сохраняться до тех пор, пока масштаб сетки будет не менее площади территории, прилегающей к наблюдательному пункту, на которой производятся наблюдения за снежным покровом. Кроме того, качество наблюдений на постах часто бывает ниже, чем на станциях, что также может сказываться на результатах сопоставления данных.

Наиболее близкие значения фактической информации о наличии снежного покрова и данных реанализа наблюдаются преимущественно в западных равнинных и восточных предгорных и горных районах. На общем фоне выделяются 1992 и 2014 гг. с равенством по всем наблюдательным пунктам, как по станциям, так и по постам. Центральная территория характеризуется пересечённым рельефом и влиянием Камского водохранилища и связанной речной сети, что сказывается на формировании и распределении снежности. Зеркало водохранилища протяжённостью около 250 км и шириной местами до 30 км формирует

открытое ровное пространство, которое усиливает метелевый перенос. Многочисленные притоки имеют хорошо выраженные долины, в устьевых участках образуют заливы и плёсы. Извилистые склоны берегов, в особенности, расположенные под большим углом к преобладающим направлениям ветра, служат естественными препятствиями, что в свою очередь способствует снегонакоплению.

В мае данные расширенной сети мониторинга и реанализа совпадают в 53% случаев (см. рис. 1, б), что на 20% меньше, чем в случае использования только станционных материалов. За 30-летний период не зафиксировано ни одного совпадения одновременно во всех сравниваемых пунктах. Наибольшее число несоответствий отмечено в мае 2014 г. (14 станций и 28 постов). Особенности атмосферной циркуляции в апреле 2014 г. (смещение на запад азорского антициклона и необычная интенсивность центров исландского минимума) вызвали резкие колебания погодных условий на Урале. В результате наблюдались ранний сход снега в середине месяца и образование временного снежного покрова в третьей декаде. Конец апреля и начало мая характеризовались интенсивными волнами тепла, которые привели к окончательному повсеместному сходу снега. По данным ERA 5-Land снежный покров сохранился. Следовательно, аномальные погодные условия в текущем варианте реанализа, как и в предыдущих версиях (Крючков, 2021), отображаются по-прежнему не вполне адекватно.

Анализ расхождений показывает, что в массиве ERA 5-Land как в октябре, так и в мае в 98% случаев отмечается наличие снега в зонах расположения гидрологических постов, в то время как наблюдателями он не был зафиксирован. С учётом неиспользуемых при расчётах значений среднемесячной высоты снежного покрова менее 0.5 см, которые приведены в реанализе, абсолютное отсутствие данных в ERA 5-Land при их наличии на постах наблюдается всего 4 раза (0.2%) за 30 лет. На станциях почти половина случаев в осенний месяц связана с фактическим наличием снежного покрова там, где его не определяет реанализ, в весенний — 20%.

С одной стороны, отсутствие данных о снеге в том или ином наблюдательном пункте при его наличии в массиве ERA 5-Land может быть связано с тем, что измерения на метеоплощадках имеют точечный характер. Следовательно, возможен вариант, когда на площадке снежный покров не наблюдался, но залегал в окрестностях станции или поста. В такой ситуации может помочь информация о степени покрытия снегом окрестностей пункта наблюдений, однако в метеорологических ежемесячниках такие сведения не публикуются. Снегомерные маршруты, информация по кото-

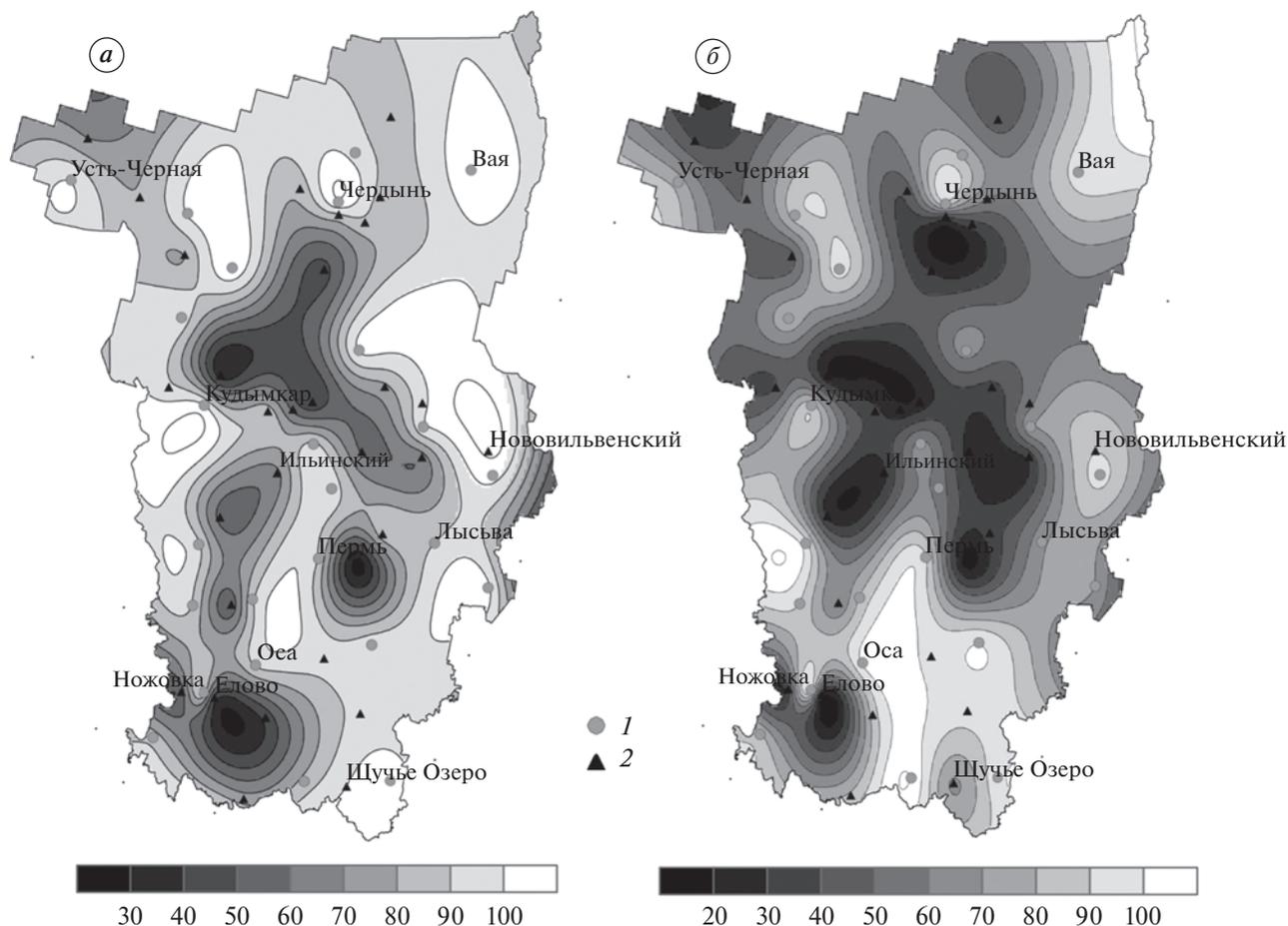


Рис. 1. Соответствие (%) данных о наличии информации о высоте снежного покрова на подразделениях гидрометеорологического мониторинга Пермского края и в реанализе ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.: *a* – октябрь; *б* – май; 1 – станции; 2 – посты.

Fig. 1. Coincidence (%) of data on the availability of information about snow depth at hydrometeorological monitoring points in the Perm Region and in the ERA 5-Land reanalysis for the period 1990–2020: *a* – October; *б* – May; 1 – stations; 2 – posts.

рым приводится в ежемесячниках, также служат источником данных о характеристиках снега за пределами площадки, в то же время в силу особенностей организации подобных наблюдений маршруты существуют не во всех пунктах наблюдений, часто переносятся, что нарушает однородность информации. Имеющиеся сведения, таким образом, необходимо сопоставлять с данными стационарных наблюдений, что является темой отдельного исследования.

С другой стороны, наличие снега на станциях, когда оно не отмечено в реанализе, может быть связано с приходом первых осенних или возвратом весенних холодов, которые сопровождаются выпадением твёрдых осадков вплоть до установления временного снежного покрова. Косвенным подтверждением служит наличие снега в отдельные декады исследуемого месяца. Такая ситуация не всегда отображается в модельных данных глобального уровня

Высота снежного покрова. Использование расширенной информации о высоте снега подтверждает полученный ранее вывод о том, что среднемесячные значения высоты снежного покрова, которые содержатся в реанализе ERA 5-Land, в целом превышают данные гидрометеорологического мониторинга, как по информации станций (Крючков, 2021, Крючков, Калинин, 2021), так и по постам (табл. 1). Это превышение, осреднённое за октябрь–май, характерно для 52 наблюдательных пунктов из 56 (93%), составляя в среднем 7 см. Совпадение исследуемых характеристик отмечается на станции Кудымкар и посту Щучье Озеро (рис. 2, *a*). Занижение реанализом показателей, как было ранее отмечено, зафиксировано только на станциях Оса и Ножовка.

Незначительная ошибка реанализа свойственна преимущественно пунктам, расположенным на западе Пермского края, со смещением зоны в южной части региона на восток (см. рис. 2, *a*). От-

Таблица 1. Средние значения абсолютной ошибки реанализа ERA 5-Land по отношению к данным наблюдений в подразделениях гидрометеорологического мониторинга на территории Пермского края за период 1990–2020 гг., см
Table 1. Average absolute error values of the ERA 5-Land reanalysis in relation to the observation data at hydrometeorological monitoring points of the Perm Region for the period 1990–2020, cm

Пост	Месяц								среднее
	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	
Керос	0	2	6	3	–1	–6	6	2	1
Оныл	0	3	6	6	3	–3	4	0	2
Сергеевский	–1	4	7	6	5	–1	9	1	4
Бондюг	0	6	11	16	15	11	21	3	10
Булдырья	1	9	16	19	14	7	22	7	12
Митракова	0	9	15	16	11	5	17	3	9
Рябинино	–1	6	9	11	6	0	14	2	6
Нижняя Язьва	0	6	13	16	14	10	18	3	10
Керчевский	1	5	9	11	10	6	11	1	7
Кува	–1	4	8	8	7	2	9	1	5
Ошиб	1	5	10	12	10	6	10	1	7
Слудка	–1	4	10	11	12	7	9	1	7
Майкор	1	6	10	13	11	9	15	2	8
Усть-Пожва	1	4	10	11	10	7	15	2	7
Ильинский	0	8	15	20	20	21	25	2	14
Карагай	0	3	6	6	5	1	2	0	3
Усть-Игум	1	7	12	12	10	5	14	1	8
Кизел	1	9	12	14	9	6	24	9	10
Перемское	0	6	14	16	16	15	20	2	11
Усьва	1	5	10	7	3	2	25	6	7
Нововильвенский	0	7	12	12	8	0	11	5	7
В.-Ч. Городки	–1	5	10	12	10	7	14	1	7
Троица	1	8	15	16	17	18	21	3	12
Казымово	–1	5	16	21	20	21	9	0	11
Калинино	–1	2	9	9	7	3	0	–1	3
Елово	1	3	13	19	24	32	24	1	15
Барда	0	5	13	14	12	11	8	0	8
Суда	0	3	9	11	9	6	–4	0	4
Бабка	0	5	13	15	14	14	12	0	9
Большой Гондыр	–1	4	14	20	21	18	3	0	10
Щучье Озеро	0	3	7	3	–3	–9	–2	–1	0
среднее	0	5	11	13	11	8	12	2	8

мечается некоторый рост величины отклонений при перемещении к северо-востоку, что может быть связано с постепенным усилением влияния Уральских гор, а также уплотнением и изменением характера растительного покрова. Изменчивость ошибок характеризуется увеличением значений с юго-запада на северо-восток, наблюдается сходство с пространственным распределением высоты снежного покрова на территории региона (Истомина, 2019; Крючков, 2021). В то же время

выделяются отдельные зоны возмущений, вызванные локальными особенностями в местах расположения наблюдательных пунктов.

Величины расхождений на юго-западе отличаются значительными контрастами, что связано с проявлением влияния Воткинского водохранилища. Так, станция Ножовка и пост Елово находятся на противоположных берегах р. Камы. Локальные особенности расположения пунктов приводят к тому, что при относительно малом

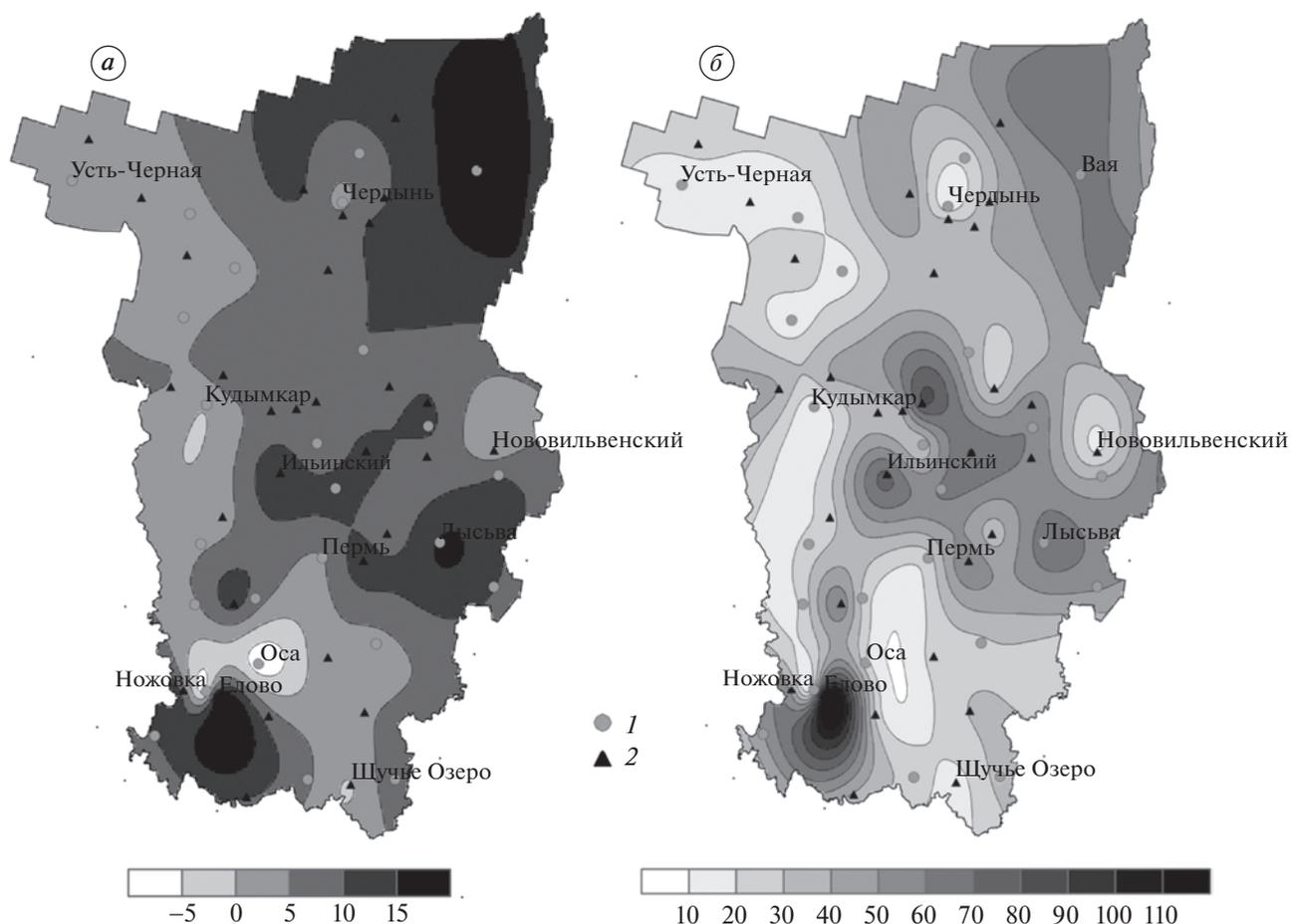


Рис. 2. Разница между наблюдениями за высотой снежного покрова в подразделениях гидрометеорологического мониторинга Пермского края и данными реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.: *a* – средняя абсолютная ошибка, см; *b* – средняя относительная ошибка, %; 1 – станции; 2 – посты.

Fig. 2. The difference between observations for snow depth at hydrometeorological monitoring points in the Perm Region and the ERA 5-Land reanalysis data for the period 1990–2020: *a* – average absolute error, cm; *b* – average relative error, %; 1 – stations; 2 – posts.

расстоянии между ними средняя разница данных о высоте снега составляет более 15 см (Сидоров, 2021). Кроме того, в исследуемой версии реанализа расчёт характеристик снежности производится в зависимости от типа поверхности. Ячейка реанализа, в которую попадает Ножовка, соответствует зеркалу водохранилища, а Елово – земной поверхности. Сочетание указанных факторов приводит к неудовлетворительным различиям между исследуемыми массивами данных (107% в относительном выражении).

На северо-востоке Пермского края наблюдательных пунктов немного. Станция Вая, для которой абсолютная ошибка реанализа составила 18 см, находится в крупнохолмистой местности со значительной залесённостью. Близкое положение к Уральским горам приводит к изменчивости высот окружающего рельефа от 70 до 600 м. Измерения характеристик снежного покрова

производятся в речной долине и соответствуют только ей, поэтому в горной местности они могут отличаться. В то же время квадрат сетки реанализа, который соотносится со станцией, из-за пространственного разрешения охватывает как речную долину, так и окружающую территорию. Таким образом, в реальности величина ошибок на северо-востоке региона может существенно отличаться от полученных значений как в большую, так и в меньшую стороны.

Изменчивость высоты снежного покрова. Расширение исследуемой информации за счёт привлечения данных гидрологических постов не привело к качественным изменениям ни в сезонном (рис. 3), ни в межгодовом (рис. 4) ходе высоты снежного покрова. Как и в случае использования только стационарных материалов, отмечается превышение данных ERA 5-Land над фактическими наблюдениями. О завышении текущим ре-

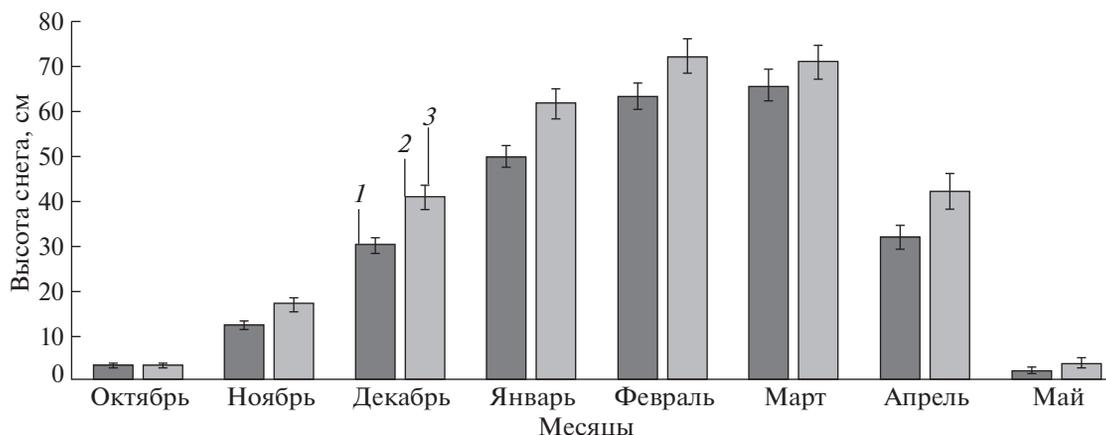


Рис. 3. Средние многолетние месячные значения высоты снежного покрова на территории Пермского края по данным подразделений гидрометеорологического мониторинга и реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.: 1 – наблюдения; 2 – реанализ; 3 – доверительный интервал (95%).

Fig. 3. Average long-term monthly values of snow depth on the territory of the Perm Region according to the data of hydrometeorological monitoring points and reanalysis of ERA 5-Land for the period 1990–2020: 1 – observations; 2 – reanalysis; 3 – confidence interval (95%).

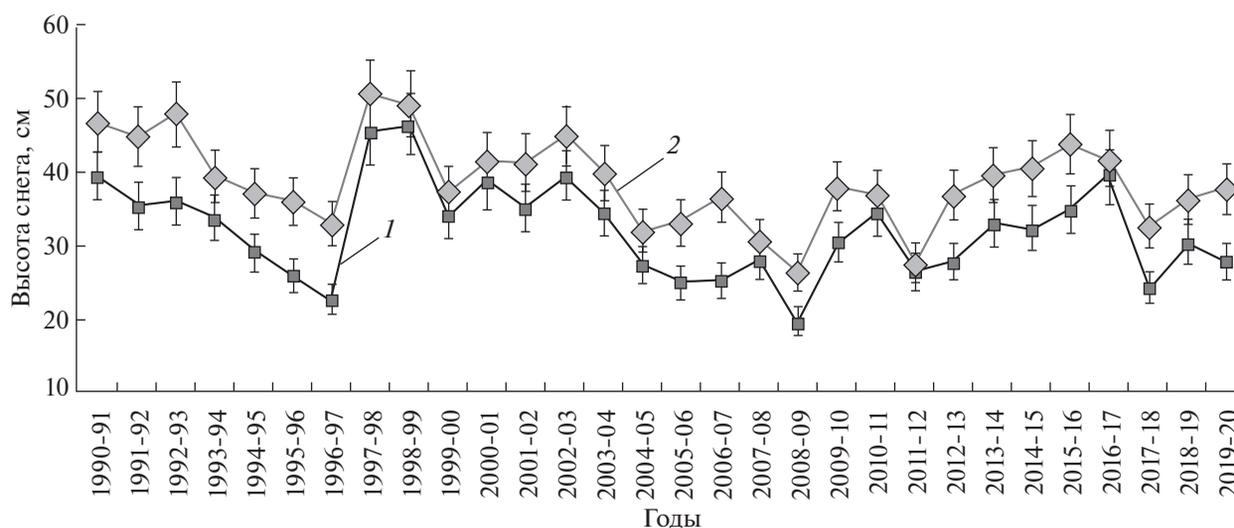


Рис. 4. Средняя высота снежного покрова на территории Пермского края по данным подразделений гидрометеорологического мониторинга и реанализа ERA 5-Land за период 1990–2020 гг.: 1 – наблюдения; 2 – реанализ; 3 – доверительный интервал (95%).

Fig. 4. Mean snow depth on the territory of the Perm Region according to the data of hydrometeorological monitoring points and reanalysis of ERA 5-Land over the 1990–2020 period: 1 – observations; 2 – reanalysis; 3 – confidence interval (95%).

анализом характеристик снежного покрова в бассейне р. Селенги сообщается в работе (Шихов и др., 2022), а для Северного полушария в целом, особенно в горных районах, что актуально для Пермского края, – в исследовании (Kouki и др., 2023).

С октября по февраль в двух исследуемых массивах наблюдается активный прирост высоты снега (см. рис. 3). В марте фактические значения продолжают возрастать, хотя и с меньшей интенсивностью, в то время как в реанализе зафиксиро-

рована тенденция к снижению. В обоих случаях снег на территории Пермского края полностью сходит в мае. Исследование сроков наступления максимальных значений высоты снежного покрова в Пермском крае (Крючков, 2021) показывает, что в последние десятилетия в целом по региону происходит смещение наступления максимумов с первой на вторую и даже третью декаду марта.

В количественном выражении во все месяцы величина расхождений между реанализом и фак-

тическими значениями при использовании расширенного массива данных увеличена по отношению к ограниченному архиву. В октябре—марте прирост составляет от 1 до 3%, в апреле — 8%, а в мае — 32%. Значения средней высоты снега по Пермскому краю, полученные по данным станционных наблюдений, не претерпевают существенных изменений при использовании дополнительной информации, поступившей с гидрологических постов. Следовательно, увеличение разности происходит за счёт повышения величины снежности в расширенном архиве ERA 5-Land.

Использование интервальной оценки распределения средней высоты снега по месяцам показывает совпадение информации в двух исследуемых массивах в пределах доверительных интервалов в октябре, мае и марте. Таким образом, воспроизведение реанализом средней высоты снежного покрова в эти месяцы можно считать в целом удовлетворительным.

Анализ сезонного хода исследуемой характеристики в двух массивах данных отдельно по наблюдательным пунктам показывает, что в марте высота снега, согласно фактическим измерениям, достигает максимальных значений в 45 пунктах (80% от общего числа). В 5 случаях (9%) наибольшие значения наблюдаются как в марте, так и в феврале, ещё в 6 пунктах (11%) максимумы наблюдаются в феврале. По данным реанализа максимальная высота снега в феврале характерна для 41 подразделения (73%), в марте — для одного, ещё в 14 случаях наибольшие значения отмечаются в обоих месяцах. Полное совпадение сезонного хода зафиксировано только в трёх наблюдательных пунктах. Стоит отметить, что согласно станционным декадным данным (Крючков, 2021) в период до 1990 г. максимальные значения преимущественно отмечались в феврале, но в последующем произошло смещение наступления максимумов на первую и даже вторую декаду марта (для постов подобное исследование не проводилось). Определённую роль в таком смещении могла сыграть смена циркуляционных условий в атмосфере на территории края в конце 1980-х годов (уменьшение повторяемости восточной и увеличение западной форм циркуляции по классификации Г.Я. Вангенгейма — А.А. Гирса).

Согласно анализу тесноты связей, преобладающей части подразделений Пермского края с октября по май свойственна прямая зависимость между фактическими наблюдениями за высотой снега и реанализом ERA5-Land. Теснота связи при этом характеризуется значительной вариативностью (информация по постам приведена в табл. 2). Например, коэффициент корреляции в среднем и по станциям, и по постам Пермского края имеет наибольшее значение в декабре, изменяясь от 0.49 в Верещагино, которое находится в

центральной части западного Предуралья на правом берегу р. Камы, до 0.93 в Щучье Озеро. Максимальная изменчивость коэффициентов наблюдается в мае, когда отмечено большое количество величин, признанных незначимыми. В то же время необходимо учитывать, что снежный покров в периоды его появления и исчезновения имеет неустойчивый характер, поэтому к данным результатам необходимо относиться с осторожностью.

Анализ межгодовой изменчивости высоты снежного покрова в Пермском крае на основе инструментальных измерений и данных ERA 5-Land (см. рис. 4) показывает, что реанализ в целом адекватно воспроизводит ход рассматриваемой характеристики, хотя в отдельные холодные периоды можно видеть расхождение тенденций. Применение доверительных интервалов (максимальное значение составляет 9% от средней величины) при исследовании позволяет сделать вывод о том, что в 13 случаях из 30 реанализ на удовлетворительном уровне воспроизвёл значения высоты снега.

При подробном изучении межгодовых изменений высоты снежного покрова в отдельных подразделениях выявлено, что величина расхождений на протяжении 30 лет имеет тенденцию к снижению в 34 пунктах. Наибольшее уменьшение отмечено на станциях Кын (западные предгорья Среднего Урала, 14 см) и Оса (западные склоны Тулвинской возвышенности, 11 см). Для остальных точек характерен рост, например, пост Усьва (северные предгорья Среднего Урала) показал увеличение ошибки реанализа на 10 см. По отношению к широте расположения наблюдательных пунктов увеличение в большей степени превалирует в южной части края, уменьшение — в центральной и северной частях региона. В меридиональном выражении повторяемость увеличивающихся ошибок реанализа растёт в направлении от центральных территорий к западу и востоку с преобладанием в восточных районах, а уменьшение в большей степени характерно для центра и запада Пермского края. Отчасти это можно объяснить уменьшением продолжительности залегания устойчивого снежного покрова на территории Пермского края (в среднем на 5 дней за 30 лет) и соответствующим изменением условий для возникновения временного снежного покрова, который в свою очередь слабо воспроизводится моделью реанализа. Возможно, посуточное сравнение данных позволит прояснить некоторые вопросы, которые невозможно решить при текущей исходной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Использование расширенной информации о характеристиках снега с учётом данных, полученных на гидрологических постах Пермского края,

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между данными о высоте снежного покрова в подразделениях гидрометеорологического мониторинга Пермского края и в реанализе ERA 5-Land
Table 2. Correlation coefficients between data on snow depth by hydrometeorological monitoring points in the Perm Region and by the ERA 5-Land reanalysis

Пост	Месяц							
	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май
Керос	0.27	0.89	0.93	0.90	0.85	0.77	0.74	0.63
Оныл	0.40	0.90	0.90	0.88	0.81	0.80	0.72	0.26
Сергеевский	0.55	0.81	0.88	0.86	0.74	0.75	0.77	0.27
Бондюг	0.68	0.75	0.81	0.71	0.66	0.64	0.74	0.71
Булдырья	0.62	0.62	0.58	0.63	0.62	0.53	0.76	0.82
Митракова	0.80	0.72	0.69	0.75	0.76	0.70	0.80	0.69
Рябинино	0.75	0.74	0.74	0.65	0.55	0.35	0.60	0.49
Нижняя Язтва	0.68	0.71	0.83	0.82	0.66	0.62	0.81	0.68
Керчевский	0.64	0.63	0.83	0.80	0.75	0.69	0.71	0.45
Кува	0.77	0.77	0.79	0.82	0.73	0.61	0.77	0.69
Ошиб	0.83	0.68	0.83	0.78	0.76	0.58	0.54	–
Слудка	0.66	0.54	0.84	0.80	0.78	0.73	0.73	0.06
Майкор	0.62	0.68	0.79	0.80	0.79	0.75	0.76	–
Усть-Пожва	0.89	0.48	0.84	0.88	0.76	0.76	0.64	0.38
Ильинский	0.88	0.39	0.79	0.72	0.75	0.59	0.62	0.19
Карагай	0.91	0.78	0.88	0.80	0.78	0.71	0.75	0.25
Усть-Игум	0.69	0.51	0.84	0.82	0.75	0.74	0.73	0.74
Кизел	0.51	0.52	0.68	0.79	0.75	0.78	0.64	0.47
Перемское	0.64	0.63	0.82	0.80	0.78	0.77	0.70	0.04
Усьва	0.55	0.51	0.70	0.72	0.80	0.77	0.60	0.40
Нововильвенский	0.76	0.88	0.80	0.90	0.88	0.86	0.86	0.78
В.-Ч. Городки	0.84	0.68	0.91	0.91	0.85	0.76	0.67	0.22
Троица	0.65	0.61	0.77	0.67	0.51	0.52	0.62	–
Казымово	0.91	0.69	0.86	0.77	0.83	0.59	0.83	–
Калинино	0.91	0.65	0.90	0.90	0.86	0.75	0.76	0.43
Елово	0.72	0.47	0.61	0.34	0.34	0.27	0.50	–
Барда	0.89	0.71	0.87	0.84	0.83	0.78	0.78	–0.03
Суда	0.74	0.79	0.83	0.57	0.53	0.49	0.59	0.81
Бабка	0.73	0.75	0.85	0.78	0.82	0.70	0.80	0.04
Большой Гондыр	0.79	0.78	0.88	0.86	0.86	0.72	0.81	–0.09
Щучье Озеро	0.54	0.60	0.93	0.92	0.94	0.92	0.77	–0.02
среднее	0.70	0.67	0.81	0.78	0.75	0.68	0.71	0.40

Примечание: жирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции, признанные незначимыми.

в количественном выражении более чем на 70% повышает обеспеченность исследуемыми данными территории Пермского края по сравнению только со стационарными материалами. В то же время следует понимать, что для качественного изучения характеристик снежного покрова в условиях разнообразия форм рельефа и растительности такого количества наблюдательных пунктов всё равно недостаточно. Такой дефицит

информации особенно сказывается в зоне наибольшего снегонакопления в горной местности на северо-востоке и отчасти востоке региона, поэтому необходимо использование альтернативных источников гидрометеорологических данных (информации дистанционного зондирования Земли из космоса, результатов гидродинамического моделирования или реанализов).

Реанализ ERA 5-Land на хорошем уровне (в 73% случаев) воспроизводит наличие/отсутствие снега в период появления и на удовлетворительном (53%) – в период схода. При расхождении реанализ преимущественно показывает наличие снега в точках, где его не фиксируют наблюдательные пункты, что может быть связано с более ранним сходом снега на метеоплощадке по сравнению с окружающей местностью. Случаи, когда снежный покров был отмечен, а в ERA 5-Land не отображён, определены только для станций. В данной ситуации может сказываться наступление условий в районе пунктов наблюдений в осеннее и весеннее время для выпадения твёрдых осадков и установления временного снежного покрова, что не всегда отображается в реанализе. Для изучения этого аспекта необходимо привлекать посуточную информацию.

Некоторые особенности, выявленные в исследованиях (Крючков, 2021; Крючков, Калинин, 2021; Сидоров, 2022), подтверждаются при анализе расширенных массивов данных. В частности, в используемом реанализе значения высоты снежного покрова завышены по отношению к инструментальным измерениям для большей части наблюдательных пунктов Пермского края. Вероятно, существует взаимосвязь с оценкой осадков версией реанализа ERA 5 (Григорьев и др., 2022), где также отмечается превышение его данных над фактическими наблюдениями.

Максимальное расхождение получено для северо-восточной части региона, что, по-видимому, связано с сильной изменчивостью рельефа этой местности. Большие ошибки на юго-западе и в центре края, вероятно, связаны с близким расположением водохранилищ и, следовательно, различиями воспроизведения характеристик снега в ERA 5-Land для водной и земной поверхностей. Один из примеров для Камского водохранилища был рассмотрен в (Крючков, 2021; Крючков, Калинин, 2021). Не выявлено отклонений только в двух наблюдательных пунктах с малыми перепадами высот в районах их расположения.

В пространственном отношении территория Пермского края характеризуется ростом отклонений данных реанализа от фактических наблюдений при перемещении с юго-западной территории на северо-восток региона. Исключение составляет центральная часть региона, где проявляется влияние Камского водохранилища. Остальные случаи нарушения зависимости связаны с локальными особенностями территорий, окружающих пункты наблюдений: холмистый рельеф, речная долина, растительность, близость к жилой застройке, – которые в силу своего масштаба не отображаются в реанализе.

Таким образом, реанализ ERA 5-Land для определения параметров снежного покрова целе-

сообразней использовать для равнинной и слабохолмистой местности. В горных районах и районах с пересечённым рельефом, а также на границе земная/водная поверхность эффективность реанализа снижается.

Подтверждается и ранее сделанный вывод, что межгодовая изменчивость средней высоты снега в целом по Пермскому краю адекватно воспроизводится реанализом ERA 5-Land. Величина ошибки реанализа уменьшилась в течение 30 лет для 61% наблюдательных пунктов. Уменьшение величины ошибки частично можно связать с ростом количества поступающей исходной информации, которая усваивается реанализом. Одной из причин увеличения ошибок для отдельных подразделений является фактическая информация низкого качества, что связано с ошибками или пропусками наблюдений.

Исследование сезонной изменчивости с учётом использования данных гидрологических постов показало, что в ERA 5-Land максимумы высоты снежного покрова смещены в сторону более раннего наступления по отношению к фактическим значениям, как и в случае анализа только станционных материалов. Вопрос о том, связано ли подобное расхождение с постепенным сдвигом формирования максимальных снеготолщин в Пермском крае в исследуемый период на март, в то время как в реанализе данные изменения не воспроизвелись, в том числе по причине несовершенства используемых моделей эволюции снежного покрова, на текущий момент остаётся открытым. Возможно, продолжение исследования с учётом материалов до 1990 г. позволит дать на него ответ. Величина среднемесячных расхождений между данными реанализа и информацией постов в целом больше, чем аналогичная характеристика для станций, что особенно проявляется в апреле и мае.

Наиболее устойчивая разница между данными двух массивов отмечается в зимние месяцы, что необходимо учитывать при работе с реанализом ERA 5-Land.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафуров В.Г., Скорыходов А.В., Мусиенко О.П., Курьянович К.В.* Статистическая модель текстуры изображений и физических параметров облачности в периоды залегания снежного покрова на территории Российской Федерации по данным MODIS // *Оптика атмосферы и океана.* 2018. Т. 31. № 7. С. 537–541.
<https://doi.org/10.15372/AOO20180706>
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* “Описание массива данных характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР” Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621201 // *Электронный ресурс.* <http://meteo.ru/data/165-snow->

- cover#описание-массива-данных. (Дата обращения: 23.01.2023)
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
- Евсеева Н.С., Петров А.И., Каширо М.А., Квасникова З.Н., Батманова А.С., Хон А.В. Влияние рельефа и растительности на распределение снежного покрова в бассейнах малых рек // Геосферные исследования. 2017. № 4. С. 64–74. <https://doi.org/10.17223/25421379/5/6>
- Казакова Е.В. Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды COSMO-Ru. Дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Москва: Гидромет. науч.-исслед. центр России, 2015. 181 с.
- Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 63–74. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010116>
- 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 // Известия РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 6. С. 855–863. <https://doi.org/10.31857/S2587556620060072>
- Китаев Л.М., Титкова Т.Б., Турков Д.В. Точность воспроизведения межгодовой изменчивости снегозапасов Восточно-Европейской равнины по данным спутниковой информации на примере продукта GlobSnow (SWE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 164–175. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-164-175>
- Коришунуова Н.Н., Давлетшин С.Г., Аржанова Н.М. Изменчивость характеристик снежного покрова на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 80–100. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-80-100>
- Котова Е.И. Оценка влияния факторов на состав снежного покрова в Российской Арктике // Успехи современного естествознания. 2019. № 10. С. 158–163.
- Крючков А.Д. Пространственно-временное распределение характеристик снежного покрова на территории Пермского края. Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Пермь, ПГНИУ. 2021. 223 с. <http://www.psu.ru/files/docs/science/dissertatsionnye-sovety/kryuchkov/disser.pdf>
- Крючков А.Д., Истомина О.В. Динамика снежного покрова на территории Пермского края за период 1988–2018 гг. // Вест. Удмуртского ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29. Вып. 2. С. 243–251.
- Крючков А.Д., Калинин Н.А. Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA 5-Land на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 95–110. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-95-110>
- Куракина Н.И., Михайлова А.А. Картографическое моделирование снежного покрова в технологии геоинформационных систем // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова 2020. № 1. С. 23–27.
- Мартынова Ю.В., Матюхина А.А., Воронай Н.Н., Крупчатников В.Н. Особенности формирования снежного покрова в Сибири и их связь с аномалиями динамики атмосферы Северного полушария // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 1. № 6. С. 118–125. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2021-1-6-118-125>
- Метеорологический ежемесячник // Уральское УГМС. 1990–2020 гг. Вып. 9. Ч. 2. № 1–5. С. 10–13.
- 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. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-73-86>
- Сидоров И.А. Верификация характеристик снежного покрова по данным реанализа ERA 5-Land и наблюдательных подразделений Пермского края за период 1990–2020 гг. // Географическое изучение территориальных систем. Сб. материалов XVI Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Пермь, 13 мая 2022 г. / Под ред. А.А. Сафаряна. Пермь: ПГНИУ, 2022. С. 160–164.
- Сидоров И.А. Сравнительный анализ характеристик снежного покрова по данным гидрометеорологических станций и постов на территории Пермского края // Географич. изучение территориальных систем: Сб. материалов XV Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Пермь, 11–12 мая 2021 г. / Под ред. А.А. Сафаряна. Пермь: ПГНИУ, 2021. С. 181–185.
- Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 369–380. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380>
- Турков Д.В., Сократов В.С., Титкова Т.Б. Снежный покров Западной Сибири по расчетам на модели локального теплообмена SPONSOR и данным реанализа // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIII Междунар. симпозиума. Электронный ресурс, Иркутск, 03–07 июля 2017 года / Отв. О.А. Романовский. Иркутск: ИОА СО РАН. 2017. С. 391–395.
- Хан В.М., Рубинштейн К.Г., Шмакин А.Б. Сравнение сезонной и межгодовой изменчивости снежного покрова в бассейнах рек России по данным наблю-

- дений и реанализов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 69–80.
- Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидромет. исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 120–143.
- Шихов А.Н., Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Пьянков С.В. Расчёт снегонакопления в бассейне р. Селенги на основе данных глобальных численных моделей атмосферы с верификацией по спутниковым данным // Материалы 20-й Междунар. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: Ин-т космич. исслед. РАН, 2022. 124 с.
<https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>
- Era 5-Land. Climate Data Store. Copernicus Climate Change Service // Электронный ресурс.
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
(Дата обращения: 23.01.2023)
- Kunkel K.E., Robinson D.A., Champion S., Yin X., Estilow T., Frankson R.M. Trends and extremes in Northern Hemisphere snow characteristics // Current Climate Change Report. 2016. V. 2. P. 65–73.
- Kouki K., Luojus K., Riihelä A. Evaluation of snow cover properties in ERA5 and ERA5-Land with several satellite-based datasets in the Northern Hemisphere in spring 1982–2018 // The Cryosphere Discuss. [preprint]. 2023.
<https://doi.org/10.5194/tc-2023-53>
- Pelosi A., Terribile F., D’Urso G., and Chirico, G.B. Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration // Water. 2020. V. 12 (6). 1669 p.
- Sheffield J., Goteti G., Wood E.F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. // Journ. of Climatology. 2006. V. 19: 3088–3111.

Citation: Kryuchkov A.D., Kalinin N.A., Sidorov I.A. Quality of snow cover characteristics derived from ERA 5-Land reanalysis for the territory of Perm Krai. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 383–396 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423030055

Quality of Snow Cover Characteristics Derived from ERA 5-Land Reanalysis for the Territory of Perm Krai

A. D. Kryuchkov^{a,#}, N. A. Kalinin^a, and I. A. Sidorov^a

^aPerm State University, Perm, Russia

[#]e-mail: Candy55man@ya.ru

Received March 31, 2023; revised June 6, 2023; accepted June 27, 2023

Agreement between values of the mean monthly snow depth provided by the ERA 5-Land reanalysis and similar characteristics of snow cover calculated on the basis of the extended hydrometeorological monitoring performed in the Perm Region for 1990–2020 is analyzed. It was found that ERA 5-Land in 73% of cases reproduces the presence/absence of snow during the onset period, and in 53% – during the period of snow loss. The conclusions made in the authors' previous studies based on more limited material were generally confirmed. It is shown that the reanalysis values of the snow depth are overestimated in relation to instrumental measurements for most of the hydrometeorological stations of the Perm Region. In space, the magnitude of the reanalysis error increases from the southwest to the northeast of the region, with the exception of its central part, where the influence of the Kama water reservoir is perceptible. But the interannual variability of the average snow depth in the Perm Region was reproduced by the ERA 5-Land reanalysis adequately. For 30 years, the magnitude of the reanalysis error decreased as it was compared with 61% observation points. The analysis of seasonal variability showed that in ERA 5-Land time of the maximum snow depth was shifted to earlier onset. The complete coincidence of the seasonal course was recorded only in 5% of hydrometeorological monitoring sites. The value of the average monthly discrepancies between the data of the reanalysis and the information of the posts as a whole exceeds the similar characteristic for the stations, which is especially evident during the period of active snowmelt.

Keywords: ERA 5-Land reanalysis, snow cover characteristics, hydrometeorological monitoring points, Perm Region

REFERENCES

- Astafurov V.G., Evsyutkin T.V., Kuryanovich K.V., Skorokhodov A.V.* Statistical models of image texture and physical parameters of cloudiness during snow cover periods on the Russian Federation territory from MODIS data. *Optika atmosfery i okeana* Optics of the atmosphere and ocean 2018, 31 (7): 537–541. <https://doi.org/10.15372/AOO20180706> [In Russian].
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M.* Description of the data array characteristics of snow cover at meteorological stations in Russia and the former USSR" Certificate of state registration of the database No. 2014621201. Retrieved from: <http://meteo.ru/data/165-snow-cover#opisanie-massiva-dannykh> (Last access: 26 January 2023) [In Russian].
- Grigorev V.YU., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M.* Spatial and temporal variability of ERA5 precipitation accuracy over Russia. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. Proc. of the RAS. Geographical series.* 2022, 86 (3): 435–446. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062> [In Russian].
- Evseeva N.S., Petrov A.I., Kashiro M.A., Kvasnikova Z.N., Batmanova A.S., Khon A.V.* Influence of the relief and vegetation on the distribution of the snow cover in the pools of small rivers. *Geosferynye issledovaniya.* Geospheric Research. 2017, 4: 64–74. <https://doi.org/10.17223/25421379/5/6> [In Russian].
- Kazakova E.V.* *Yezhednevnyaya otsenka lokal'nykh znacheniy i ob'yektivnyy analiz kharakteristik snezhnogo pokrova v ramkakh sistemy chislennogo prognoza pogody COSMO-Ru.* Daily assessment of local values and objective analysis of snow cover characteristics in the framework of the COSMO-Ru numerical weather forecast system. PhD. Moscow: Hydrometeorol. scientific-research center of Russia. 2015: 181 p. [In Russian].
- Kalinin V.G., Shaydulina A.A., Rusakov V.S., Fasakhov M.A.* Mathematical and geoinformation modeling of snow-melt process in the river drainage basins of the Kama region. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2022, 62 (1): 63–74. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010116> [In Russian].
- 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 RAN. Ser. geogr.* Proc. of the RAS. Geographical series. 2020, 84 (6): 855–863. <https://doi.org/10.31857/S2587556620060072> [In Russian].
- 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-164-175> [In Russian].
- Korshunova N.N., Davletshin S.G., Arzhanova N.M.* Variability of snow cover characteristics over the Russian territory. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya.* Fundamental and Applied Climatology. 2021, 7 (1): 80–100. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-80-100> [In Russian].
- Kotova E.I.* Assessment of factors influence on the composition of snow cover in the Russian Arctic. *Uspehi Sovremennogo Estestvoznaniya.* Advances in Current Natural Sciences. 2019, 10: 158–163. [In Russian].
- Kryuchkov A.D.* *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie kharakteristik snezhnogo pokrova na territorii Permskogo kraya.* Spatial and temporal distribution of snow cover characteristics on the territory of the Perm region. PhD. Perm: Perm State National Research University, 2021: 223 p. <http://www.psu.ru/files/docs/science/dissertatsionnye-sovety/kryuchkov/disser.pdf> [In Russian].
- Kryuchkov A.D., Istomina O.V.* Snow cover dynamic on the territory of the Perm region in the 1988–2018. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle.* Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences. 2019, 29 (2): 243–251 [In Russian].
- Kryuchkov A.D., Kalinin N.A.* Comparison of snow cover characteristics according to meteorological stations and ERA 5-Land reanalysis in the Perm Region. *Gidrometeorologicheskiye Issledovaniya i Prognozy.* Hydrometeorological Research and Forecasting. 2021, 2 (380): 95–110. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-95-110> [In Russian].
- Kurakina N.I., Mikhaylova A.A.* Cartographic modelling of snow cover in geographic information system technology. *Izvestia SPbETU "LETI".* Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2020, 1: 23–27 [In Russian].
- Martynova Yu.V., Matyukhina A.A., Voropay N.N., Krupchatnikov V.N.* Features of the snow cover formation in Siberia and the relationship with the atmospheric dynamics anomalies in the Northern Hemisphere. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem.* Ecology. Economy. Computer science. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems. 2021, 1 (6): 118–125. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2021-1-6-118-125> [In Russian].
- Meteorological monthly guide. Ural'skoe UGMS.* Ural UGMS. 1990–2020, 9 (2): 1–5, 10–13. [In Russian].
- 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, 55 (4): 73–86. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-73-86> [In Russian].
- Sidorov I.A.* Verification of snow cover characteristics according to the ERA 5-LAND reanalysis and observation points of Perm region for 1990-2020. *Geograficheskoe izuchenie territorial'nyh sistem: Sbornik materialov HVI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonnyh, Perm', 13 maya 2022 goda.* Geographical Research of Territorial Systems: Collection of materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference students, graduate students and young scientists (May 13, 2022). Perm: Perm State University. 2022: 160–164 [In Russian].

- Sidorov I.A.* Comparative analysis of snow cover characteristics according to hydrometeorological stations and posts on the territory of the perm region Geographical Research of Territorial Systems: Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference students, graduate students and young scientists (May 11–12, 2021). Perm: Perm State University. 2021: 181–185 [In Russian].
- 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, 56 (3): 369–380.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380> [In Russian].
- Turkov D.V., Sokratov V.S., Titkova T.B.* Snow cover of Western Siberia according to calculations based on the SPONSOR model of local heat and moisture exchange and reanalysis data. Atmospheric and oceanic optics. Atmospheric physics: Proc. of the XXIII International Symposium. Irkutsk: V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science. 2017: 391–395 [In Russian].
- 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. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana.* Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2007, 43 (1): 59–69 [In Russian].
- Churiulin E.V., Kopeykin V.V., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churiulina A.G.* Analysis of snow cover characteristics by satellite and model data for different catchment areas are located on the territory of the Russian Federation. *Gidrometeorologicheskiye Issledovaniya i Prognozy.* Hydrometeorological Research and Forecasting. 2018, 2 (368): 120–143 [In Russian].
- Shikhov A.N., Chernykh V.N., Ayurzhanayev A.A., Pyankov S.V.* Calculation of snow accumulation in the Selenga river basin based on data from global numerical models of the atmosphere with verification by satellite data. *Materialy 20 Mezhdunarodnoi konferencii "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*. Moscow: Space Research Institute RAS. 2022: 124 p.
<https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a> [In Russian].
- Era 5-Land. Climate Data Store. Copernicus Climate Change Service. Retrieved from: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (Last access: 23 January 2023).
- Kunkel K.E., Robinson D.A., Champion S., Yin X., Estilow T., Frankson R.M.* Trends and extremes in Northern Hemisphere snow characteristics. *Current Climate Change Report.* 2016, 2: 65–73.
- Kouki K., Luoju K., Riitelä A.* Evaluation of snow cover properties in ERA5 and ERA5-Land with several satellite-based datasets in the Northern Hemisphere in spring 1982–2018. *The Cryosphere Discuss.* [preprint]. 2023. <https://doi.org/10.5194/tc-2023-53>
- Pelosi A., Terribile F., D'Urso G., and Chirico, G.B.* Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration. *Water.* 2020, 12 (6): 1669.
- Sheffield J., Goteti G., Wood E.F.* Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journ. of Climatology.* 2006, 19: 3088–3111.