
СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛАВИНЫ

УДК 551.578.46

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛАГОЗАПАСОВ СНЕГА НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ

© 2025 г. Н. А. Калинин, А. Д. Крючков,
И. А. Сидоров, Р. К. Абдуллин, А. Н. Шихов*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

**e-mail: and3131@inbox.ru*

Поступила 24.07.2024 г.

После доработки 08.10.2024 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

Выполнено сопоставление данных о водном эквиваленте снега (ВЭС), полученных из реанализа ERA5-Land, с данными снегомерных съёмок за период с 1967 по 2023 г. Показано, что в южной части края отмечается некоторое завышение, а в северной — занижение ВЭС по данным реанализа. Выявлено статистически значимое уменьшение ВЭС в первой половине холодного периода по всей территории края, которое подтверждается по данным снегомерных съёмок.

Ключевые слова: водный эквивалент снега, реанализ ERA5-Land, снегомерные съёмки, пространственно-временное распределение, межгодовая изменчивость, многолетние тренды

DOI: 10.31857/S2076673425010044, EDN: GZIZZV

ВВЕДЕНИЕ

Сезонный снежный покров — важный климатообразующий фактор и один из ключевых компонентов гидрологического цикла суши. Роль снежного покрова особенно велика для таких районов, как Средний и Северный Урал, поскольку здесь он отмечается на протяжении значительной части года. Ключевые характеристики снежного покрова — его высота, плотность, продолжительность залегания и накопленный запас влаги (водный эквивалент снега, далее ВЭС). Измерения этих величин производятся на сети гидрометеорологического мониторинга. Высота снежного покрова измеряется ежедневно на метеостанциях и постах по снегомерной рейке, а запас воды в снеге оценивается по данным снегомерной съёмки каждые 5 или 10 дней (Наставление..., 1985).

Как отмечено в ряде работ (Турков, Сократов, 2016; Чурюлин, 2019; Крючков и др., 2023), для территории России характерен дефицит информации о пространственно-временном распределении снежного покрова и его многолетней изменчивости. Это обусловлено точечным характером измерений, низкой плотностью сети, неравномерным распределением, а иногда и низкой репрезентативностью пунктов мониторинга. Интерполяция данных снегомерных съёмок может приводить к некорректным результатам (Пьянков, Шихов, 2017).

В труднодоступной и горной местности измерения почти не проводятся. Частота проведения снегомерных съёмок также недостаточна для ряда практических приложений.

Для получения пространственно-распределённых оценок ВЭС применяются математические модели снежного покрова разного уровня сложности (Kuchment et al., 2010; Гусев, Насонова, 2010; Турков, Сократов, 2016; Мотовилов, Гельфан, 2018; Ryankov et al., 2018), продукты обработки спутниковых данных в микроволновом диапазоне спектра (Kelly et al., 2005; Китаев и др., 2020) или различные комбинированные подходы. К последней группе относятся результаты комбинирования спутниковых наблюдений и измерений на сети метеостанций (Takala et al., 2011) или результаты моделирования с усвоением данных о высоте снежного покрова на метеостанциях (Brown, Brasnett, 2010; Казакова, 2015; Чурюлин, 2019). В открытом доступе имеется несколько источников данных о запасах воды в снеге, имеющих пространственное разрешение 25×25 км и доступных за разные периоды времени. Для оценки ВЭС на территории России подходят данные ESA GlobSnow Snow Water Equivalent (Takala et al., 2011; Турков и др., 2017), а также Канадского метеорологического центра (Brown, Brasnett, 2010), которые отклоняются от наземных наблюдений не более чем на 20% (Георгиевский и др., 2020). Однако эти данные могут

быть неоднородны во времени, что связано с разной доступностью наземных наблюдений за разные годы (Георгиевский и др., 2020).

Получение многолетних и однородных во времени данных о ВЭС на обширных территориях также могут обеспечить реанализы. В частности, данные реанализа ERA5-Land, разработанного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), обладают исключительно высоким пространственным разрешением 0.1° , что для территории Пермского края соответствует примерно 9 км, дискретностью по времени 1 час, и покрывают период с 1950 г. по настоящее время (Muñoz-Sabater et al., 2021). Это обеспечивает их применимость для изучения климатических характеристик снежного покрова.

В ранее опубликованных работах (Крючков, Калинин, 2022; Крючков и др., 2023) показано, что данные реанализа ERA5-Land о высоте снежного покрова хорошо согласуются с результатами измерений на метеостанциях и гидропостах на территории Пермского края, за исключением нескольких пунктов, расположенных на берегах водохранилищ. При этом верификация значений ВЭС по данным ERA5-Land для Пермского края не проводилась. Также в работе (Крючков и др., 2023) показана высокая согласованность межгодовой изменчивости высоты снежного покрова по данным наблюдений и реанализа, что открывает возможность применения данных реанализа для изучения многолетних трендов и их пространственной неоднородности. Исходя из этого, в настоящей работе были поставлены две задачи — выполнить верификацию данных реанализа ERA5-Land о запасе воды в снеге на территории Пермского края путём их сравнения с материалами снегомерных съёмок на сети Росгидромета, а также оценить особенности пространственного распределения ВЭС и их многолетние изменения. Рассматриваемый период с 1967 по 2023 г. выбран из-за доступности данных снегомерных съёмок за эти годы.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исходной информацией послужили среднемесячные данные о ВЭС из реанализа ERA5-Land (переменная Snow Depth Water Equivalent) и результаты снегомерных съёмок на лесных и полевых маршрутах метеостанций Пермского края за 1967–2023 гг. Данные снегомерных съёмок получены по материалам Уральского УГМС (Метеорологический ежемесячник..., 1990–2020). Снегомерные съёмки проводятся на всех 25 метеостанциях, но на некоторых из них имеются существенные пропуски в рядах данных. В настоящей работе использованы данные 17 лесных и 18 полевых снегомерных маршрутов на 22 метеостанциях (табл. 1). Расположение метеостанций показано на рис. 1.

Снегосъёмки проводятся в зимний период каждые 10 дней, а в марте-апреле — каждые пять дней, но в настоящей работе использовались данные с шагом по времени 10 дней. Также важно отметить, что снегосъёмки в лесу на ряде метеостанций проводятся только с января.

Данные реанализа были загружены с сервиса Copernicus (Copernicus Climate Data Store..., 2024) в формате GRIB, в пределах области $55\text{--}62^\circ$ с.ш. и $49\text{--}62^\circ$ в.д., также за 1967–2023 гг., с октября по май каждого года. Были получены данные, осреднённые по месяцам (Monthly), а также почасовые данные, но только за один срок (00 ч Всемирного скоординированного времени). Почасовые данные были использованы для расчёта максимальных за сезон значений ВЭС, а также дат формирования максимумов. Эти расчёты, а также конвертация данных из формата Grib в формат Geotiff выполнены средствами языка программирования Python.

В реанализе ERA5-Land для описания процессов формирования и таяния снежного покрова используется параметризация подстилающей поверхности Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land (TESSEL). Её подробное описание приведено в документации ЕЦСПП (Integrated Forecast System Documentation..., 2018). Параметризация TESSEL включает однослойную модель, описывающую основные процессы в снежном покрове (снегонакопление, перехват выпадающего снега растительностью, испарение с поверхности снежного покрова и растительности, перехват жидких осадков снежным покровом, уплотнение снега под действием собственного веса, радиационную и адвективную составляющие снеготаяния, водоотдачу снега). Характеристики растительного покрова в реанализе ERA5-Land получены из проекта Global Land Cover Characteristics (GLCC), их первоисточником служат спутниковые снимки радиометра AVHRR с размером пиксела 1100 м (Loveland et al., 2000). В данных GLCC выделено 20 типов подстилающей поверхности, в том числе пять типов лесов (вечнозелёные и листопадные хвойные леса, вечнозелёные и листопадные лиственные леса, смешанные леса). Такая классификация позволяет учитывать различия в интенсивности перехвата твёрдых осадков кронами деревьев, которые существенно влияют на снегонакопление (Кузьмин, 1961; Мотовилов, Гельфан, 2018). Характеристики подстилающей поверхности осреднены в ячейках сетки реанализа (шаг сетки 0.1°). Это важно иметь в виду при сравнении с данными снегомерных съёмок, так как протяжённость снегомерного маршрута существенно меньше размера ячейки сетки реанализа.

Сравнение данных реанализа с данными снегомерных съёмок производилось для среднемесячных значений ВЭС, поэтому и данные снегомерных съёмок были осреднены аналогичным образом. Сам процесс сопоставления был выполнен средствами

Таблица 1. Перечень полевых и лесных снегомерных маршрутов на территории Пермского края

Метеостанция (WMO ID)	Абс. высота, м	Тип маршрута		Пропуски в данных снегомерных съёмок	
		Поле	Лес	Поле	Лес
Ныроб (23912)	172	+	+	Октябрь-ноябрь 1989–2014 гг.	Октябрь-ноябрь 1989- 2014 гг. Ноябрь-май 2017–2019 гг.
Вая (23913)	183		+		Октябрь-ноябрь 2019 г.
Усть-Чёрная (23905)	181		+		
Чердын (23914)	208	+	+	Декабрь 2004 г.	Февраль-май 2019 г.
Гайны (23909)	196	+	+	Октябрь-май 1995–1997 гг. Декабрь 1997 г. Январь-март 1998 г. Октябрь-декабрь 2001 г. Январь 2002 г.	Октябрь-май 1995–1998 гг.
Коса (28013)	181	+	+	Октябрь-май 2014–2020 гг.	
Кочёво (28016)	180		+		Октябрь-май 1995–1999 гг.
Кудымкар (28116)	186	+		Октябрь-декабрь 1988 г.	
Чёрмоз (28128)	122	+			
Верещагино (28216)	238	+	+	Декабрь 2002 г.	
Бисер (28138)	463		+		
Лысьва (28013)	223	+		Февраль-май с 1973 по 1974 г. Декабрь 1979 г.	
Добрянка (28222)	155		+		
Пермь (28224)	171	+	+		
Кын (28238)	244	+	+	Январь-май 2011 г.	Январь-май 2009, 2011, 2014–2015 и 2018 гг.
Б. Соснова (28313)	153	+		Декабрь 1978 г. Январь-май 1979 г. Февраль-май 1980 г.	
Оханск (28321)	163	+			
Кунгур (28326)	153	+	+		Февраль-май 1983 г.
Оса (28324)	96	+			
Ножовка (28319)	133	+	+		Февраль 2006 г.
Чернушка (28428)	148	+			
Октябрьский (28429)	334	+	+	Февраль-май 1998 г.	Февраль-май 1998 г.

ГИС, путём извлечения значений в точки метеостанций из соответствующих ячеек сетки реанализа (расположение метеостанций и ячеек регулярной сетки показано на рис. 1). Для оценки точности рассчитаны абсолютная и относительная ошибка данных реанализа в сравнении с данными снегосъёмки. Относительная ошибка считалась приемлемой, если она составляла менее 15%.

Для оценки изменения ВЭС по данным ERA5-Land во времени рассчитаны коэффициенты

наклона линии тренда (далее КНЛТ) за каждый месяц в каждой ячейке сетки реанализа. Объём выборки для расчёта КНЛТ составил 66 лет (по 66 значений с 1957 до 2023 г. в каждой ячейке сетки), значения были пересчитаны в мм/10 лет. Результаты расчётов КНЛТ использованы для построения карт трендов. Статистическая значимость трендов оценивалась для среднемесячных значений ВЭС по данным реанализа и снегомерных съёмок. Поскольку распределение в рядах данных могло

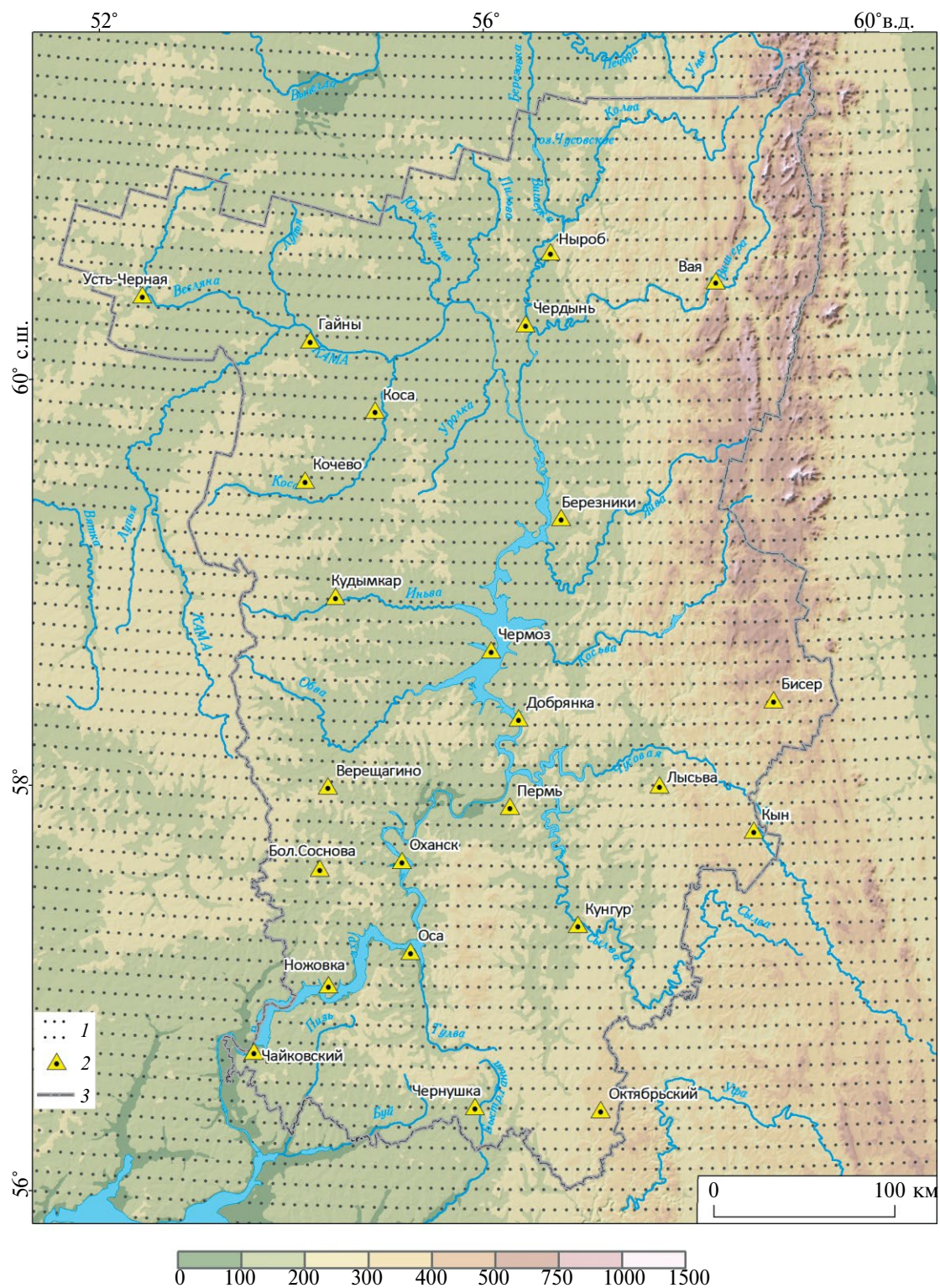


Рис. 1. Регион исследования, наблюдательная сеть и узлы сетки реанализа.

1 – узлы сетки реанализа ERA5-Land, 2 – метеостанции, 3 – граница Пермского края

Fig. 1. Study region and observation network.

1 – ERA5-Land grid nodes, 2 – weather stations, 3 – Perm region boundary

отличаться от нормального, использовались непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена. Уровень значимости принят равным 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка достоверности данных ERA5-Land о влагозапасах снега. В целом реанализ ERA5-Land адекватно воспроизводит основные особенности пространственного распределения ВЭС в Пермском крае, известные по ранее опубликованным работам (Пьянков, Шихов, 2017; Крючков, 2021). В частности, хорошо выражен основной максимум снегонакопления вдоль Уральских гор и вторичные максимумы на Тулвинской и Верхнекамской возвышенностях (рис. 2). В горной части края максимум снегонакопления смещён на апрель, тогда как на равнинной территории он отмечается в марте, что также подтверждается ранее опубликованными данными (Пьянков, Шихов, 2017; Ryankov et al., 2018; Крючков, 2021).

Коэффициенты корреляции (R) между значениями ВЭС по данным реанализа и снегомерных съёмок (табл. 2) составляют в среднем для снегосъёмок в поле — 0.72, а для снегосъёмок в лесу — 0.83. Внутригодовая изменчивость R незначительна — для снегосъёмок в поле в среднем по 18 маршрутам от 0.67 в феврале до 0.82 в ноябре, для лесных маршрутов от 0.80 в марте и апреле до 0.84 в декабре. В октябре и мае корреляции не оценивались, так как в эти месяцы снегомерные съёмки проводятся эпизодически. Разброс значений R составляет для маршрутов в поле от 0.55 в Чермозе до 0.85 в Кочево, для маршрутов в лесу от 0.72 в Кунгуре до 0.88 в Бисере. Относительно слабая корреляция ВЭС по данным снегосъёмок и реанализа выявлена для полевых маршрутов метеостанций Чермоз и Оса ($R = 0.55$ и 0.58 соответственно). Обе эти метеостанции расположены на открытой местности вблизи акватории водохранилищ, где есть условия для выдувания снега с полей в пониженные формы рельефа, что может обуславливать занижение ВЭС при снегосъёмке в безлесной местности.

На большинстве полевых снегомерных маршрутов реанализ ERA5-Land завышает величину ВЭС в течение всего периода снегонакопления (табл. 3). Наиболее сильное завышение отмечается на метеостанциях Чермоз и Оса. Преобладание завышения ВЭС по данным реанализа согласуется с ранее опубликованными оценками для количества осадков в холодный период года по данным реанализа ERA5 (Григорьев и др., 2022), а также для высоты снежного покрова в Пермском крае по данным ERA5-Land (Крючков и др., 2023). Реанализ занижает величину ВЭС лишь для нескольких полевых маршрутов на севере края, в период с октября по февраль. Занижение также отмечается

для метеостанции Октябрьский (юго-восток края) в период с ноября по март.

Для лесных снегомерных маршрутов согласованность данных снегосъёмки и реанализа в целом лучше, чем для полевых. Это может быть обусловлено особенностями расположения лесных маршрутов, большинство которых находятся на севере и востоке края, где величина снегозапасов существенно больше, чем на юге и в центре края (см. рис. 1; табл. 2). Завышение ВЭС по данным реанализа отмечается в основном на лесных маршрутах в южной части края (см. рис. 2; табл. 3). Однако наибольшее завышение (на 50 мм и более) характерно для метеостанций Вая и Кын, снегомерные маршруты которых находятся в глубоких (более 150 м) долинах рек и в связи с этим нерепрезентативны для окружающей территории. В свою очередь на севере края, а также на метеостанциях, расположенных в предгорьях Урала (Бисер), вблизи них (Чердынь) или на возвышенностях (Октябрьский), отмечается существенное занижение ВЭС по данным реанализа. Занижение может объясняться особенностями положения этих метеостанций — они расположены выше, чем средняя высота над уровнем моря в соответствующих ячейках сетки реанализа. Возможна и недооценка локального орографического усиления осадков по данным реанализа, поскольку исходные поля осадков, используемые в ERA5-Land, имеют пространственное разрешение не 0.1, а 0.25° (Muñoz-Sabater et al., 2021).

Рассмотрены зависимости величины абсолютной ошибки ВЭС и её модуля от высоты метеостанций над уровнем моря и от среднесезонного максимума ВЭС (по данным снегосъёмки). Коэффициенты корреляции Спирмена оценены для выборки, включающей лесные и полевые снегомерные маршруты (всего 33 значения). В период с ноября по март выявлена статистически значимая отрицательная корреляция абсолютной ошибки как с высотой местности (значения R от -0.32 в апреле до -0.43 в ноябре), так и со среднесезонным максимумом ВЭС (значения R в пределах от -0.57 до -0.61). В апреле данные зависимости не значимы. Зависимости модуля абсолютной ошибки от высоты местности и максимального значения ВЭС не значимы во все месяцы. Таким образом, подтверждены выявленные пространственные закономерности: на равнинной территории края реанализ в основном завышает ВЭС, а в наиболее многоснежной горной части региона есть тенденция к его занижению. Также важно отметить, что реанализ не воспроизводит экстремальные значения ВЭС (свыше 400 мм), зафиксированные в 1979, 1990, 2002 и 2003 гг. на метеостанциях Губаха, Бисер, Чердынь. Занижение в этих случаях составляет свыше 50 мм.

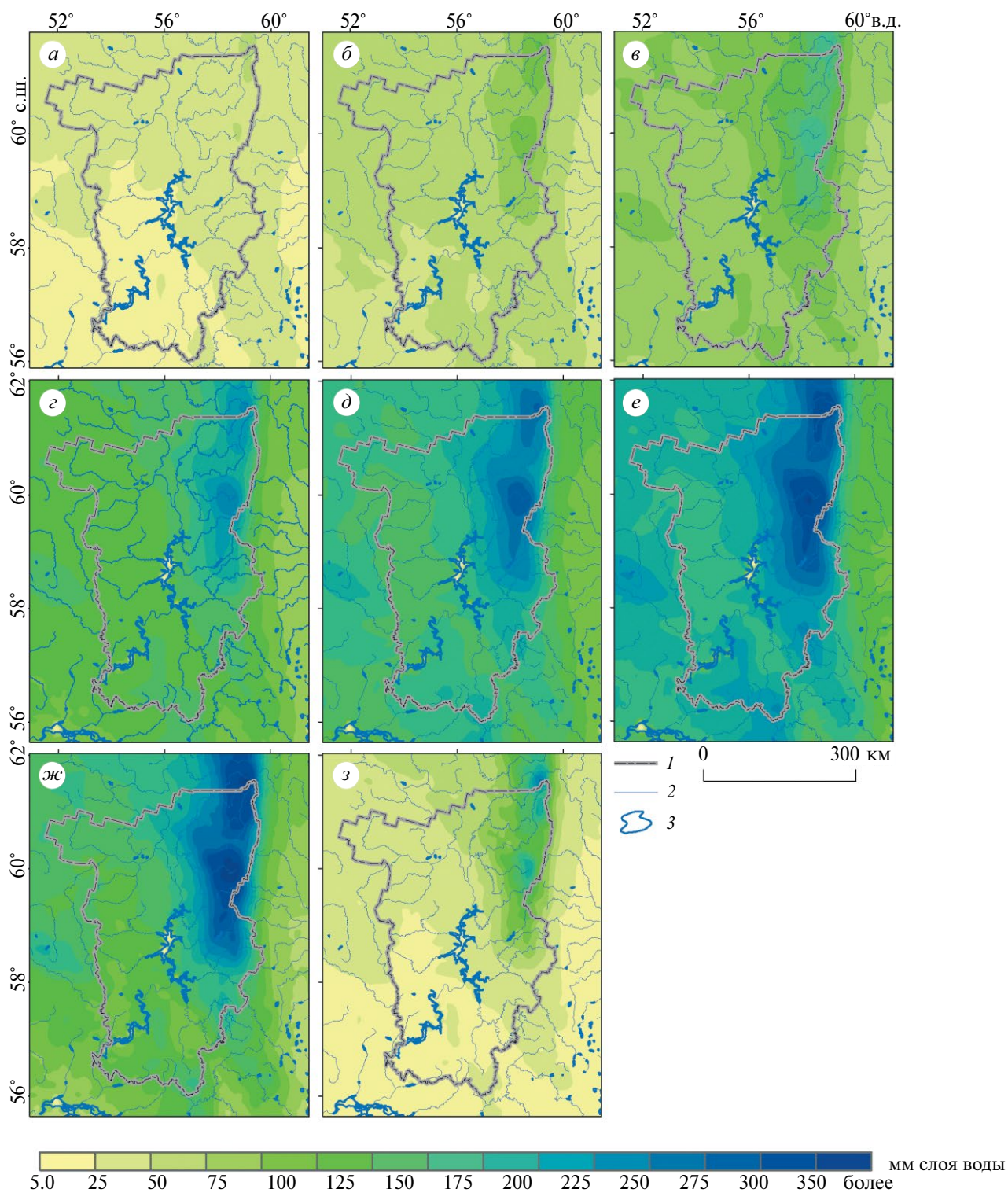


Рис. 2. Многолетние средние месячные значения ВЭС (мм слоя воды) по данным ERA5-Land за период 1967–2023 гг.: октябрь (а); ноябрь (б); декабрь (в); январь (г); февраль (д); март (е); апрель (ж); май (з).

1 – граница Пермского края, 2 – реки, 3 – озёра и водохранилища

Fig. 2. Monthly averaged snow water equivalent (mm SWE) according to the ERA5-Land reanalysis for the period 1967–2023: October (a); November (б); December (в); January (г); February (д); March (е); April (ж); May (з).

1 – Perm region boundary, 2 – rivers, 3 – lakes and reservoirs

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Спирмена между среднемесячными значениями ВЭС по данным реанализа и снегомерной съёмки (длина ряда – с 1967 по 2023 г.) и среднемноголетние годовые максимумы ВЭС на этих станциях по данным снегосъёмки

Значения R для полевых маршрутов по месяцам								Средний-многолетний максимум ВЭС
Метеостанция	XI	XII	I	II	III	IV	Среднее по месяцам	
Ныроб	0.88	0.88	0.83	0.77	0.79	0.83	0.83	253
Чердынь	0.89	0.84	0.73	0.75	0.70	0.87	0.80	251
Гайны	0.90	0.83	0.78	0.82	0.84	0.89	0.84	171.3
Коса	0.89	0.87	0.81	0.78	0.88	0.85	0.85	161.2
Кочёво	0.79	0.91	0.85	0.85	0.90	0.53	0.80	163
Кудымкар	0.75	0.71	0.63	0.60	0.70	0.63	0.67	145.2
Чермоз	0.71	0.57	0.45	0.48	0.50	0.60	0.55	128.4
Верещагино	0.82	0.69	0.48	0.46	0.57	0.55	0.60	152.3
Лысьва	0.79	0.79	0.78	0.70	0.66	0.72	0.74	173.5
Пермь	0.87	0.80	0.67	0.63	0.61	0.59	0.70	154.5
Кын	0.92	0.83	0.83	0.80	0.79	0.69	0.81	163
Бол. Соснова	0.72	0.80	0.77	0.71	0.73	0.62	0.73	150
Оханск	0.84	0.83	0.68	0.55	0.52	0.62	0.67	135.4
Кунгур	0.79	0.66	0.62	0.58	0.48	0.59	0.62	130.1
Оса	0.69	0.62	0.56	0.48	0.57	0.57	0.58	125.5
Ножовка	0.80	0.77	0.67	0.63	0.71	0.81	0.73	152.0
Чернушка	0.81	0.68	0.69	0.73	0.71	0.83	0.74	174.5
Октябрьский	0.90	0.80	0.77	0.78	0.71	0.78	0.79	210.6
Среднее по станциям	0.82	0.77	0.70	0.67	0.69	0.70	0.72	166.3
Лесные маршруты								
Ныроб	0.93	0.93	0.88	0.83	0.78	0.70	0.83	245.7
Вая	0.87	0.83	0.85	0.85	0.82	0.81	0.84	229.3
Усть-Чёрная	0.84	0.87	0.82	0.86	0.88	0.81	0.85	188
Чердынь	0.85	0.89	0.77	0.85	0.76	0.85	0.81	279.8
Гайны	0.89	0.82	0.81	0.85	0.77	0.75	0.81	216.9
Коса	0.78	0.86	0.85	0.81	0.79	0.82	0.81	183.5
Кочёво	0.69	0.66	0.84	0.87	0.77	0.70	0.76	193.7
Добрянка	0.73	0.87	0.81	0.78	0.91	0.96	0.86	159.5
Бисер	0.89	0.87	0.89	0.93	0.86	0.76	0.88	309.2
Верещагино	0.84	0.80	0.78	0.73	0.83	0.84	0.79	153.8
Пермь	0.83	0.81	0.75	0.72	0.70	0.72	0.77	151.2
Кын	0.83	0.83	0.76	0.78	0.77	0.83	0.81	144.8
Кунгур	0.84	0.76	0.73	0.67	0.68	0.61	0.72	130.5
Ножовка	0.75	0.82	0.70	0.64	0.70	0.91	0.76	135.4
Октябрьский	0.88	0.82	0.80	0.83	0.77	0.71	0.83	244.7
Среднее по станциям	0.83	0.84	0.82	0.82	0.80	0.80	0.82	197.7

Таблица 3. Разность среднемесячных значений снеготаяния (в мм слоя воды) по данным реанализа ERA5-Land и по данным снегомерных съёмок. Данные осреднены за 1967–2023 гг. В числителе – данные по полевым маршрутам, в знаменателе – по лесным маршрутам. Отсутствие данных обозначено знаком «×»

Метеостанция	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
Ныроб	–1/2	–8/–7	–8/–20	–7/–18	–9/–7	15/10	76/18	21/12
Вая	×/9	×/20	×/31	×/26	×/36	×/55	×/73	×/38
Усть-Чёрная	×/2	×/–4	×/–9	×/–17	×/–9	×/2	×/–13	×/2
Чердын	1/1	–5/–7	–11/–20	–19/–47	–16/–37	3/–26	54/–36	12/11
Гайны	0/–1	–7/–10	–11/–20	–14/–40	–8/–34	11/–26	39/–24	2/–1
Коса	1/1	–4/0	–10/–4	–15/–12	–11/–3	6/7	37/–14	3/–2
Кочёво	×/2	×/–7	×/–13	×/–22	×/–18	×/–6	×/–38	×/0
Кудымкар	2/×	3/×	6/×	11/×	17/×	37/×	53/×	2/×
Чёрмоз	3/×	10/×	23/×	36/×	49/×	79/×	99/×	10/×
Верещагино	0/2	–5/–1	–7/–1	–6/–4	0/4	15/11	38/5	2/2
Бисер	×/–1	×/–17	×/–26	×/–37	×/–32	×/–31	×/–62	×/–32
Лысьва	3/×	5/×	11/×	19/×	25/×	49/×	74/×	5/×
Добрянка	×/3	×/5	×/9	×/10	×/23	×/38	×/23	×/3
Пермь	1/2	–2/1	2/6	3/4	6/12	25/27	45/28	2/2
Кын	3/3	3/8	7/19	13/23	19/38	35/50	58/29	4/2
Б. Соснова	1/×	2/×	4/×	2/×	5/×	20/×	40/×	2/×
Оханск	2/×	2/×	8/×	12/×	19/×	43/×	54/×	3/×
Кунгур	1/2	2/6	6/13	14/13	21/22	41/32	44/26	1/1
Оса	2/×	8/×	15/×	27/×	43/×	77/×	68/×	3/×
Ножовка	1/2	1/7	5/13	7/15	11/28	32/45	40/27	2/2
Чернушка	2/×	0/×	0/×	2/×	11/×	36/×	56/×	2/×
Октябрьский	1/2	–6/–8	–8/–16	–14/–36	–18/–38	–15/–45	28/–46	2/1

Относительная ошибка ВЭС по данным реанализа имеет высокие значения в период формирования снежного покрова в октябре–ноябре и особенно в период снеготаяния в апреле–мае (табл. 4). В октябре–ноябре это обусловлено низкой величиной ВЭС (в основном от 5 до 25 мм), частыми оттепелями и выпадением осадков в смешанной фазе. В период снеготаяния увеличению ошибки способствуют локальные особенности снегомерных маршрутов (уклон и экспозиция склонов, характер растительного покрова), которые сильно влияют на интенсивность таяния снега и нерепрезентативны для всей ячейки сетки реанализа. Так, на всех полевых маршрутах снежный покров стаивает значительно быстрее, чем по данным реанализа, поскольку в соответствующих маршрутах ячейках модельной сетки присутствуют как безлесные, так и лесопокрываемые участки, причём последних как правило больше, так как доля лесопокрываемой

площади почти на всей территории Пермского края превышает 50%.

В период с декабря по март относительная ошибка расчёта ВЭС для большинства снегомерных маршрутов не превышает 25%, за исключением тех метеостанций, где отмечается сильное систематическое завышение ВЭС по данным ERA5-Land в связи с нерепрезентативностью самих маршрутов (Оса, Чермоз, Кын и Вая). Относительная ошибка, осреднённая за весь рассматриваемый период, составляет 14 и 15% для полевых и лесных маршрутов соответственно, что можно считать удовлетворительной точностью.

Для годовых максимумов ВЭС характерны в основном те же соотношения между данными снегомерных и реанализа, что и для среднемесячных значений. В основном по данным реанализа значения ВЭС завышены (рис. 3, а). Наиболее существенное завышение отмечается для метеостанций

Таблица 4. Относительная ошибка (%) расчёта среднемесячных значений снегозапасов по данным реанализа ERA5-Land в сравнении с данными снегомерных съёмок. Данные осреднены за 1967–2023 гг. В числителе — данные по полевым маршрутам, в знаменателе — по лесным маршрутам. Отсутствие данных обозначено знаком «×»

Метеостанция	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
Ныроб	17/55	17/15	8/18	4/11	4/3	7/4	67/10	2099/135
Вая	×/167	×/52	×/35	×/18	×/20	×/26	×/43	×/142
Усть-Чёрная	×/96	×/13	×/12	×/14	×/6	×/1	×/11	×/136
Чердынь	17/26	13/19	12/20	12/26	8/17	1/10	51/18	1248/46
Гайны	11/14	23/30	16/26	13/30	6/20	7/13	64/19	214/23
Коса	21/24	15/1	15/6	13/11	8/2	4/4	58/12	279/37
Кочёво	×/96	×/23	×/19	×/19	×/12	×/4	×/31	×/24
Кудымкар	79/×	17/×	12/×	12/×	15/×	28/×	160/×	150/×
Чёрмоз	165/×	52/×	48/×	46/×	46/×	70/×	329/×	1026/×
Верещагино	15/166	20/5	11/2	6/4	0/3	11/8	144/9	162/200
Бисер	×/10	×/28	×/21	×/19	×/14	×/11	×/25	×/60
Лысьва	105/×	21/×	17/×	18/×	18/×	32/×	169/×	528/×
Добрянка	×/438	×/26	×/16	×/10	×/18	×/25	×/29	×/164
Пермь	25/92	7/7	4/11	4/4	5/10	18/20	146/61	245/200
Кын	90/168	10/39	11/38	13/26	14/34	24/38	130/39	401/99
Б. Соснова	94/×	11/×	8/×	2/×	4/×	15/×	146/×	189/×
Оханск	197/×	11/×	16/×	14/×	16/×	36/×	245/×	268/×
Кунгур	41/420	10/41	14/35	18/17	20/21	38/27	300/82	94/100
Оса	320/×	62/×	33/×	34/×	41/×	75/×	398/×	251/×
Ножовка	129/200	3/59	9/32	8/17	8/26	23/37	117/57	159/200
Чернушка	249/×	1/×	1/×	2/×	8/×	23/×	138/×	197/×
Октябрьский	17/92	16/22	10/18	11/24	11/20	8/20	44/34	227/191

Вая и Кын (лесные маршруты), а также Чермоз и Оса (полевые маршруты). Максимумы ВЭС по данным ERA5/Land на большей части Пермского края в среднем формируются в третьей декаде марта, на севере и в горной части — в первой половине апреля, а на крайнем северо-востоке смещены на третью декаду апреля (рис. 3, б). Даты формирования максимумов ВЭС хорошо коррелируют с величиной этих максимумов как в пространстве, так и во времени (чем позже формируется максимум, тем больше величина ВЭС). Сравнение с данными снегомерных съёмок показывает, что максимумы ВЭС по данным ERA5-Land формируются в среднем на 4–7 дней позже, чем по данным снегосъёмок в лесу, и на 10–14 дней позже, чем по данным снегосъёмок в поле. Для метеостанции Вая (лесной маршрут) расхождение достигает двух недель, а для метеостанции Оса (полевой маршрут) — трёх

недель (см. рис. 3, б). Сильное расхождение дат формирования максимумов ВЭС между данными реанализа и снегосъёмок в поле объясняется тем, что во всех ячейках сетки реанализа значительная часть площади приходится на леса, где максимум снегонакопления отмечается позже, чем на открытых участках. Расхождения для лесных маршрутов в основном не превышают одну неделю и их можно объяснить временной дискретностью данных снегосъёмки, так как использованы данные на последний день декады. Исключение составляет метеостанция Вая, нерепрезентативная для прилегающей территории.

В последние десятилетия максимумы формирования ВЭС смещаются на более ранние сроки, что ожидаемо на фоне повышения температуры воздуха в марте и апреле. Однако тренд в среднем по территории края статистически не значим.

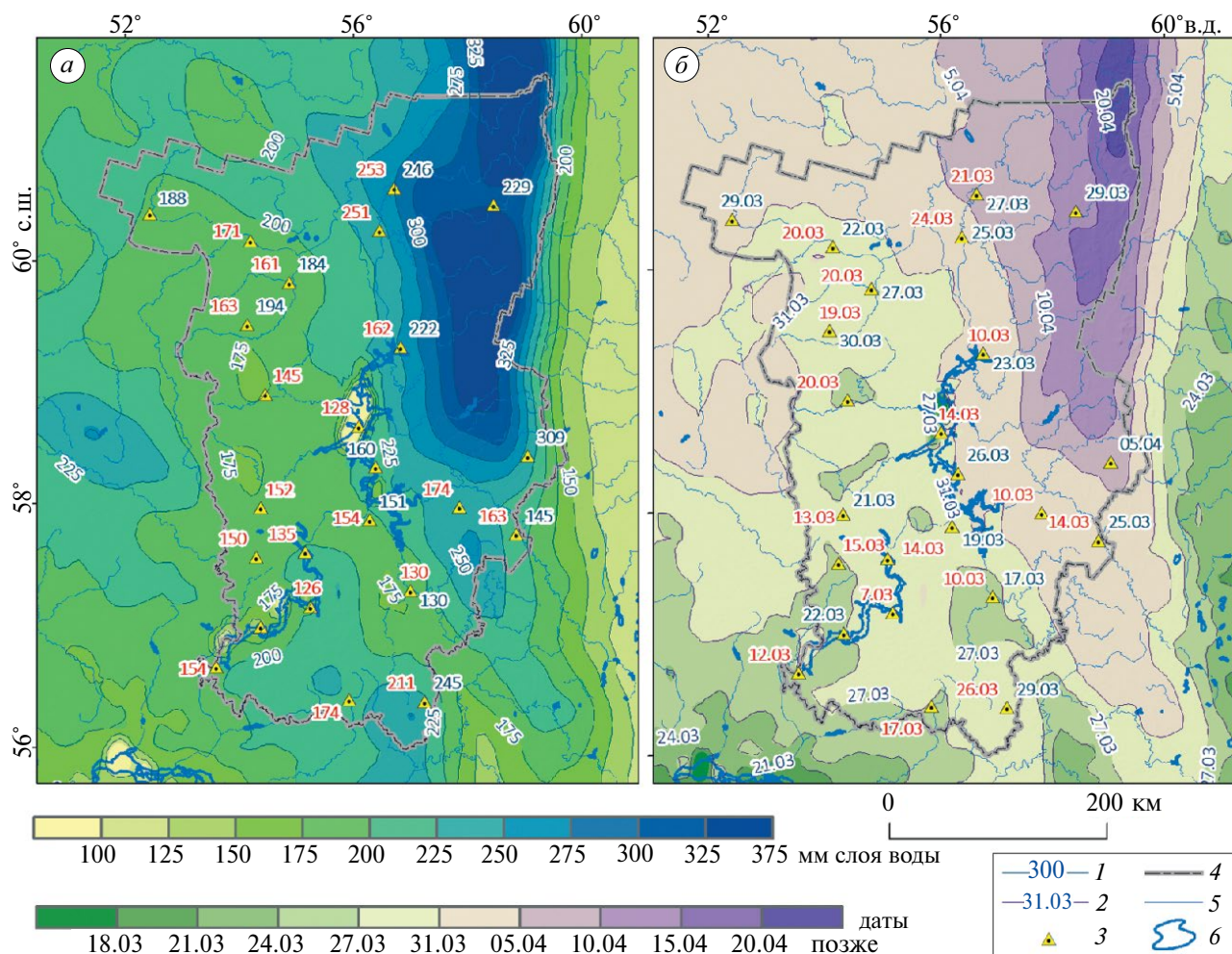


Рис. 3. Среднегодовое годовое максимум ВЭС (а) и средние даты его формирования (б) по данным реанализа ERA5-Land (цветовая шкала) и по данным снегомерных съёмок (подписи у метеостанций) за период 1967–2023 гг. 1 – изолинии среднегодовое годовое максимум ВЭС (мм), 2 – изолинии средней даты формирования годового максимум ВЭС, 3 – метеостанции (значения ВЭС по данным снегосъёмки в поле подписаны красным шрифтом, по данным снегосъёмки в лесу – синим шрифтом), 4 – граница Пермского края, 5 – реки, 6 – озёра и водохранилища

Fig. 3. Annual maximum of SWE (a) and dates of its formation (b) according to the ERA5-Land reanalysis data (colour scale) and the same according to snow measurement surveys (captions at weather stations) averaged for the period 1967–2023. 1 – isolines of mean annual maximum of SWE (mm), 2 – isolines of mean date of formation of annual maximum of SWE, 3 – weather stations (observed SWE values in the non-forest areas are shown in red font, observed SWE values in forests are shown in blue font), 4 – Perm region boundary, 5 – rivers, 6 – lakes and reservoirs

Отдельный интерес представляет сопоставление данных реанализа с данными снегомерных маршрутов на тех метеостанциях, где снегосъёмки проводятся как в лесу, так и в поле. Всего таких метеостанций насчитывается 10, примеры сопоставления данных снегосъёмок и реанализа для них приведены на рис. 4. На пяти метеостанциях (Нырб, Коса, Верещагино, Пермь и Кунгур) значения абсолютной ошибки ВЭС близки для обоих типов маршрута. На оставшихся станциях (Чердынь, Гайны, Кын, Ножовка и Октябрьский) реанализ

лучше воспроизводит данные полевых маршрутов, чем лесных. Это может быть обусловлено особенностями лесных насаждений, поскольку способность древостоя перехватывать выпадающий снег существенно различается на коротких расстояниях (меньших, чем размер ячейки реанализа). И как следует из приведённых выше оценок согласованности данных снегомерной съёмки и реанализа, в целом по региону соотношение обратное (данные снегосъёмки в лесу согласуются с реанализом лучше, чем данные снегосъёмки в поле).

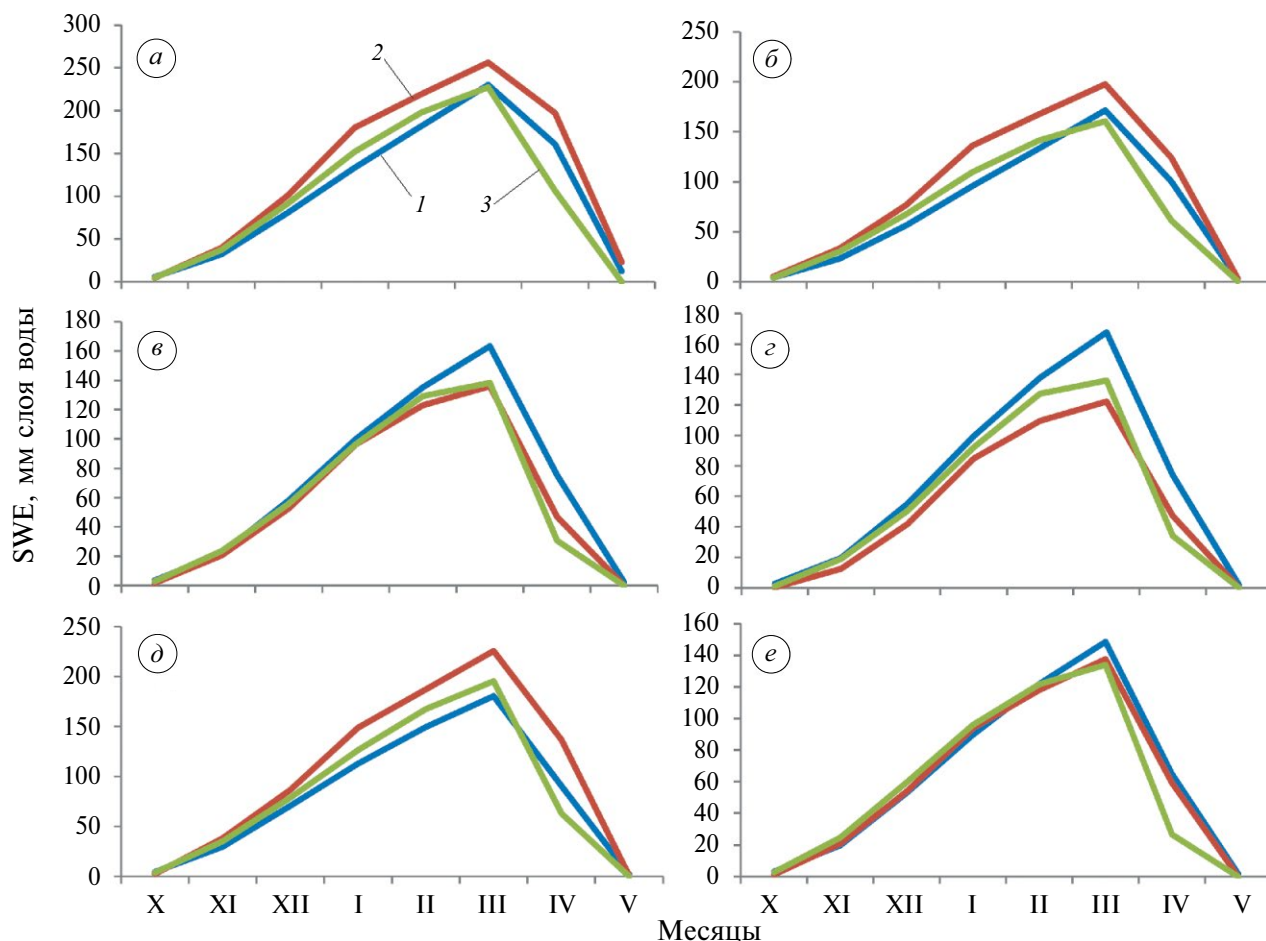


Рис. 4. Многолетние средние месячные значения ВЭС (за 1967–2023 гг.) по данным ERA5-Land и снегомерных съёмок на метеостанциях, расположенных в различных частях Пермского края: Чердынь (а); Гайны (б); Пермь (в); Ножовка (г); Октябрьский (д); Верещагино (е).

1 – данные реанализа, 2 – снегосъёмка в лесу, 3 – снегосъёмка в поле

Fig. 4. Monthly averaged SWE (for 1967–2023) according to the ERA5-Land reanalysis and snow measurement surveys at weather stations located in different parts of Perm region: Cherdyn (a); Gainy (b); Perm (v); Nozhovka (g); Oktyabrsky (d); Vereshchagino (e).

1 – reanalysis data, 2 – snow survey in the forest, 3 – snow survey in the field

Межгодовая изменчивость ВЭС по данным ERA5-Land. Многолетняя динамика ВЭС в Пермском крае, как и на всей территории России, определяется двумя основными факторами – с одной стороны, повышением температуры воздуха, сокращением периода снегонакопления и сдвигом фазы осадков от снега к дождю, а с другой стороны – ростом количества осадков в холодный период года (Китаев, Титкова, 2020). В результате с 1967 по 2023 г. для большей части Пермского края по данным ERA5-Land отмечено снижение снеготранспортировки (рис. 5–6; табл. 5), причём в разные месяцы холодного периода отмечаются различия в интенсивности этого процесса.

Так, в октябре и ноябре ключевым фактором, определяющим динамику ВЭС, является более

позднее установление снежного покрова вследствие потепления (средняя температура воздуха в октябре за рассматриваемый период повысилась более чем на 1.5 °C). В результате по всей территории края отмечается статистически значимое уменьшение ВЭС (см. рис. 5–6, а–б). В абсолютных величинах снижение не превышает 5–7 мм/10 лет (наиболее выражено на юго-востоке), но в процентном отношении достигает 10–18%. По данным снегомерной съёмки в ноябре также отмечается статистически значимый отрицательный тренд ВЭС (см. табл. 5). Максимумы снегонакопления в октябре соответствуют наиболее холодным месяцам (1976, 1992, 2014–2015 гг.), а в ноябре такая зависимость уже не прослеживается.

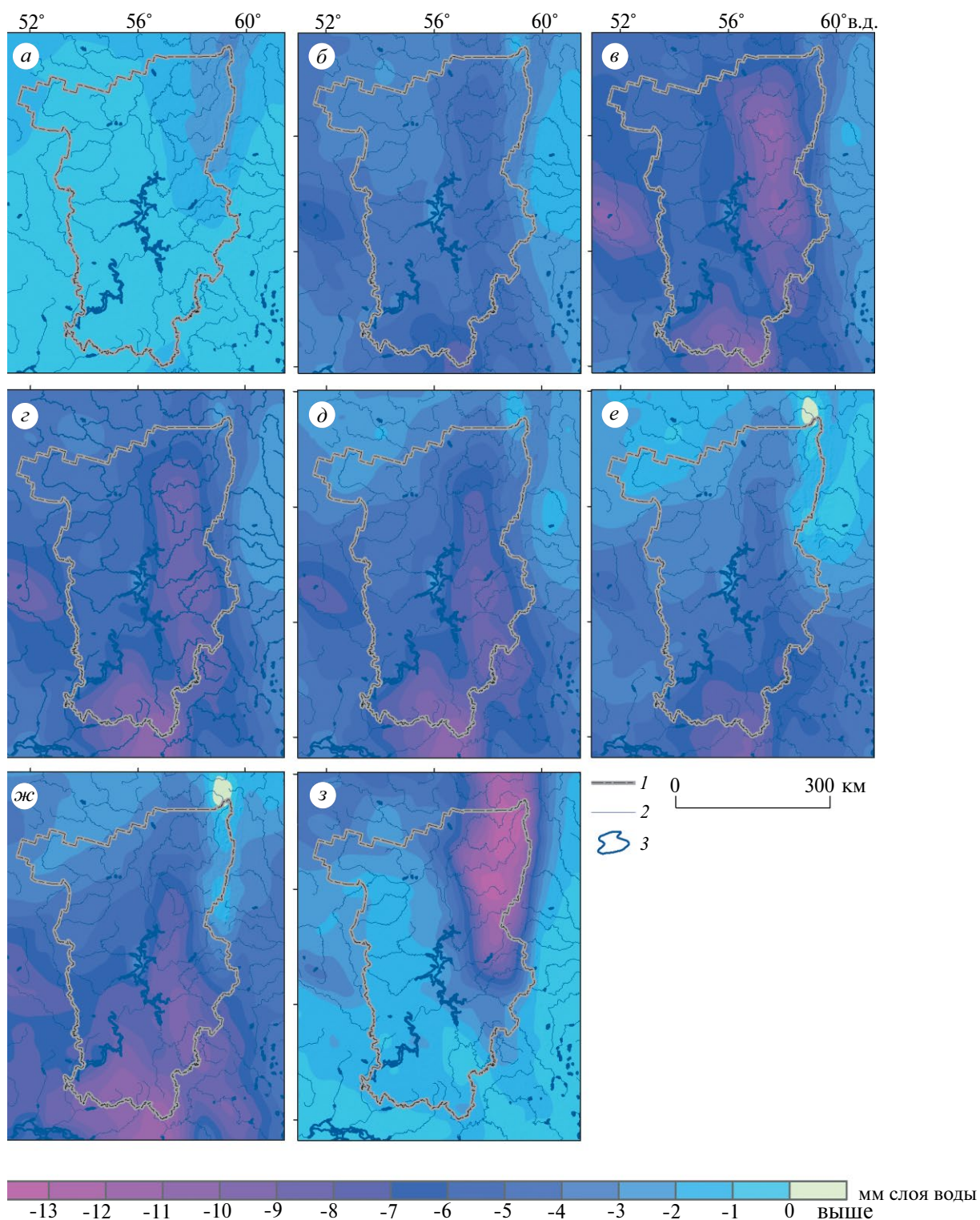


Рис. 5. Тренды осреднённых за месяц значений ВЭС (мм/10 лет) по данным реанализа ERA5-Land за период 1967–2023 гг.: октябрь (а); ноябрь (б); декабрь (в); январь (г); февраль (д); март (е); апрель (ж); май (з).

1 – граница Пермского края, 2 – реки, 3 – озёра и водохранилища

Fig. 5. Trends of monthly averaged SWE (mm/10 years) according to the ERA5-Land reanalysis data for the period 1967–2023. October (a); November (b); December (v); January (z); February (d); March (e); April (je); May (z).

1 – Perm region boundary, 2 – rivers, 3 – lakes and reservoirs

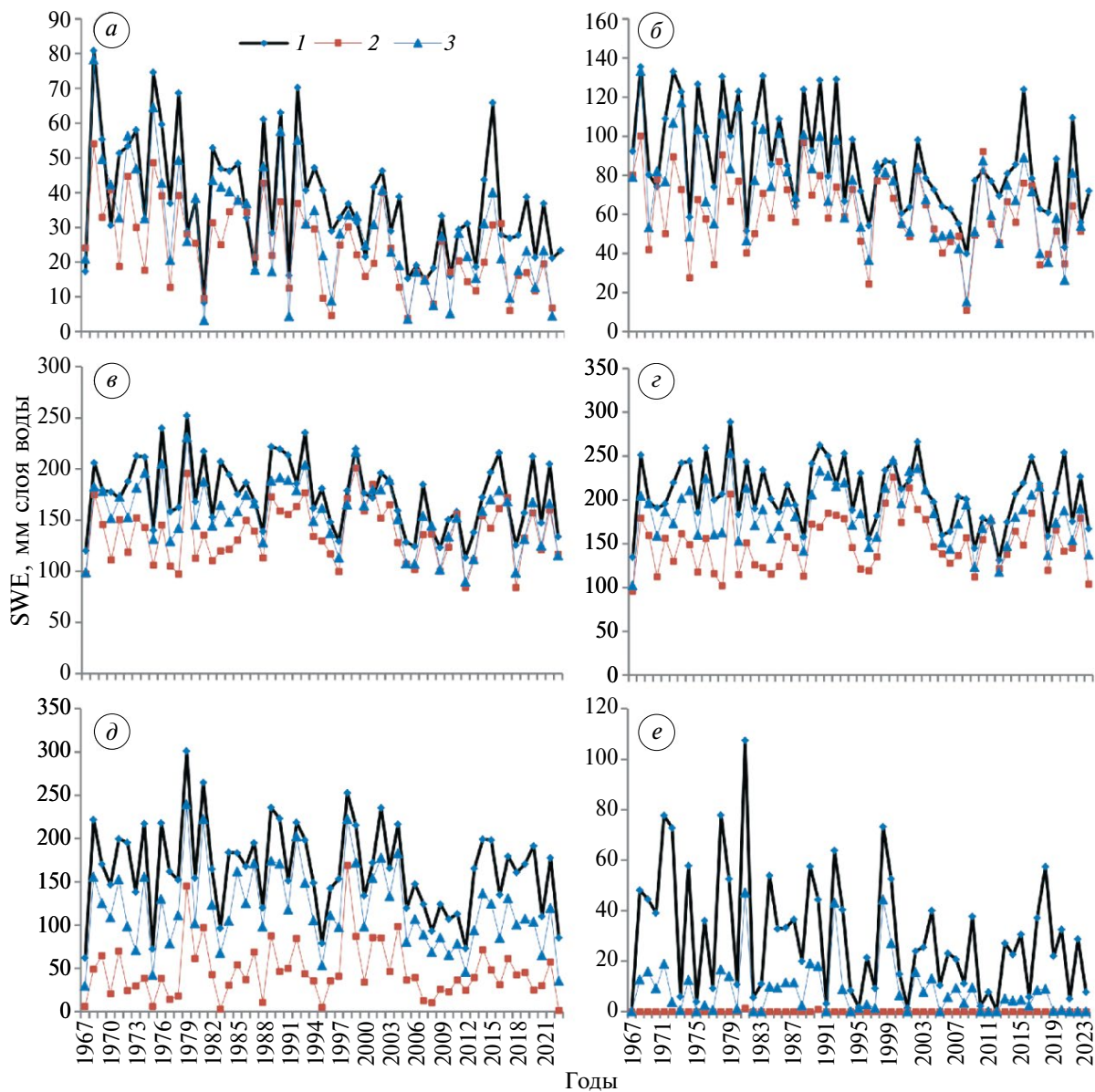


Рис. 6. Межгодовая изменчивость ВЭС, осреднённого по территории Пермского края, по данным реанализа ERA5-Land и снегомерных съёмок в лесу и в поле за период 1967–2023 гг.: ноябрь (а); декабрь (б); февраль (в); март (г); апрель (д); май (е)

Fig. 6. Interannual variability of SWE averaged over the territory of Perm region, according to the ERA5-Land reanalysis data and snow survey in forests and non-forested areas for the period 1967–2023: November (a); December (b); February (v); March (g); April (d); May (e)

Таблица 5. Коэффициенты наклона линии тренда ВЭС (мм/10 лет) по данным реанализа ERA5-Land и по данным снегомерных съёмок (среднее значение по лесным и полевым маршрутам). Выделены статистически значимые тренды

Типы данных	Месяц	XI	XII	I	II	III	IV
Полевые маршруты	реанализ	–5.8	–9.4	–10.7	–9.2	–5.4	–12.5
	снегосъёмка	–3.9	–3.4	–1.6	3.6	3.5	–0.8
Лесные маршруты	реанализ	–6.7	–10.0	–10.6	–9.0	–4.5	–12.1
	снегосъёмка	–5.5	–7.6	–6.7	–5.5	–2.1	–5.7

В период с декабря по февраль по данным реанализа выделяются три области с существенным уменьшением ВЭС — предгорья Урала, юг края и Верхнекамская возвышенность (см. рис. 5, в–д). При этом в декабре–январе отрицательный тренд статистически значим на всей территории края, а в феврале — только в центральной и южной частях. По данным снегосъёмки в поле статистически значимое уменьшение ВЭС отмечается только в декабре, а в лесу — вплоть до февраля, и составляет 5–8 мм за 10 лет (но в относительном выражении самое сильное снижение также отмечается в декабре).

В марте, когда формируются максимальные снегозапасы, по данным реанализа статистически значимое уменьшение ВЭС на 10–12 мм/10 лет отмечается на юго-востоке края в предгорьях Урала (см. рис. 5, е), а в северной части края уменьшение ВЭС почти не происходит. Аналогичная ситуация сохраняется и в апреле (см. рис. 5, ж). По данным снегомерной съёмки, как в поле, так и в лесу в среднем по территории края в марте и апреле тренды ВЭС не значимы, что соответствует ранее опубликованным данным для Среднего Предуралья и Урала в целом (Попова и др., 2015). Таким образом, к концу зимы эффект более позднего начала снегонакопления осенью (связанный с потеплением) компенсируется увеличением количества осадков в зимние месяцы.

Если рассматривать данные за март по отдельным снегомерным маршрутам, то статистически значимое уменьшение ВЭС отмечается на метеостанциях Ныроб и Вая по данным снегосъёмки в лесу. Положительный статистически значимый тренд ВЭС в марте по данным снегосъёмки в поле выявлен на пяти метеостанциях (Кудымкар, Верещагино, Пермь, Оханск и Кунгур). В обоих случаях тренды не согласуются с данными реанализа.

В мае в равнинной части края снежный покров обычно уже отсутствует, и в абсолютных величинах тренд выражен слабо (см. рис. 5, з), а на северо-востоке отмечается статистически значимое уменьшение ВЭС до 15 мм/10 лет. Оно обусловлено более ранним началом таяния снега вследствие повышения температуры воздуха в апреле и особенно в мае (более чем на 1 °C за последние 30 лет). Снегомерные съёмки в мае проводятся эпизодически, в основном в лесу, что не позволило корректно оценить тренд.

Выявленное существенное расхождение между трендами ВЭС по данным снегосъёмки и реанализа на пяти полевых маршрутах может быть связано с изменением характеристик растительного покрова и скоростей ветра в зимний период. Так, в работе (Сосновский и др., 2018) было выявлено уменьшение коэффициента снегонакопления (отношения ВЭС в лесу к соответствующему значению

в поле) с 1.15 в 1981–1990 гг. до 1.03 в 2001–2010 гг., что авторы объясняют уменьшением скорости ветра и интенсивности метелевого переноса. В частности, число дней со средней скоростью ветра выше 10 м/с в зимний период сократилось более чем в 5 раз, что привело к уменьшению интенсивности выдувания снега с полей и к увеличению ВЭС при снегосъёмке в поле. Снижение скорости ветра и изменение условий снегонакопления может происходить и вследствие зарастания полей древесно-кустарниковой растительностью, которое распространено в Пермском крае на площади свыше 1.3 млн га (Белоусова, Брыжко, 2021). Однако данных о зарастании конкретно для перечисленных снегомерных маршрутов получить не удалось.

На всех пяти метеостанциях, где выявлено увеличение ВЭС по данным снегосъёмки в поле, по данным наблюдений отмечается статистически значимое уменьшение скорости ветра, наиболее выраженное в период с 1966 по 1995 г., когда КНЛТ достигал $-0.30... -0.55$ м/с за 10 лет. В этот же период отмечался и более выраженный положительный тренд ВЭС по данным снегосъёмки, но такое совпадение может объясняться и ростом количества зимних осадков в эти годы. Корреляции между средней скоростью ветра и максимальным значением ВЭС за соответствующий сезон (по данным снегосъёмки в поле) для всех перечисленных станций статистически не значимы.

Уменьшение ВЭС на лесных маршрутах в Ныробе и Вае, которое не согласуется с данными реанализа, может объясняться изменением условий снегонакопления (например, увеличением полноты древостоя), или переносом самих снегомерных маршрутов, но соответствующих данных по состоянию древостоя на маршрутах получить не удалось.

Особенности зимних сезонов с наибольшими и наименьшими снегозапасами по данным ERA5-Land. Наибольшие снегозапасы в марте в среднем по территории края по данным ERA5-Land отмечены в 1979 и 2002 гг. (288 и 266 мм соответственно), а в апреле 1979 г. осреднённое по территории значение ВЭС достигло 301 мм. В эти же годы максимумы отмечены и по данным снегосъёмки как в лесу, так и в поле (Крючков, 2021). Особенностью обоих случаев аномально снежных зим стало сочетание интенсивного снегонакопления в октябре (особенно в 1978 г., что видно на рис. 6, а) и избытка осадков в последующие месяцы холодного периода. Зима 1978/79 г. была аномально снежной на всей территории края, а 2001/22 г. — только на севере и на востоке. Особенностью 1979 г. стала также задержка снеготаяния вследствие аномально холодной погоды в апреле (на 5–6 °C холоднее нормы), что привело к формированию максимальных значений лишь к середине апреля даже в южной части края. Последующее быстрое таяние больших запасов снега в мае стало одной

из причин разрушительного весеннего половодья 1979 г. (Природные опасности..., 2004).

В среднем по территории края реанализ несколько завышает величину ВЭС в аномально снежные зимы в сравнении с данными снегосъёмок в поле. В то же время, для лесных маршрутов с наибольшими значениями ВЭС (Бисер, Чердынь, Октябрьский) по данным реанализа отмечается существенное занижение ВЭС.

Минимальные значения ВЭС в марте в среднем по территории края отмечены в 1967 и 2012 гг. (134 и 131 мм соответственно по данным ERA5-Land). Согласованность данных снегосъёмок и реанализа в аномально малоснежные зимы примерно такая же, как и в среднем за рассматриваемый период. На полевых маршрутах ВЭС в среднем завышен по данным реанализа, а на лесных близок к данным снегосъёмок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования подтверждено, что реанализ ERA5-Land удовлетворительно воспроизводит процесс снегонакопления и величину ВЭС на территории Пермского края. Сопоставление с данными снегосъёмок на 18 полевых и 17 лесных маршрутах показывает, что средняя относительная ошибка находится в пределах 15%. При этом данные реанализа лучше согласуются с данными снегомерных съёмок в лесу (средний $R = 0.83$), чем в поле (средний $R = 0.72$). Для большинства полевых маршрутов реанализ завышает величину ВЭС, для лесных маршрутов в южной части края также отмечается завышение, а в северной и в горной части — занижение ВЭС. Наиболее значительные расхождения между данными реанализа и снегосъёмок приурочены к снегомерным маршрутам, нерепрезентативным для окружающей территории (в частности, расположенным в глубоких долинах рек). На большинстве снегомерных маршрутов (особенно полевых) расхождение между данными реанализа и снегосъёмок резко возрастает в период снеготаяния. Это обусловлено наличием значительной доли лесопокрытой площади в соответствующих ячейках сетки реанализа.

Даты формирования максимумов ВЭС по данным реанализа приходятся на третью декаду марта, на севере края на первую декаду апреля, а в горной части — на вторую и даже третью декаду апреля. Это на 4–7 дней позже, чем по данным снегосъёмок в лесу, и такое расхождение можно объяснить временной дискретностью данных снегосъёмки (которые получены только на последний день декады).

По данным реанализа и снегомерных съёмок выявлен статистически значимый отрицательный тренд ВЭС на всей территории края в первой

половине холодного периода. Лучше всего этот тренд выражен в ноябре. Он обусловлен смещением дат установления снежного покрова на более поздние сроки из-за существенного потепления в октябре—ноябре. В феврале—марте тренд по данным реанализа остаётся статистически значимым только в южной части края (на юго-востоке КНЛТ в марте составляет до 12 мм/10 лет), а на севере края уменьшение ВЭС не наблюдается. По данным снегосъёмок в поле статистически значимое уменьшение ВЭС отмечается только в декабре, в лесу сохраняется вплоть до февраля, а в марте и апреле тренды не значимы. В мае выявлено уменьшение ВЭС по данным реанализа в северо-восточной части края (до 15 мм/10 лет), что обусловлено повышением температуры и более ранним началом таяния.

Сравнение с данными снегосъёмок показывает, что реанализ также хорошо воспроизводит межгодовую изменчивость снегозапасов, накопленных к марту, причём данные снегосъёмки в лесу согласуются с реанализом лучше, чем данные снегосъёмки в поле. На пяти полевых снегомерных маршрутах выявлен статистически значимый рост снегозапасов, который не подтверждается по данным реанализа. Одной из гипотез, объясняющих этот рост, может быть изменение условий снегонакопления. В частности, на всех пяти станциях отмечено статистически значимое уменьшение скорости ветра в период с ноября по март, что может способствовать уменьшению интенсивности выдувания снега с полей. На двух лесных маршрутах на севере края выявлено статистически значимое уменьшение снегозапаса, не согласующееся с данными реанализа, причины которого не выявлены. В целом отсутствие данных об изменении растительного покрова на снегомерных маршрутах (рост древесно-кустарниковой растительности на полевых маршрутах или полноты древостоя на лесных маршрутах) не позволяет сделать окончательные выводы о причинах несогласованности трендов ВЭС по данным снегосъёмки и реанализа на отдельных метеостанциях.

Таким образом, реанализ ERA5-Land может рассматриваться как важный источник данных для изучения климатических характеристик снежного покрова на территории Пермского края и других регионов России со схожими условиями снегонакопления.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 24-27-00054.

Acknowledgements. The study was funded by Russian Scientific Foundation grant No. 24-27-00054.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусова А.П., Брыжко И.В.* Анализ зарастания сельскохозяйственных угодий на территории Пермского края по спутниковым снимкам Landsat. ИнтерКарто. ИнтерГИС // Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий / Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 4. С. 150–161.
- Георгиевский М.В., Хомякова В.А., Паршина Т.В.* Оценка точности глобальных данных по влагозапасам в снежном покрове на примере бассейна р. Северная Двина // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. № 65 (3). С. 433–454.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.302>
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М.* Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
<https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
- Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
- 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. М.: Главная геофизич. обсерватория им. А.И. Воейкова, 2015. 181 с.
- 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>
- Китаев Л.М., Титкова Т.Б.* Зональные особенности изменений снегозапасов Восточно-Европейской равнины (по данным спутниковых наблюдений) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 167–178.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-167-178>
- Крючков А.Д.* Пространственно-временное распределение характеристик снежного покрова на территории Пермского края / Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Пермь: Пермский госуд. национальный исследовательский ун-т, 2021. 223 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/dissertation-nye-sovety/kryuchkov/disser.pdf>
- Крючков А.Д., Калинин Н.А., Сидоров И.А.* Качество характеристик снежного покрова, полученных на основе реанализа ERA5-Land для территории Пермского края // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 3. С. 383–396.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423030055>
- Кузьмин П.П.* Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 346 с.
- Метеорологический ежемесячник // Уральское УГМС. 1990–2020 гг. Вып. 9. Ч. 2. № 1–5. С. 10–13.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: ИВП РАН, 2018. 296 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 300 с.
- 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/10.15356/2076-6734-2015-4-73-8>
- Природные опасности России: В 6 т. Т. 5. Гидрометеорологические опасности / Под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. М.: Крук, 2004. 296 с.
- Пьянков С.В., Шихов А.Н.* Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. Пермь: Пермский гос. нац. иссл.-ун-т, 2017. 148 с.
- 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.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-183-190>
- 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.* Определение снегозапасов Западной Сибири по расчётам на модели локального теплообмена SPONSOR с использованием данных реанализа // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 343–354.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-343-354>
- Чурюлин Е.В.* Использование спутниковой и модельной информации о снежном покрове при расчётах характеристик весеннего половодья / Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Московский госуд. ун-т имени М.В. Ломоносова, 2019. 175 с.
- Brown R.D., Brasnett B.* Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1 [Data Set]. Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2010.
<https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3>

- Copernicus Climate Data Store // Электронный ресурс. <https://cds.climate.copernicus.eu/> Дата обращения: 15.07.2024.
- Integrated Forecast System Documentation – Cy45r1. Part IV: Physical Processes. ECMWF, 2018. 223 p. <https://doi.org/10.21957/4whwo8jw0>
- Kelly R.E.J., Foster J.L. Dorothy K.H. The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Status and Future Development. Poster presented at the American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, 2005.
- Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation // Hydrology and Earth system science. 2010. Vol. 14 (2). P. 339–350. <https://doi.org/10.5194/hess-14-339-2010>
- Loveland T.R., Reed B.C., Brown J.F., Ohlen D.O., Zhu Z., Young L. Merchant J.W. Development of a global land cover characteristics database and IGB6 DISCover from the 1 km AVHRR data // International Journ. of Remote Sensing. 2000. V. 21. P. 1303–1330. <https://doi.org/10.1080/014311600210191>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth System Science Data. 2021. V. 13 (9). P. 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Plyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin // Journ. of Geographical Sciences, 2018. V. 28 (2). P. 221–237. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1469-x>
- Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J., Koskinen J., Bojkov B. Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 3517–3529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>

Citation: Kalinin N.A., Kryuchkov A.D., Sidorov I.A., Abdullin R.K., Shikhov A.N. Climatic characteristics of snow water equivalent in the Perm Krai area. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (1): 50–68. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010044

Climatic characteristics of snow water equivalent in the Perm Krai area

© 2025 N.A. Kalinin, A.D. Kryuchkov, I.A. Sidorov, R.K. Abdullin, A.N. Shikhov[#]

Perm State University, Perm, Russia

[#]*e-mail: and3131@inbox.ru*

Received July 24, 2024; revised October 8, 2024; accepted December 25, 2024

In this study, we compared ERA5-Land reanalysis data on snow water equivalent (SWE) with values of SWE obtained from snow-measuring surveys on 18 field (non-forest) and 17 forest routes in the Perm Territory for 1967–2023 and analyzed the long-term trends of SWE. In general, the ERA5-Land reanalysis reproduces SWE in the Perm region satisfactorily. Mean relative error for SWE in March does not exceed 15%. The average correlation coefficient between the reanalysis data and the same from the observations is 0.72 for non-forest locations and 0.83 for locations in forest. In the southern part of the region, the reanalysis does mainly overestimate SWE by 10–40 mm, while in the north and east of the territory, there is an underestimation of the same order. The greatest divergence between snow surveys and reanalysis are found during snowmelt season, especially for non-forest snow-measuring routes. As it follows the ERA5-Land data, average date of formation of the SWE maximum in the southern part of the region is close to March 25, and in the eastern mountainous part it falls on the second decade of April, which is 4–7 days later than according to snow surveys in the forest. According to the ERA5-Land data and observations, a statistically significant negative trend of SWE was revealed all over the territory in the first half of the cold season, especially pronounced in November. It is related to the autumn warming and a shift of snow cover onset to later dates. In March, the negative trend according to the ERA5 data is statistically significant only in the southern part of the region, where it reaches –12 mm/10 years, but no statistically significant decrease in SWE is found according to the snow survey data. In May, a significant reduction of SWE in the northeast of the region (up to 15 mm/10 years) is found, which is due to the warming in April and May, and an earlier start of snowmelt. A comparison with the snow survey data shows that the reanalysis reproduces well the inter-

annual variability of SWE accumulated by March, especially in forest locations. A statistically significant increase in SWE was revealed on five snow measuring routes in field, while a statistically significant decrease – on two forest routes, which is not confirmed by the reanalysis data. These discrepancies may be related to changes in local snow accumulation conditions on snow-measuring routes.

Keywords: snow water equivalent, ERA5-Land reanalysis, snow survey data, spatial and temporal distribution, inter-annual variability, long-term trends

REFERENCES

- Belousova A.P., Bryzhko I.V. *Analiz zarastaniya sel'sko-hozyajstvennykh ugodij na territorii Permskogo kraja po sputnikovym snimkam Landsat. InterKarto. InterGIS. Geoinformacionnoe obespechenie ustojchivogo razvitiya territorij: Materialy Mezhdunar. konf. Analysis of overgrowth of agricultural lands in the Perm Territory using Landsat satellite images. The InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Materials of the International Conference. Moscow: Faculty of Geography of Moscow State University, 2021, 27 (4): 150–161.* <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-4-27-150-161> [In Russian].
- Georgievsky M.V., Khomyakova V.A., Parshina T.V. Accuracy evaluation of snow water equivalent global data: The case of the Northern Dvina River basin. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle. Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences.* 2020, 65 (3): 434–454. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.302> [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].
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovaniye teplo- i vlagoobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy. Modeling of heat and moisture exchange of the land surface with the atmosphere. Moscow: Nauka Publ., 2010: 327 p.* [In Russian].
- Kazakova E.V. *Yezhednevnaya 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 thesis. Moscow, 2015: 181 p.* [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].
- Kitaev L.M., Titkova T.B. Zonal features of changes in snow storage of East European Plain (according to satellite observations). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.* 2020, 17 (5): 167–178. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-167-178>
- Kryuchkov A.D. *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie harakteristik snezhnogo pokrova na territorii Permskogo kraja. Spatial and temporal distribution of snow cover characteristics on the territory of the Perm region. PhD thesis. Perm: Perm State National Research University, 2021: 223 p. Retrieved from: http://www.psu.ru/files/docs/science/dissertatsionnye-sovety/kryuchkov/disser.pdf* [In Russian].
- 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. <https://doi.org/10.31857/S2076673423030055> [In Russian].
- Kuzmin P.P. *Process tayaniya snezhnogo pokrova. The process of melting snow cover. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1961: 346 p.* [In Russian].
- Meteorological monthly guide. *Ural'skoe UGMS. Ural UGMS.* 1990–2020, 9, 2 (1–5): 10–13 [In Russian].
- Motovilov, Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseynov. Models of runoff formation for the challenges of river basins hydrology. Moscow: Water problem Institute of RAS, 2018: 296 p.* [In Russian].
- Nastavlenie gidrometeorologicheskim stancijam i postam. Vyp. 3. Ch. 1. Meteorologicheskie nabljudeniya na stancijah. Instruction to hydrometeorological stations and posts. V. 3. P. 1. Meteorological observations at the stations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985: 300 p.* [In Russian].
- 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. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-4-73-86> [In Russian].
- Prirodnye opasnosti Rossii: V 6 t. T. 5. Gidrometeorologicheskie opasnosti. Natural hazards of Russia: in 6 vol. Vol. 5. Hydrometeorological hazards / Ed. by G.S. Golitsyn,*

- A.A. Vasiliev. Moscow: Kruk Publisher, 2004: 296 p. [In Russian].
- Pyankov S.V., Shikhov A.N. *Geoinformacionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh processov i javlenij*. Geo-information support for modeling of hydrological processes and phenomena. Perm: Perm State University, 2017: 148 p.
- Sosnovsky A.V., Osokin N.I., Chernyakov G.A. *Dinamika snegozapasov na ravninnoj territorii Rossii v lesu i v pole pri klimaticheskikh izmenenijah*. Dynamics of snow storages in forest and field of Russian plains under climate changes. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (2): 183–190.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-183-190> [In Russian].
- Turkov D.V., Sokratov V.S. Calculation of snow cover characteristics on lowland areas with the use of the SPONSOR model of local heat and moisture exchange and reanalysis data on the example of the Moscow region. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 369–380.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380>
- Turkov D.V., Sokratov V.S., Titkova T.B. Evaluation of snow storage in Western Siberia based on the land-surface model SPONSOR simulation using reanalysis data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 343–354.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-343-354> [In Russian].
- Churyulin E.V. *Ispol'zovaniye sputnikovoy i model'noy informatsii o snezhnom pokrove pri raschetakh kharakteristik vesennego polovod'ya*. Using satellite-based and simulated snow cover information for calculating spring flood characteristics. PhD thesis. Moscow, 2019: 175 p. [In Russian].
- Brown R.D., Brasnett B. Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1 [Data Set]. Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2010.
<https://doi.org/10.5067/W9FOYWH0EQZ3>.
- Copernicus Climate Data Store. Retrieved from: <https://cds.climate.copernicus.eu/> Last access: July 15, 2024.
- Integrated Forecast System Documentation – Cy45r1. Part IV: Physical Processes. ECMWF, 2018: 223 p.
<https://doi.org/10.21957/4whwo8jw0>
- Kelly R.E.J., Foster J.L., Dorothy K.H. The AMSR-E Snow Water Equivalent Product: Status and Future Development. Poster presented at the American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, 2005.
- Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation. *Hydrology and Earth System Science*. 2010, 14 (2): 339–350.
<https://doi.org/10.5194/hess-14-339-2010>
- Loveland T.R., Reed B.C., Brown J.F., Ohlen D.O., Zhu Z., Youing L., Merchant J.W. Development of a global land cover characteristics database and IGB6 DISCover from the 1 km AVHRR data // *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 1303–1330.
<https://doi.org/10.1080/014311600210191>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Bousssetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 2021, 13 (9): 4349–4383.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28 (2): 221–237.
<https://doi.org/10.1007/s11442-018-1469-x>
- Takala M., Luojus K., Pulliainen J., Derksen C., Lemmetyinen J., Kärnä J., Koskinen J., Bojkov B. Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research through Assimilation of Space-Borne Radiometer Data and Ground-Based Measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2011, 115: 3517–3529.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.014>