

УДК 551.582

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И СНЕЖНОГО ПОКРОВА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОЛЫЖНЫХ КУОРТОРОВ РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

© 2023 г. В. В. Виноградова^{1,2,*}, Т. Б. Титкова¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*e-mail: vvvinog@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.12.2022 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Проведено исследование характеристик снежного покрова на горнолыжных курортах по данным реанализа ERA5-Land. Выполнено сравнение характеристик снежного покрова, осадков и температуры по данным реанализа и метеосети. В условиях современного климата средняя и максимальная высота снежного покрова на всех курортах достаточна для их функционирования, но на большинстве курортов наблюдается уменьшение высоты снежного покрова.

Ключевые слова: снежный покров, климатические параметры, реанализ, горнолыжный туризм, правило 100 дней, оптимальный лыжный день

DOI: 10.31857/S2076673423030134, **EDN:** PMOMPA

ВВЕДЕНИЕ

Горы покрывают около 30% суши на Земле (не считая Антарктиды) и являются одной из важных сфер деятельности человечества (IPCC, 2019). Изменение климата в горах было рассмотрено в SROCC (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate), где показано общее уменьшение снежного покрова на малых высотах, ледниках и вечной мерзлоте. Продолжительность залегания снежного покрова сократилась почти во всех регионах, в среднем на 5 дней за десятилетие. Высота и площадь снежного покрова на малых высотах также уменьшились, хотя межгодовые колебания велики. По прогнозам, снежный покров и ледники продолжат сокращаться почти во всех регионах в XXI веке независимо от сценариев изменения климата (IPCC, 2019).

Развитие горнолыжного туризма в России поддерживается на государственном уровне, но в мировом объёме индустрии горнолыжного спорта доля России составляет только 2%, хотя её потенциал оценивается достаточно высоко (Третий оценочный..., 2022). Климатические изменения не могут не затрагивать развитие зимнего горнолыжного туризма и резилиентность горнолыжных курортов к климатическим изменениям. Термин “резилиентность” в контексте климатических исследований понимается как резилиентность к изменениям климата. Под определением

резилиентности понимаются поглощающая, адаптивная и трансформирующая способности системы, каждая из которых вносит свой вклад в резилиентность к климатическим изменениям. Поскольку на развитие горнолыжных курортов влияют как климатические, так и социальные факторы, оценка их резилиентности может учитывать положительные последствия изменений климата (например, уменьшение количества дней с сильным морозом), а также рассматривать климатические риски (например, уменьшение высоты снежного покрова), что предусматривает мониторинг климатических изменений и процессов адаптации к ним (например, использование искусственного оснежения).

В горных районах южного макросклона Большого Кавказа в ближайшие десятилетия расчётное количество твёрдых осадков может уменьшиться на 25–30%, максимальная декадная высота снежного покрова к 2041–2050 гг. уменьшится на 29–35%, а количество дней со снегом — на 35–40% (Сократов и др., 2014). Эти изменения оказывают существенное влияние на функционирование горнолыжных курортов, особенно если они расположены в районах с относительно высокими температурами воздуха в зимний период или в регионах с небольшим количеством снега.

Как было показано в (Титкова, Виноградова, 2017; Титкова и др., 2017), сроки установления и

схода снежного покрова, продолжительность его залегания, а также тренды изменения этих характеристик имеют значительные региональные особенности. Наличие и продолжительность залегания снежного покрова — определяющие факторы существования и развития горнолыжных курортов. Поэтому для оценки сектора горнолыжного туризма используются различные показатели и индексы, тесно связанные с характеристиками снежного покрова. Одним из них является правило 100 дней (Witmer, 1986) надёжности естественного снега (Abegg, 1996). Это правило говорит о том, что климатическая пригодность (и экономическая целесообразность, которая также зависит от наличия и стоимости инфраструктуры, транспортной доступности, всесезонности и др.) для горнолыжных зон или курортов возможна только при наличии минимум 100 дней за сезон с толщиной снежного покрова не менее 30 см. Также используется еще один вариант правила 100 дней: “Горнолыжный курорт можно считать снежно-надёжным, если в течение 7 из 10 зим имеется достаточный снежный покров толщиной не менее 30–50 см для катания на лыжах в течение не менее 100 дней с 1 декабря по 15 апреля” (Abegg et al., 2021). Различные варианты правила 100 дней используются для горнолыжных курортов всего мира: на французских горнолыжных курортах для обеспечения прибыльности инвестиций необходимы 120 снежных дней (Barbier, 1978), в Швейцарии — 100 дней за сезон со снежным покровом достаточной толщины (Witmer, 1986), в Австралии — минимум 60–70 дней (Galloway, 1988), а в Северной Америке — не менее 100 (на Востоке) или 120 дней (на Западе) (Mieczkowski, 1990).

Помимо показателей глубины и продолжительности залегания снежного покрова, другие климатические переменные играют дополнительную роль в оценке условий катания на лыжах. Berghammer и Schmude (2014), например, назвали “оптимальным лыжным днём” (Optimal Ski Day, OSD) день без осадков с температурой воздуха от -5 до $+5^{\circ}\text{C}$, с более чем 5 часами солнечного света и скоростью ветра менее 10 м/с, в дополнение к минимальной высоте снега 30 см на склонах и белоснежным пейзажам в окрестностях. Для того, чтобы лыжный день был классифицирован как OSD, все эти шесть климатических условий должны соблюдаться одновременно для всей зоны катания.

Климатические индексы также можно использовать для характеристики горнолыжных курортов, поскольку они суммируют метеорологические переменные, такие как температура, осадки, влажность, давление и ветер, в классифицированные пространственно-временные значения, которые важны для различных физических характеристик и человека (Demiroglu et al., 2021). В частности, был предложен Модифицирован-

ный климатический индекс туризма (MCIT) (Yu et al., 2009a, 2009b) для горнолыжного курорта Аляски, который представляет собой комбинацию четырёх подиндексов: воспринимаемой температуры (измеренной в соответствии с охлаждением ветром), скорости ветра, видимости и текущей погоды (по коду Всемирной метеорологической организации). В работе (Demiroglu et al., 2021) предложен Ski Climate Index (SCI), который определяется надёжностью снега (SR) и неснежными компонентами, связанными с эстетикой и комфортом (AC), такими как солнечный свет, ветер, температура и влажность.

В работе (Abegg et al., 2021) разработан и апробирован на альпийских горнолыжных курортах перечень показателей для использования в горнолыжном туризме: снежные дни (число дней с высотой снега минимум x см); начало снежного сезона (первая дата самого продолжительного непрерывного периода с высотой снега минимум x см); конец снежного сезона (последняя дата самого продолжительного непрерывного периода с высотой снега минимум x см); ключевой период (количество дней с высотой снега минимум x см в течение экономически критического ключевого периода); возможности оснежения (количество часов с температурой по влажному термометру ниже $x^{\circ}\text{C}$).

В настоящее время всё большее количество горнолыжных зон оборудовано снежными пушками, а искусственное оснежение является важной частью эксплуатации горнолыжного курорта, однако расходы на оборудование и адаптационные меры могут увеличить цену пребывания туристов на горнолыжном курорте. В (Berard-Chenu et al., 2021) статистически показано, что оснежение стало второй статьёй инвестиций для горнолыжных курортов, независимо от их высоты или размеров. В работе (Falk, Lin, 2021) подчёркивается, что в последнее время степень зависимости между высотой снежного покрова и количеством ночёвок со временем уменьшается в связи с использованием искусственного снега. В результате снежные дни, продолжительность сезона, правило 100 дней стало можно рассчитать как для естественного, так и для искусственного снега. Однако искусственное оснежение делает более важными технические, инфраструктурные и эксплуатационные аспекты. В работе (Rixen et al., 2011) количество дней с потенциальным оснежением рассчитывается как число дней с температурой точки росы $\leq -4^{\circ}\text{C}$. При этом (Demiroglu et al., 2021) отмечают, что в районах с более высокой относительной влажностью требуются более низкие температуры и используют в качестве порогового значения температуру по влажному термометру (WBT) -7°C для правильной оценки оснежения.

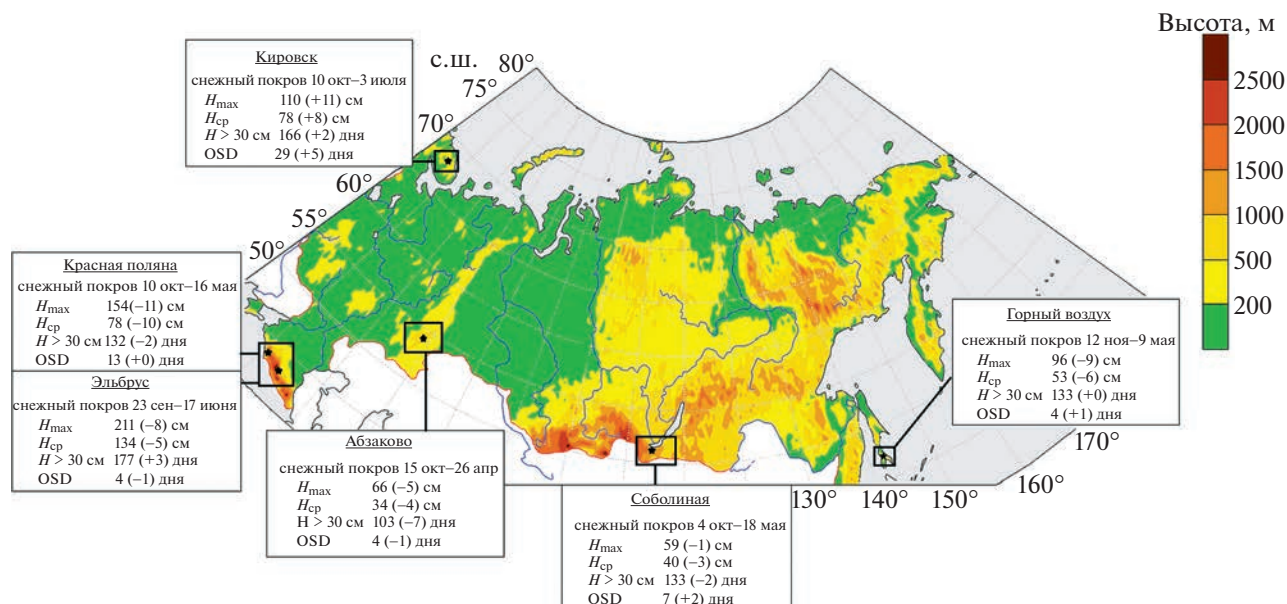


Рис. 1. Локализация и характеристики снежного покрова и их изменение между 2011–2020 и 2000–2010 гг. (в скобках) на горнолыжных курортах России на карте рельефа России: H_{max} – максимальная высота снежного покрова (см); H_{cp} – средняя высота снежного покрова (см); $H > 30$ см – число дней с высотой снега больше 30 см; OSD – оптимальный лыжный день с высотой снега не менее 30 см, без осадков, с температурой воздуха от -5 до $+5^{\circ}\text{C}$, при скорости ветра меньше 10 м/с и нижней облачности меньше 5 баллов.

Fig. 1. Localization and characteristics of snow cover and their change between 2011–2020 and 2001–2010 (in parentheses) in ski resorts of Russia on a relief map of Russia: H_{max} is the maximum height of snow cover (cm); H_{av} is an average snow depth (cm); $H > 30$ cm is the number of days with snow depth more than 30 cm; OSD is an optimal ski day with snow depth no less than 30 cm, no precipitation, air temperature from -5 to $+5^{\circ}\text{C}$, wind speed below 10 m/s and cloud cover below 5/10 points at lower cloud layer.

При оценке гидрометеорологических показателей горнолыжных курортов использовались данные реанализа ERA5-Land, которые на данный момент являются одними из лучших и широко применяются в современных исследованиях, в том числе для горных территорий и, в частности, для оценки высоты снежного покрова (Wegmann et al., 2017; Orsolini et al., 2019; Bian et al., 2020; Nouri, Nomaee, 2021). Однако при исследованиях в конкретном районе всегда есть проблема адекватности данных реанализа, который не может учесть все особенности территории, такие как высотные характеристики, особенности рельефа, ориентацию склонов, ветровой режим и т.п., поэтому для оценки адекватности данных реанализа были использованы дополнительные данные ближайших метеостанций, сайты горнолыжных курортов.

Основной целью данной работы является оценка климатических факторов функционирования горнолыжных курортов России в условиях современного климата по данным реанализа ERA5-Land и данным метеосети на основе исследования снежного покрова, комплексных климатических показателей, таких как “оптимальные лыжные дни” (OSD) и дни, подходящие для искусственного оснежения.

РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Районы исследований. В качестве регионов исследования климатических условий и состояния снежного покрова для горнолыжного туризма выбраны наиболее известные горнолыжные курорты, расположенные в разных регионах страны. Это Кавказ, Урал, Хибины, Сибирь и Дальний Восток (рис. 1). Краткая характеристика курортов приведена ниже, а основные параметры и описание инфраструктуры этих курортов приведены в табл. 1 (<https://www.ski.ru/> и сайты горнолыжных курортов).

Большинство курортов, за исключением части кавказских, находятся на средних высотах (500–1000 м над ур. моря). На этих курортах небольшая протяжённость трасс, а число подъемников в основном не превышает 10.

Горнолыжный курорт Кировска расположен на южном и северном склонах горы Айкуайвенчорр горного массива Кукуисвумчорр. Высшая точка – 1143 м над ур. моря. Склоны гор крутые, покрыты лесотундровой растительностью; вершины плоские, каменистые. Перепад высот на горнолыжном курорте составляет 665 м. Климат курорта умеренно тёплый с избыточным увлаж-

Таблица 1. Горнолыжные курорты России (характеристика и инфраструктура)

Название г/л курорта	Координаты	Длина трасс, км	Перепад, м	max H, м	Зелёные трассы, км	Синие трассы, км	Красные трассы, км	Чёрные трассы, км	Количество подъёмников*
Абзаково (Урал)	53.79–53.8 с.ш. 58.6–58.62 в.д.	15	320	819	4.2	4.5	3.8	2.5	6 б; 2 кр.
Горный воздух (Сахалин)	46.94–46.96 с.ш. 142.77–142.83 в.д.	30.6	495	601	5.7		19.9	5.0	2 к; 2 б; 3 кр.
Кировск (Мурманская область)	67.59–67.61 с.ш. 33.69–33.71 в.д.	29.5	665	1047	0.1	12.3	8.7	8.4	1 к; 6 б; 1 к.
Соболиная (Иркутская область)	51.49–51.51 с.ш. 104.1–104.12 в.д.	14.7	475	1004	0.2	2.8	2.2	8.9	4 б; 1 кр.
Кавказ									
Красная Поляна, включая Роза Хутор, Газпром ГТЦ	43.62–43.71 с.ш. 40.23–40.35 в.д.	168	1949	2509	27.7	53.9	51.7	25.6	18 к; 13 б; 25 кр.
Домбай	43.28–43.30 с.ш. 41.65–41.68 в.д.	25	1538	3168	5	6	8	6	2 к; 6 б; 6 кр.
Приэльбрусье: Эльбрус	43.27–43.31 с.ш. 42.45–42.46 в.д.	32.4	1497	3847	0.3	10.5	17.6	4	5 к; 2 б; 3 кр.
Чегет	43.23–43.24 с.ш. 42.49–42.52 в.д.								
Архыз	43.54–43.56 с.ш. 41.21–41.24 в.д.	28.3	1363	3014	7.8	10.3	6.4	3.8	3 к; 5 кр.

*Подъёмники: б. — бугельные; кр. — кресельные; к. — кабинки.

нением и относится к умеренному климатическому поясу с влиянием атлантических и арктических воздушных масс (Национальный..., 2007).

Трассы горнолыжного курорта Абзаково находятся в лесном массиве Южного Урала. Максимальная высота курорта 819 м определяется крайней северной вершиной хребта Крыктытау Южного Урала, перепад высот до 320 м. Климат курорта континентальный, умеренно-тёплый с атлантическим влиянием и достаточным увлажнением (Национальный..., 2007).

Зона катания Соболиная расположена на южном берегу озера Байкал, на северном склоне хребта Хамар-Дабан, перепад высот здесь составляет 475 м. Территория этой зоны катания представлена горно-таёжными ландшафтами. Климат курорта умеренный, резкоконтинентальный, но отепляющее влияние Байкала создаёт особые условия с более тёплой зимой, достаточным количеством снега и долгим снежным сезоном.

Горнолыжный курорт “Горный воздух” находится на склонах Сусунайского хребта на окраине города Южно-Сахалинск. Максимальная высота 601 м над ур. моря. На склонах Сусунайского хребта распространена таёжная растительность. Климат умеренный, муссонного типа, умеренно-тёплый и влажный (Национальный..., 2007).

Большинство кавказских курортов можно отнести к высокогорным, расположенным выше 1500 м над ур. моря (см. рис. 1). Курорты находятся на западном и центральном Кавказе, и на северном макросклоне Главного Кавказского хребта (кроме Красной Поляны). Курорты Красной Поляны расположены на высотах от 650 до 2509 м над ур. моря в 15 км от Главного Кавказского хребта. Курорт окружён высокими горными хребтами и занимает обширную террасу, окружённую лесами. Горнолыжная зона Архыз находится в предгорьях Главного Кавказского хребта. Склоны окружающих хребтов в большинстве случаев очень круты, изрезаны поперечными скалистыми ущельями, балками и водопадами. Район Домбая отличается типичным альпийским рельефом с большим диапазоном высот. Основные типы ландшафтов – горнолесные, горно-луговые и нивальные. Курорты Приэльбрусья расположены на отрогах Главного Кавказского хребта и склонах Эльбруса. Рельеф относится к альпийскому типу, отличающемуся изрезанностью, большими перепадами высот и мощным современным оледенением. Условия горного климата Кавказа характеризуются понижением температуры с высотой и уменьшением количества осадков при удалении от Чёрного моря. Для этих курортов характерна наибольшая протяжённость трасс и большое количество подъёмников (см. табл. 1).

Материалы. Исследование динамики снежного покрова, “оптимальных лыжных дней” (OSD)

и условий для искусственного оснежения на горнолыжных курортах производилось на основании данных реанализа. Были использованы данные наиболее современного реанализа с высоким разрешением ERA5-Land (Copernicus...), а также данные метеорологической сети из архива ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.meteo.ru>) и архива NOAA (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod>). Реанализ ERA5-Land – пятое поколение реанализа глобальных атмосферных наблюдений и предоставляет непрерывные ряды данных с высоким пространственным разрешением $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Данные реанализа при оценке снежного покрова используются во многих работах и, в частности, для горных регионов (Orsolini et al., 2019; Bian et al., 2020; Nouri, Номее, 2021). Эти данные приводятся на высоте местности с шагом приблизительно 9×9 км, поэтому не все микроклиматические особенности могут быть учтены при таком разрешении данных. Но, к сожалению, более надёжных данных реанализа с высоким разрешением нет.

Для комплексной оценки горнолыжных курортов использовались следующие характеристики из архива ERA5-Land: температура воздуха на высоте 2 м, *u*-составляющая горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м, температура точки росы на 2 м, глубина снега в м, балл нижней облачности.

Методы. Проведено сравнение данных реанализа ERA5-Land и станционных данных для среднемесячной температуры воздуха на высоте 2 м и высоты снежного покрова за 2000–2021 гг. в районах рассматриваемых горнолыжных курортов. Сравнение параметров проводилось для узла реанализа ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$), ближайшего к метеостанции (табл. 2, рис. 2). Верификация данных значительно затруднена в горной местности. Необходимо учитывать, что метеостанция и узел реанализа иногда находятся на разной высоте, что может увеличивать ошибку при сравнении, а также то, что в случае реанализа приводится единое значение для всего узла сетки, что не позволяет учитывать особенности микрорельефа.

Рассчитывалась корреляция станционных данных с данными реанализа за период 2000–2021 гг. для среднемесячных и среднегодовых значений. Оценивалась погрешность реанализа в процентах, выраженная отношением ошибки измерения к действительному значению измеряемой величины. Расчёт ошибки в процентах производился по формуле:

$$\delta = (X_r - X_c) / X_c \times 100\%,$$

где X_r – значение реанализа ERA5-Land; X_c – значение по станционным данным.

Рассмотрена ошибка линейных трендов параметров. Для этого помесечно были рассчитаны

Таблица 2. Координаты метеостанций и точек реанализа, используемых для верификации данных

Станция	Широта м/с	Широта ERA5-Land	Долгота, м/с	Долгота, ERA5-Land	Высота, м/с. м	Высота, ERA5-Land, м
Мончегорск	67.93	67.9	32.9	32.9	128	293
Красная поляна	43.68	43.7	40.20	40.2	566	1073
Чегет	43.23	43.2	42.51	42.5	3040	4018
Терскол	43.25	43.3	42.50	42.5	2144	3298
Верхнеуральск	53.88	53.9	59.2	59.2	403	415
Хамар-Дабан	51.5	51.5	103.6	103.6	1442	1302
Байкальск	51.51	51.5	104.15	104.2	460	578
Южно-Сахалинск	46.95	46.9	142.72	142.7	24	380

Таблица 3. Годовые значения корреляции, ошибки значений и трендов температуры (T) и максимальной высоты снега (H_{\max}) в % реанализа ERA5-Land относительно данных наблюдений за 2000–2021 гг.

Мончегорск	Красная Поляна	Чегет	Терскол	Верхне-Уральск	Хамар-Дабан	Байкальск	Южно-Сахалинск
Корреляция, T/H_{\max}							
0.96/0.77	0.96/0.61	0.98/0.64	0.84/0.7	0.98/0.94	0.93/0.93	0.95/–	0.80/0.68
Ошибка значений, T/H_{\max}							
–8/21	–20/33	–17/11	–13/35	11/–32	8/18	–19/–	13/–10
Ошибка тренда, T/H_{\max}							
–5/–8	–5/15	–1/13	–13/–7	14/–8	–14/–6	–9/	–1/–10

тренды температуры и максимальной высоты снежного покрова за период 2000–2021 гг. по данным наблюдений и реанализа ERA5-Land в рассматриваемых точках. Построены зависимости высоты снежного покрова по стационарным данным и данным реанализа ERA5-Land и регрессионные прямые в районах горнолыжных курортов России за период 2000–2021 гг. (см. рис. 2).

По данным реанализа проведена оценка состояния снежного покрова (высоты, числа дней с высотой снега более 30 см, дат установления и разрушения) в районах горнолыжных курортов. Рассматривалась средняя и средняя из максимальной высоты снежного покрова за зимний период. Также для каждого курорта оценивалось количество “оптимальных лыжных дней” (OSD) и дней, подходящих для искусственного оснежения. Оптимальным лыжным днём считался день с высотой снега не менее 30 см, для которого соблюдались следующие условия: день без осадков с температурой воздуха от -5 до $+5^{\circ}\text{C}$, при этом скорость ветра должна быть меньше 10 м/с, а нижняя облачность меньше 5 баллов. Днём, подходящим для искусственного оснежения, считался день с температурой точки росы ниже -5°C . Эти параметры оценивались для периодов 2000–2021, 2000–2010 и 2011–2021 гг. Также рассматривались их тренды за 2000–2021 гг. Значимость ли-

нейных трендов оценивалась по уравнению регрессии с оценкой статистической значимости 95% по критерию Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Сравнение данных реанализа ERA5-Land и стационарных данных в горных районах. Проведена оценка корреляции значений реанализа ERA5-Land и данных метеосети в районах горнолыжных курортов России. Для всех рассматриваемых зон катания данные ERA5-Land для температуры и высоты снежного покрова хорошо синхронизированы с данными наблюдений. Высокая корреляция отмечается для температуры воздуха. Во всех регионах она около 0.9 вне зависимости от месяца. Для высоты снежного покрова корреляция значима и составляет 0.6–0.9 (табл. 3). Построенные зависимости высоты снежного покрова по стационарным данным и данным реанализа также показывают хорошее сходство значений двух массивов и позволяют оценить систематическую ошибку (см. рис. 2).

Оценка ошибки годовых значений реанализа ERA5-Land показывает, что реанализ достаточно хорошо воспроизводит температуру воздуха в горных районах. Ошибка значений для температуры воздуха по модулю не превышает 20%.

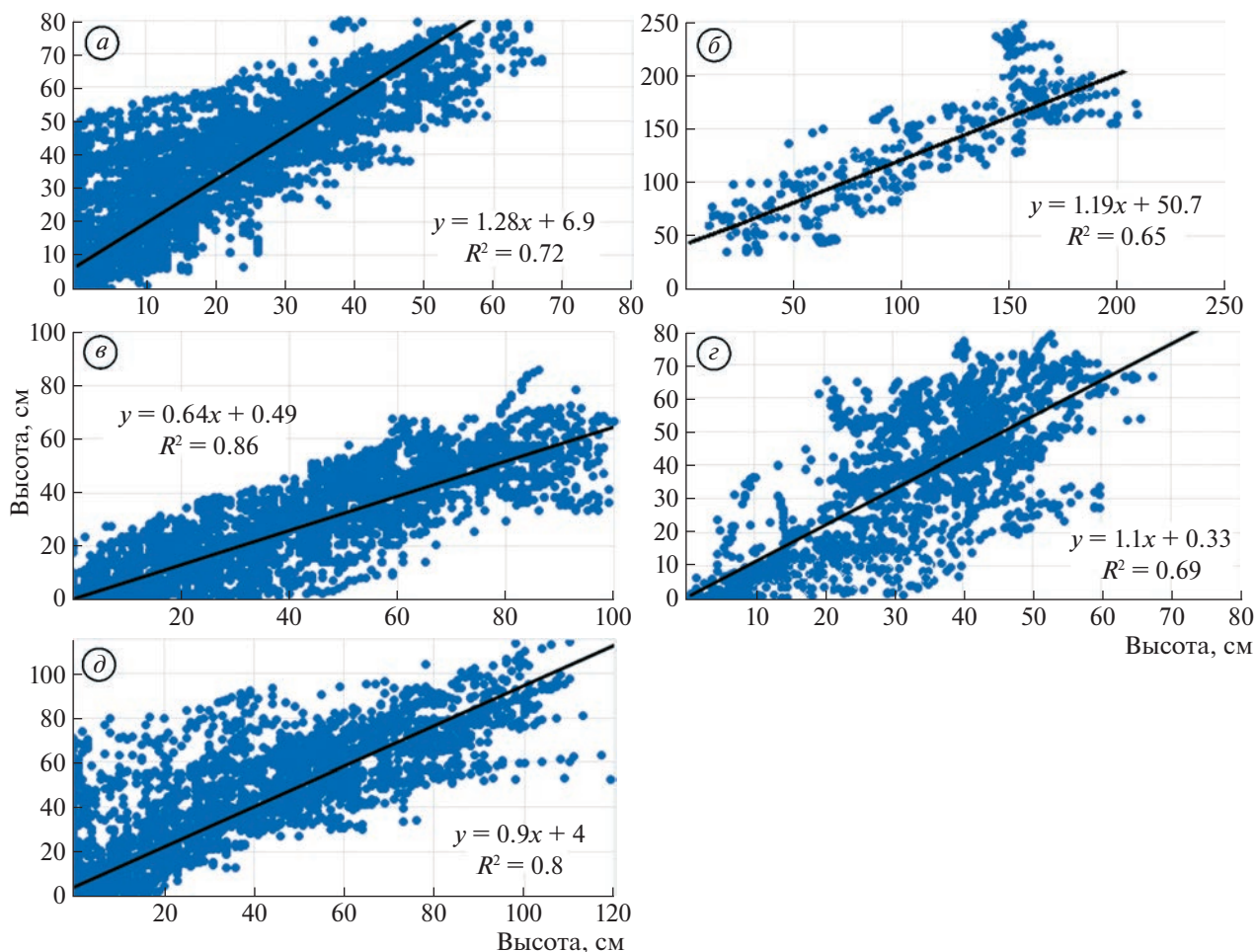


Рис. 2. Зависимость средней высоты снежного покрова по стационарным данным (по горизонтали) и ERA5-Land (по вертикали) в районах горнолыжных курортов России за период 2000–2021 гг.: (а) Мончегорск (Хибины); (б) Чегет (Кавказ); (в) Верхнеуральск (Абзаково, Южный Урал); (г) Хамар-Дабан (Соболиная, Южный Байкал); (д) Горный воздух (Южно-Сахалинск).

Fig. 2. Mean snow cover height according to station data (horizontally) and ERA5-Land (vertically) in the areas of Russian ski resorts for the period of 2000–2021: (a) Monchegorsk (the Khibiny); (б) Cheget (the Caucasus); (в) Verkhneursk (Abzakovo, the Southern Urals); (г) Khamar-Daban (Sobolinaya, the Southern Baikal); (д) Mountain air (Yuzhno-Sakhalinsk).

Ошибка значений максимальной высоты снежного покрова в районе метеостанций изменяется от 10 до 35% как в положительную, так и в отрицательную сторону. В работе анализируются тенденции и изменения всех рассматриваемых параметров, что позволяет минимизировать ошибку исходных данных и получить достоверные результаты с минимальной долей ошибки. Ошибка трендов температуры воздуха и максимальной высоты снежного покрова невелика и по модулю не превышает 19%.

Таким образом, использование значений температуры воздуха по данным реанализа в полной мере допустимо. Использование высоты снежного покрова ERA5-Land требует некоторой осторожности из-за довольно высокой ошибки, связанной с шагом реанализа, который не позволяет

полностью учесть особенности рельефа в горной местности. Оценка трендов температуры воздуха и высоты снежного покрова реанализа ERA5-Land показывает удовлетворительное соответствие с ближайшими метеостанциями (см. рис. 2), и их оценка по реанализу возможна с некоторой долей неопределённости, в зависимости от района исследования.

Снежный покров в районах горнолыжных курортов. Высота снежного покрова и продолжительность его залегания — главный фактор функционирования горнолыжных курортов. На всех горнолыжных курортах средняя высота снежного покрова увеличивается от более низких участков склонов к более высоким (рис. 3). Для курортов, расположенных на небольших высотах (до 1200 м), средняя высота снега по данным реанализа не

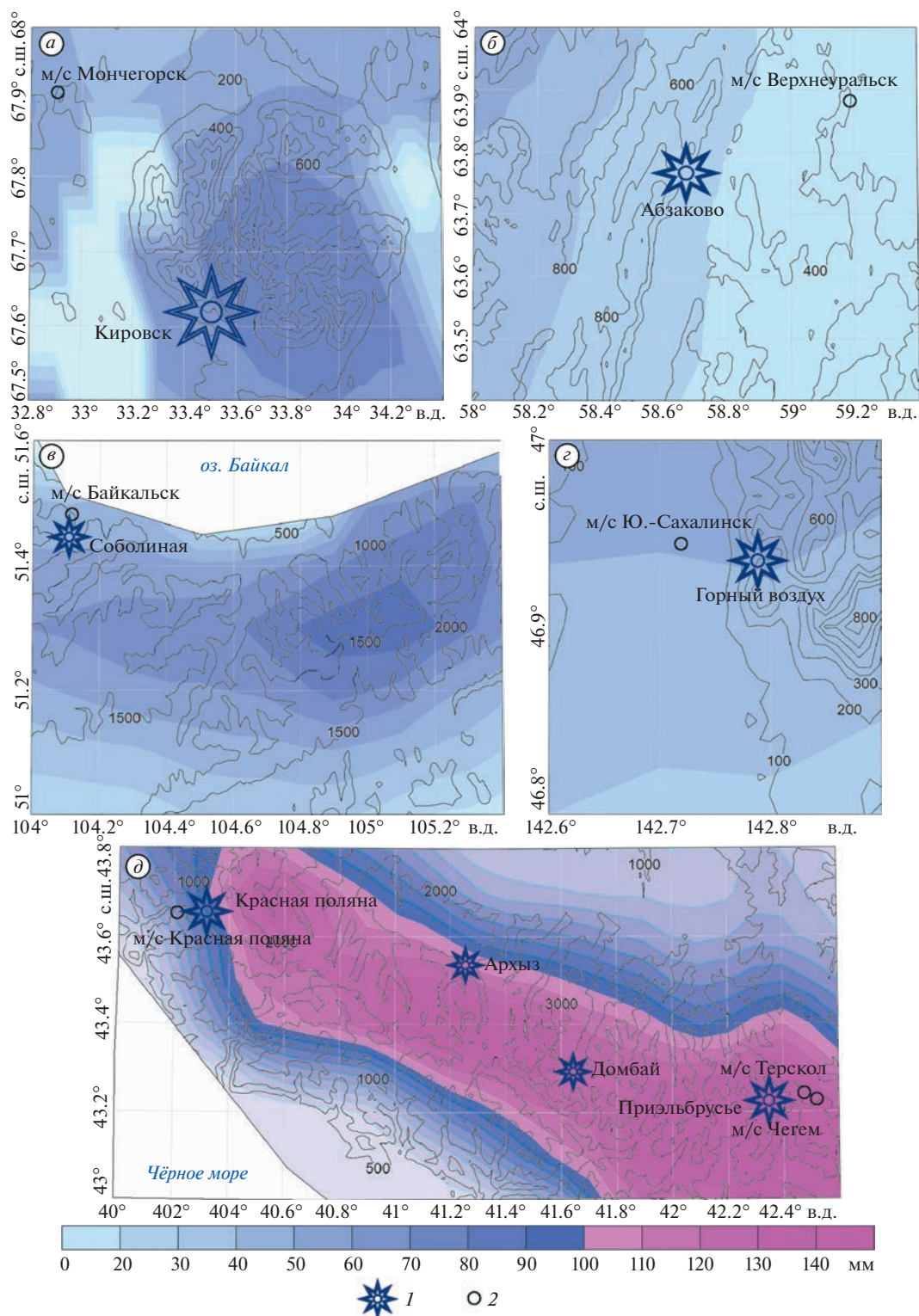


Рис. 3. Средняя за период 2000–2021 гг. высота снежного покрова на горнолыжных курортах России: (а) Кировск (Хибины); (б) Абзаково (Южный Урал); (в) Соболиная (Иркутская область); (з) Горный воздух (Южно-Сахалинск); (д) Красная поляна, Архыз, Домбай, Приэльбрусье (Кавказ). Изолиниями показана высота местности над ур. моря. 1 – локализация горнолыжного курорта; 2 – метеостанция.

Fig. 3. Average height of snow cover for the period of 2000–2021 at mountain ski resorts of Russia: (а) Kirovsk (the Khibiny); (б) Abzakovo (the Southern Ural); (в) Sobolinaya (Irkutsk Region); (з) Mountain air (Yuzhno-Sakhalinsk); (д) Krasnaya Polyana, Arkhyz, Dombai, Elbrus region (the Caucasus). Contours show terrain elevation above sea level. 1 – localization of ski resorts; 2 – meteorological station.

Таблица 4. Тренды (тренд/10 лет) характеристик снежного покрова в зимний период (2000/2001–2020/2021 гг.) по данным реанализа ERA5–Land на горнолыжных курортах России

Название г/л курорта	Средняя высота квадрата, м	H_{\max} , см (среднее за период)/ $H_{\text{среднее}}$, см/число дней (с $H > = 30$ см)			Дата установления снежного покрова/Дата разрушения снежного покрова			Число “оптимальных лыжных дней” (OSD = 5)			Число дней с температурой точки росы ниже -5°C		
		2000–2010	2011–2020	тренд 2000–2020	2000–2010	2011–2020	тренд 2000–2020	2000–2010	2011–2020	тренд 2000–2020	2000–2010	2011–2020	тренд 2000–2020
Абзаково	669	69/37/99	66/37/103	-4.6/-4.2/-6.8	287/119	288/116	2.8/-3.4	4	4	-1.1	140	143	2.6
Горный воздух	403	108/59/129	96/53/133	-9.4/-5.6/0.3	313/130	316/129	4.1/-1.8	3	4	1.1	156	154	-1.4
Кировск	604	103/71/163	110/78/166	10.7/8.4/1.8	264/139	283/154	13.9/21.4	25	29	4.9	145	140	-6.1
Соболиная	914	56/41/134	59/40/133	-0.6/-2.5/-2	272/137	277/138	-0.3/0.1	6	7	1.7	113	108	-6.6
Красная Поляна, Роза Хутор, Газпром	1565	179/99/137	154/86/132	-17.5/-9.9/-3.9	301/143	304/136	3.5/-4.8	11	13	0.2	4	4	-1.1
Домбай	2175	235/143/167	201/118/158	-13.9/-9.4/-1.4	287/169	288/158	2.9/-6.2	12	13	1.2	35	28	-6
Эльбрус	3523	232/149/174	211/134/177	-7.5/-5/3.2	249/173	266/168	14.3/-6.9	5	4	-0.5	102	100	-3.6
Чегет	3298	236/152/173	212/135/177	-7.5/-5.7/3.1	250/173	274/167	20.5/-2.5	8	8	0.4	75	69	-6.1
Архыз	2273	215/126/162	181/105/152	-14.9/-6.7/-0.8	289/155	289/153	2.6/-5.1	10	13	2.7	21	19	-4.5

Полужирным шрифтом выделены значимые изменения с вероятностью 0.95.

превышает 90 см. Минимальные значения (около 37 см) отмечаются на Южном Урале (Абзаково), что немного превышает минимальную глубину снега, необходимую для функционирования горнолыжного курорта. Максимальные значения (около 80 см) характерны для Кировска (табл. 4, см. рис. 3). Средняя максимальная высота снежного покрова на Сахалине (курорт “Горный воздух”) и в Кировске — около 100 см. Эти оценки могут быть несколько занижены, вследствие систематической ошибки реанализа (см. табл. 3 и рис. 2).

Большинство горнолыжных курортов Северного Кавказа расположено в высокогорье, где средняя высота снежного покрова превышает 100 см, увеличиваясь с высотой в зонах катания (см. рис. 3). По реанализу максимальные значения 130–150 см отмечаются в Приэльбрусье и Домбае. Средняя максимальная высота снежного покрова на этих курортах может превышать 200 см, за исключением Красной Поляны, где она достигала 180 см (см. табл. 4). При этом надо учитывать, что данные реанализа могут занижать высоту снежного покрова, в частности из-за шага осреднения и недоучёта микроклиматических особенностей.

Практически на всех рассматриваемых горнолыжных курортах наблюдается уменьшение как максимальной, так и средней высоты снежного покрова. Значимые отрицательные тренды отмечаются на всех курортах (при некотором занижении оценок реанализа), за исключением Кировска, где наблюдаются значимые положительные тренды средней (8 см/10 лет) и средней максимальной (11 см/10 лет) высоты снежного покрова, связанные с увеличением годовых и зимних осадков в этом районе (Доклад..., 2022). Наибольшие значимые отрицательные тренды высоты снежного покрова наблюдаются на Кавказе, особенно в районе Красной поляны. С увеличением высоты горнолыжного курорта отрицательные тренды высоты снежного покрова по модулю уменьшаются (см. табл. 4).

Считается, что климатическая пригодность горнолыжных курортов возможна только при наличии минимум 100 дней за сезон с толщиной снежного покрова не менее 30 см (Witmer, 1986). Поэтому была проведена оценка горнолыжных курортов с точки зрения выполнения этого правила. Можно говорить о том, что для всех курортов, расположенных в разных регионах России, правило 100 дней выполняется. Но фактическое количество дней с высотой снега более 30 см может быть выше из-за занижения высоты снежного покрова реанализом. Число дней с толщиной снежного покрова 30 см и более значительно превышает 100 дней, за исключением курорта Абзаково, где эта величина составляет около 100 дней

и уменьшается. Значимый отрицательный тренд составляет 7 дней/10 лет.

Остальные горнолыжные курорты можно разделить на две категории. На высокогорных курортах Северного Кавказа число дней с толщиной снежного покрова 30 см составляет 160–175 дней, т.е. более 5 месяцев. Наибольшие значения — более 175 дней (т.е. почти 6 месяцев) — наблюдаются в Приэльбрусье, и число таких дней продолжает увеличиваться, значимый тренд составляет около 3 дней/10 лет. На других кавказских курортах тренды отрицательные, и их абсолютные значения увеличиваются с уменьшением высоты курорта. Сравнимые значения продолжительности сезона с высотой снежного покрова не менее 30 см — 160 дней и более — отмечаются в Кировске. Там число таких дней немного увеличивается. В этих сравнительно низко расположенных зонах катания значительная продолжительность лыжного сезона достигается за счёт их географического положения, обеспечивающего длительный холодный сезон и большое количество зимних осадков. На курортах “Горный воздух” (Сахалин), Соболиная (Иркутская область) и Красная Поляна наблюдается порядка 130 дней с толщиной снежного покрова 30 см (см. табл. 4).

Среднепогодные даты установления и разрушения снежного покрова также являются важной характеристикой горнолыжных курортов. Осенью формирование снежного покрова начинается на самых высокогорных курортах Кавказа (Приэльбрусье), где снег выпадает в сентябре. В конце сентября снег появляется на горнолыжных курортах Иркутской, Мурманской областей (Соболиная, Кировск). Во второй декаде октября снег выпадает на южном Урале (Абзаково), в Домбае и Архызе. Из-за более низкого расположения на курортах Красной Поляны снежный покров начинает формироваться в третьей декаде октября, а на курорте “Горный воздух” (Сахалин) — в первой декаде ноября. Но практически на всех курортах в начале XXI века отмечается сдвиг даты установления снежного покрова на более поздние сроки (тренды значимы). Исключение составляют зона катания в Иркутской области, но здесь тренды не значимы. Максимальные положительные тренды наблюдаются в Приэльбрусье и Кировске — 14–20 дней/10 лет (см. табл. 4).

Наиболее раннее разрушение снежного покрова происходит в Абзаково — в конце апреля. На большинстве рассматриваемых курортов разрушение снежного покрова происходит в течение мая, а на высокогорных курортах Кавказа — в середине июня (см. табл. 4). Даты разрушения снежного покрова сдвигаются на более ранние сроки, тренды значимы и отрицательны. Исключение составляют Кировск, где разрушение снежного покрова сдвигается на более поздние сроки

и тренд составляет 21 день/10 лет, а также Соболиная, где небольшие положительные тренды не значимы. Таким образом, можно говорить, что на большинстве горнолыжных курортов, за исключением Кировска, число дней со снежным покровом сокращается.

Возможность искусственного оснежения.

Уменьшение высоты снежного покрова и сдвиг даты его установления на более поздние сроки на невысоко расположенных горнолыжных курортах приводит к необходимости использования снежных пушек для увеличения продолжительности горнолыжного сезона и повышения рентабельности курортов. Как показано в (Abegg et al., 2021) использование искусственного снега помогает справиться с таким “неконтролируемым” фактором, как естественный снегопад. В настоящей работе в качестве условий, необходимых для искусственного оснежения, мы используем температуру точки росы $\leq -5^{\circ}\text{C}$. На большинстве курортов, кроме Кавказа, число дней с температурой точки росы ниже -5°C составляет 140–150 дней, что создаёт благоприятные условия для использования снежных пушек при недостатке естественного снега. Но на большинстве этих курортов, кроме Кировска, отмечаются значимые отрицательные тренды таких дней (см. табл. 4). Вследствие самого южного расположения на кавказских горнолыжных курортах число дней, благоприятных для искусственного оснежения меньше, а при современном потеплении число таких дней везде уменьшается, тренды значимы и отрицательны. Это ухудшает условия катания, особенно для довольно низко расположенного курорта Красная Поляна, где также отмечаются отрицательные тренды высоты снежного покрова и числа дней с высотой снега более 30 см. Но на этих курортах ночные значения температуры точки росы могут быть ниже среднесуточных, которые использовались в этом исследовании, и это удлиняет период возможного искусственного оснежения.

“Оптимальные лыжные дни” (OSD). Для оценки условий катания на лыжах помимо снежного покрова используется комплексный климатический показатель, называемый “оптимальным лыжным днём” (Optimal Ski Day, OSD) (Berghammer, Schmude, 2014). На большинстве курортов число “оптимальных лыжных дней” не превышает 10. Возможно, это связано с низкими зимними температурами на сибирских и высокогорных курортах и облачностью и осадками на курортах, расположенных недалеко от морского побережья. Наибольшее количество OSD отмечается в Кировске (около 30 дней), что скорее всего связано с весенним катанием при большом количестве снега и не очень низких температурах. Но в условиях современного потепления на большинстве курортов, за исключением Абзаково, отмечаются

значимые положительные тренды OSD, т.е. число “оптимальных лыжных дней” увеличивается (см. табл. 4). Как показало наше исследование, большинство горнолыжных курортов России нельзя считать благоприятными по этому показателю. Скорее всего это связано с тем, что для российских горнолыжных курортов необходима корректировка показателя OSD, полученного для европейских курортов, большинство из которых расположено южнее, где в среднем наблюдаются более высокие температуры воздуха и больше солнечных дней. Возможно, для российских курортов надо понизить температурный порог, что может быть предметом дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ показал, что данные реанализа ERA5-Land для температуры и высоты снежного покрова достаточно хорошо синхронизированы с данными метеорологических наблюдений. Массив данных реанализа ERA5-Land хорошо воспроизводит температуру воздуха в горных районах, а ошибка воспроизведения максимальной высоты снежного покрова может достигать 35%. Максимальные ошибки высоты снежного покрова отмечаются на горнолыжных курортах Красная Поляна, Терскол (Кавказ) и Абзаково (Южный Урал), а наименьшие ошибки – на курорте “Горный воздух” (Южно-Сахалинск). Поэтому надо учитывать, что данные реанализа могут отображать фактическую высоту снежного покрова с ошибкой. По данным реанализа ERA5-Land, оценки трендов температуры воздуха показывают хорошее соответствие результатов, а высоты снежного покрова – удовлетворительное. Поэтому оценка трендов снежного покрова в районах горнолыжных курортов России по реанализу ERA5-Land возможна с учётом выявленной неопределённости.

В условиях современного климата высота снежного покрова достаточна для функционирования горнолыжных курортов России, выполняется правило 100 дней, т.е. за сезон наблюдается минимум 100 дней с толщиной снежного покрова не менее 30 см. Но в 2000–2021 гг. на большинстве курортов отмечалось уменьшение как максимальной, так и средней высоты снежного покрова. Значимые отрицательные тренды характерны для всех курортов, за исключением Кировска. На большинстве курортов отмечается сдвиг даты установления снежного покрова на более поздние сроки, а его разрушения – на более ранние. Уменьшение высоты снежного покрова и сдвиг даты его установления на более поздние сроки приводят к необходимости использования искусственного оснежения для увеличения продолжительности горнолыжного сезона и повышения

рентабельности курортов. На большинстве курортов, кроме Кавказа, число дней, подходящих для использования снежных пушек, довольно велико, но отмечается тенденция уменьшения числа таких дней.

Количество “оптимальных лыжных дней” на большинстве горнолыжных курортов России невелико. Наибольшее число таких дней отмечается в Кировске. Но в условиях современного потепления повышение резидентности большинства курортов возможно за счёт роста количества “оптимальных лыжных дней”. Возможно, для российских горнолыжных курортов необходима корректировка показателя “оптимальный лыжный день”, полученного для европейских курортов, из-за более холодных климатических условий.

Проведённое исследование показывает, что с точки зрения снежной и погодной ситуации наиболее благоприятные условия складываются на горнолыжных курортах Кировска и на высокогорных курортах Северного Кавказа. Здесь высота снежного покрова, длительность его залегания и наличие значительного количества “оптимальных лыжных дней” повышают устойчивость этих горнолыжных курортов и создают условия для их дальнейшего развития. Наиболее сложные условия с точки зрения снежности при современном потеплении складываются на курортах Абзаково и Красная Поляна, но пока ещё существует возможность повышения резидентности этих курортов за счёт искусственного оснежения.

Благодарности. Статья подготовлена в рамках гранта, предоставленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (№ соглашения о предоставлении гранта: 075-15-2022-325).

Acknowledgment. The article was prepared in the framework of a research grant funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant ID: 075-15-2022-325).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архив ВНИИГМИ-МЦД // Электронный ресурс. www.meteo.ru (Дата обращения: 30.09.2022)
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет. 2022. 110 с.
- Национальный атлас России. 2007. Т. 2. С. 146–150. <https://www.xn--80aaaa1bhnclcc1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/146-150/146-150.html>
- Сократов С.А., Селиверстов Ю.Г., Шныпарков А.Л. Оценка экономического риска горнолыжных курортов в связи с изменением продолжительности снежного сезона // Лёд и Снег. 2014. № 3. № 127. С. 100–106.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI века по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–33.
- Титкова Т.Б., Кутаев Л.М., Виноградова В.В. Коротко-периодная изменчивость сроков залегания снежного покрова по данным MODIS на севере Евразии в условиях современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 223–238.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. Росгидромет. СПб.: Научно-технические технологии, 2022. 676 с.
- Abegg B. Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. vdf Verlag, Zürich. 1996. 240 p.
- Abegg B., Morin S., Demiroglu O.C., François H., Rothleitner M., Strasser U. Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism // Intern. Journ. of Biometeorology. 2021. V. 65. P. 691–701. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01867-3>
- Barbier B. Ski et stations de sports d’hiver dans le monde. In: Sinnhuber K., Jülg F. (eds). Beiträge zur Fremdenverkehrsgeographie I. Wiener Geographische Schriften 51/52, Vienna, 1978. P. 130–146.
- Berghammer A., Schmude J. The Christmas–Easter shift: simulating Alpine ski resorts’ future development under climate change conditions using the parameter ‘Optimal Ski Day’ // Tour Econ. 2014. V. 20. № 2. P. 323–336. <https://doi.org/10.5367/te.2013.0272>
- Berard-Chenu L., Cognard J., François H., Morin S., George E. Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts? // Intern. Journ. of Biometeorology. 2021. V. 65. P. 659–675. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01933-w>
- Bian Q., Xu Z., Zheng H., Li K., Liang J., Fei W., Shi C., Zhang S., Yang Z.-L. Multiscale changes in snow over the Tibetan Plateau during 1980–2018 represented by reanalysis data sets and satellite observations // Journ. of Geophys. Research. Atmosphere. 2020. 125, e2019JD031914. <https://doi.org/10.1029/2019JD031914>
- Copernicus Publications // Электронный ресурс. <https://publications.copernicus.org> (Дата обращения: 30.09.2022)
- Demiroglu O.C., Turp M.T., Kurnaz M.L., Abegg B. The Ski Climate Index (SCI): fuzzification and a regional climate modeling application for Turkey // Intern. Journ. of Biometeorology. 2021. V. 65. P. 763–777. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01991-0>
- Falk M., Lin X. Time-varying impact of snow depth on tourism in selected regions // Intern. Journ. of Biometeorology. 2021. V. 65. P. 645–657. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01848-1>
- Galloway R.W. The potential impact of climate changes on Australian ski fields. In: Pearman GI (ed) Greenhouse: planning for climate change. CSIRO, Melbourne. 1988. P. 428–437.
- ski.ru // Электронный ресурс. <https://www.ski.ru> (Дата обращения: октябрь 2022)

- IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2019. 755 p.
<https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- Mieczkowski Z. World trends in tourism and recreation. Peter Lang Publishing, New York. 1990.
- Nouri M., Homae M. Spatiotemporal changes of snow metrics in mountainous data-scarce areas using reanalyses // *Journ. of Hydrology*. 2021. V. 603, № A, 126858.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126858>
- Orsolini Y., Wegmann M., Dutra E., Liu B., Balsamo G., Yang K., de Rosnay P., Zhu C., Wang W., Senan R., and Arduini G. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations // *Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 2221–2239.
<https://doi.org/10.5194/tc-13-2221-2019>
- Rixen C., Teich M., Lardelli C., Gallati D., Pohl M., Pütz M., Bebi P. Winter tourism and climate change in the Alps: an assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential // *Mt Res Dev*. 2011. V. 31. № 3. P. 229–236.
<https://doi.org/10.1659/MRDJOURNAL-D-10-00112.1>
- Wegmann M., Orsolini Y., Dutra E., Bulygina O., Sterin A., Brönnimann S. Eurasian snow depth in long-term climate reanalyses // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. P. 923–935.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-923-2017>
- Witmer U. Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz // *Geographica Bernensia* G25, Bern. 1986.
- Yu G., Schwartz Z., Walsh J.E. Effects of climate change on the seasonality of weather for tourism in Alaska // *Arctic*. 2009a. V. 62. P. 371–504.
<https://doi.org/10.14430/arctic175>
- Yu G., Schwartz Z., Walsh J.E. A weather-resolving index for assessing the impact of climate change on tourism related climate resources // *Climate Change*. 2009b. V. 95. P. 551–573.
<https://doi.org/10.1007/s10584-009-9565-7>

Citation: Vinogradova V.V., Titkova T.B. Changes in climate and snow cover in view of functioning of ski resorts in Russia in the early 21th century. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 369–382 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423030134

Changes in Climate and Snow Cover in View of Functioning of Ski Resorts in Russia in the Early 21th Century

V. V. Vinogradova^{a,b,#} and T. B. Titkova^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*HSE University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: vvvinog@yandex.ru*

Received December 14, 2023; revised April 21, 2023; accepted June 27, 2023

The development of winter ski tourism and characteristics of ski resorts in various regions of Russia are closely related to climatic conditions, the most important of which are the presence and duration of snow cover. For the period 2000–2021, a study of snow cover, availability of “optimal ski days” and climatic indicators necessary for artificial snowmaking at ski resorts located in different regions of Russia was performed, using data of the reanalysis ERA5-Land. The characteristics of snow cover and temperature from the reanalysis data were compared with data of the meteorological network. The ERA5-Land data for temperature, precipitation, and snow cover thickness are well synchronized with the observational data, and estimates of the error of trends in air temperature and snow cover depth according to the reanalysis data relative to the station data give satisfactory results. In the conditions of the current climate, the average and maximum thickness of snow cover in all resorts is sufficient for their functioning, but in 2000–2021, a decrease in both the maximum and average values of snow cover is noted in most resorts. The study shows that in terms of snow and weather conditions, the highest mountain resorts of the North Caucasus and Kirovsk (Murmansk region) are the most prosperous, where thickness of the snow cover and duration of its occurrence as well as a significant number of “optimal ski days” sustains stability of the resorts and creates favorable conditions for their further development.

Keywords: snow cover, climatic parameters, reanalysis, ski tourism, 100-day rule, Optimal Ski Day

REFERENCES

- Archive of VNIIGMI-MCD (All-Russian research institute of hydrometeorological information – World Data Center): <http://meteo.ru> (Last access: 30 September 2022)
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2021 god.* Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2021. Moscow: Roshydromet. 2022: 110 [In Russian].
- Nacional'nyy Atlas Rossii.* National Atlas of Russia. 2007, 2: 146–150. <https://www.xn--80aaaa1bhnclcci1-cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/146-150/146-150.html>
- Sokratov S.A., Seliverstov Yu.G., Shnyarkov A.L.* Evaluation of the economic risk of ski resorts in connection with the change in the duration of the snow season. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2014, 3 (127): 100–106 [In Russian].
- Titkova T.B., Vinogradova V.V.* The timing of the occurrence of snow cover on the territory of Russia at the beginning of the 21st century according to satellite data. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2017, 57 (1): 25–33 [In Russian].
- Titkova T.B., Kitaev L.M., Vinogradova V.V.* Short-term variability of the timing of the occurrence of snow cover according to MODIS data in the north of Eurasia under the conditions of the current climate. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017, 14 (5): 223–238 [In Russian].
- Tretij ochenochnyy doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii.* The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. St. Petersburg: Science-intensive technologies. 2022: 676 p. [In Russian].
- Abegg B.* Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. vdf Verlag, Zurich. 1996: 240
- Abegg B., Morin S., Demiroglu O.C., François H., Rothleitner M., Strasser U.* Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism. *Intern. Journ. of Biometeorology.* 2021, 65: 691–701. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01867-3>
- Barbier B.* Ski et stations de sports d'hiver dans le monde. In: Sinnhuber K., Jülg F. (eds) Beiträge zur Fremdenverkehrsgeographie I. Wiener Geographische Schriften 51/52, Vienna. 1978: 130–146.
- Berghammer A., Schmude J.* The Christmas–Easter shift: simulating Alpine ski resorts' future development under climate change conditions using the parameter 'Optimal Ski Day'. *Tour Econ.* 2014, 20 (2): 323–336. <https://doi.org/10.5367/te.2013.0272>
- Berard-Chenu L., Cognard J., François H., Morin S., George E.* Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts? *Intern. Journ. of Biometeorology.* 2021, 65: 659–675. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01933-w>
- Bian Q., Xu Z., Zheng H., Li K., Liang J., Fei W., Shi C., Zhang S., Yang ZL.* Multiscale changes in snow over the Tibetan Plateau during 1980–2018 represented by reanalysis data sets and satellite observations *Journ. Geophys. Research. Atmosphere.* 2020, 125: e2019-JD031914. <https://doi.org/10.1029/2019JD031914>.
- Copernicus Publications: <https://publications.copernicus.org> (Last access: 30 September 2022)
- Demiroglu O.C., Turp M.T., Kurnaz M.L., Abegg B.* The Ski Climate Index (SCI): fuzzification and a regional climate modeling application for Turkey. *Intern. Journ. of Biometeorology.* 2021, 65: 763–777. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01991-0>
- Falk M., Lin X.* Time-varying impact of snow depth on tourism in selected regions. *Intern. Journ. of Biometeorology.* 2021, 65: 645–657. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01848-1>
- Galloway R.W.* The potential impact of climate changes on Australian ski fields. In: Pearman G.I. (ed). *Greenhouse: planning for climate change.* CSIRO, Melbourne. 1988: 428–437.
- [ski.ru](https://www.ski.ru): <https://www.ski.ru> (Last access: October 2022)
- IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2019: 755. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- Mieczkowski Z.* World trends in tourism and recreation. Peter Lang Publishing, New York. 1990.
- Nouri M., Homae M.* Spatiotemporal changes of snow metrics in mountainous data-scarce areas using reanalyses. *Journ. of Hydrology.* 2021: 603 (A): 126858. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126858>
- Orsolini Y., Wegmann M., Dutra E., Liu B., Balsamo G., Yang K., de Rosnay P., Zhu C., Wang W., Senan R., Arduini G.* Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations. *Cryosphere.* 2019, 13: 2221–2239. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2221-2019>.
- Rixen C., Teich M., Lardelli C., Gallati D., Pohl M., Pütz M., Bebi P.* Winter tourism and climate change in the Alps: an assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential. *Mt Res Dev.* 2011, 31 (3): 229–236. <https://doi.org/10.1659/MRDJOURNAL-D-10-00112.1>
- Wegmann M., Orsolini Y., Dutra E., Bulygina O., Sterin A., Brönnimann S.* Eurasian snow depth in long-term climate reanalyses. *The Cryosphere.* 2017 11, 923–935. <https://doi.org/10.5194/tc-11-923-2017>
- Witmer U.* Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneeedaten in der Schweiz. Geographica Bernensia G25, Bern. 1986.
- Yu G., Schwartz Z., Walsh J.E.* Effects of climate change on the seasonality of weather for tourism in Alaska. *Arctic.* 2009a, 62: 371–504. <https://doi.org/10.14430/arctic175>
- Yu G., Schwartz Z., Walsh J.E.* A weather-resolving index for assessing the impact of climate change on tourism related climate resources. *Climate Change.* 2009b, 95: 551–573. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9565-7>