

## СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5-LAND С ПРЯМЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА В МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2025 г. О. Р. Жунусова<sup>1,\*</sup>, А. А. Землянскова<sup>1</sup>, О. М. Макарьева<sup>1</sup>,  
А. Н. Шихов<sup>1,2</sup>, Н. В. Нестерова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

\*e-mail: zhun.oksana@gmail.com

Поступила в редакцию 20.06.2025 г.

После доработки 20.07.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Исследование посвящено комплексной оценке точности данных реанализа ERA5-Land при воспроизведении толщины снежного покрова и количества твердых осадков в условиях криолитозоны Северо-Востока России на примере Магаданской области. Основой для анализа послужили данные суточных наблюдений с 21 метеостанции (2010–2024 гг.) и данные с 12 стационарных снегомерных реек, установленных авторами на термометрических скважинах региональной геофизиологической сети мониторинга (2022–2024 гг.). Высота снежного покрова у реек фиксировалась с заданным интервалом по времени с помощью фотоловушек. Для сопоставления использовались ближайшие к пунктам наблюдений узлы сетки ERA5-Land с пространственным разрешением  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (~9 км) с учётом различий в высоте между ячейками сетки и пунктами наблюдений. Результаты показали, что данные ERA5-Land систематически завышают высоту снежного покрова (в среднем на 27 см, или 168 %) и количество твёрдых осадков (в среднем на 6 мм, или 113 %, за период с октября по апрель) в сравнении с наблюдаемыми данными. Средний коэффициент корреляции между данными реанализа и наблюдениями составил 0.73 для высоты снега и 0.84 для твёрдых осадков. Ошибки наиболее значительны в горных районах и для станций, расположенных на берегу Охотского моря. Выявлена зависимость завышения толщины снежного покрова по данным реанализа от высоты расположения пункта наблюдения. Так, завышение толщины снежного покрова по данным реанализа увеличивается до значений абсолютной высоты около 500 м, однако выше 500 м эта зависимость меняется на обратную. ERA5-Land показывает более раннее появление снежного покрова и более позднее его таяние в сравнении с наблюдениями. Кроме завышения твёрдых осадков, дополнительными факторами, вносящими погрешность в воспроизведение реанализом высот снежного покрова, являются низкое пространственное разрешение ERA5-Land и отсутствие учета процессов сублимации и ветрового переноса снега в модели. Полученные результаты способствуют лучшему пониманию возможностей и ограничений использования данных ERA5-Land в условиях горной криолитозоны.

**Ключевые слова:** ERA5-Land, реанализ, высота снега, Северо-Восток России, Магаданская область, мерзлота

DOI: 10.7868/S2412376525040089

### ВВЕДЕНИЕ

Толщина сезонного снежного покрова — ключевая характеристика климатического режима, которая оказывает значительное влияние на термический режим многолетнемёрзлых пород и промерзание почвогрунтов (Гаврилова, 1978; Павлов, 1980; Шерстюков, 2008; Шмакин и др.,

2015). Кроме того, снег — определяющее звено в формировании гидрологического режима рек. В условиях потепления климата и деградации многолетней мерзлоты проблема изучения распределения снежного покрова представляется весьма актуальной (Осокин, Сосновский, 2015; Китаев, 2021; Kim et al., 2025).

В горных регионах зоны многолетней мерзлоты, таких как Магаданская область, отмечается недостаток наземных наблюдений за характеристиками снежного покрова. Для территории области площадью более 462 тыс. км<sup>2</sup> доступны данные о толщине и плотности снежного покрова всего с 26 метеостанций, расположенных на высотах от 5 до 850 м над ур. моря, и 5 маршрутных снегомерных съёмок. При этом 27 % территории области, расположенной на высотах свыше 850 м над ур. моря, вообще не освещены данными наблюдений за снежным покровом.

В связи с ограниченностью информации становится актуальным использование данных реанализа. Они представляют собой результаты расчётов численных моделей атмосферы, в которых используются динамически сглаженные и согласованные наблюдения в течение анализируемого периода (как наземные, так и аэрологические и спутниковые) (Sharifi et al., 2019; Фомин, Ундерских, 2020). Использование технологии слияния данных нескольких источников может обеспечить более точное представление о распределении осадков, в том числе и в горных регионах (Yan et al., 2024; Li et al., 2025).

В мировой практике широко распространено использование реанализа ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021), данные которого предоставляются с наиболее высоким пространственным разрешением (0.1° по широте и долготе) в сравнении с другими реанализами. К числу доступных переменных относятся и несколько характеристик снежного покрова, включая толщину, плотность и влагосодержание. Реанализ ERA5-Land, как и основной реанализ ERA5 (Hersbach et al., 2020), разработан Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), и его данные находятся в открытом доступе (Copernicus..., 2025). Несмотря на то, что реанализы ERA5-Land и ERA5 считаются наиболее совершенными из существующих, необходимы анализ точности и изучение возможности применения этих данных для разных территорий, прежде чем использовать их на практике.

В частности, характеристики точности воспроизведения различных переменных реанализами ECMWF для территории России рассматривались в ряде работ (Головинов, Васильева, 2022; Григорьев и др., 2022; Титкова, Ананичева, 2023; Морейдо и др., 2024). Исследованиям характеристик снежного покрова по данным реанализа посвящено много работ (Muñoz-Sabater et al., 2021; Крючков и др., 2023; Poschlod, Daloz, 2024; Калинин и др., 2025), включая работы

по горным регионам (Akyurek et al., 2023; Lei et al., 2023; Yan et al., 2024; Majidi et al., 2025; Kim et al., 2025). При этом для Северо-Востока России такие исследования единичны (Титкова, Ананичева, 2023).

Цель исследования заключается в оценке воспроизводимости высоты снежного покрова и количества твёрдых осадков по данным реанализа ERA5-Land на территории Магаданской области.

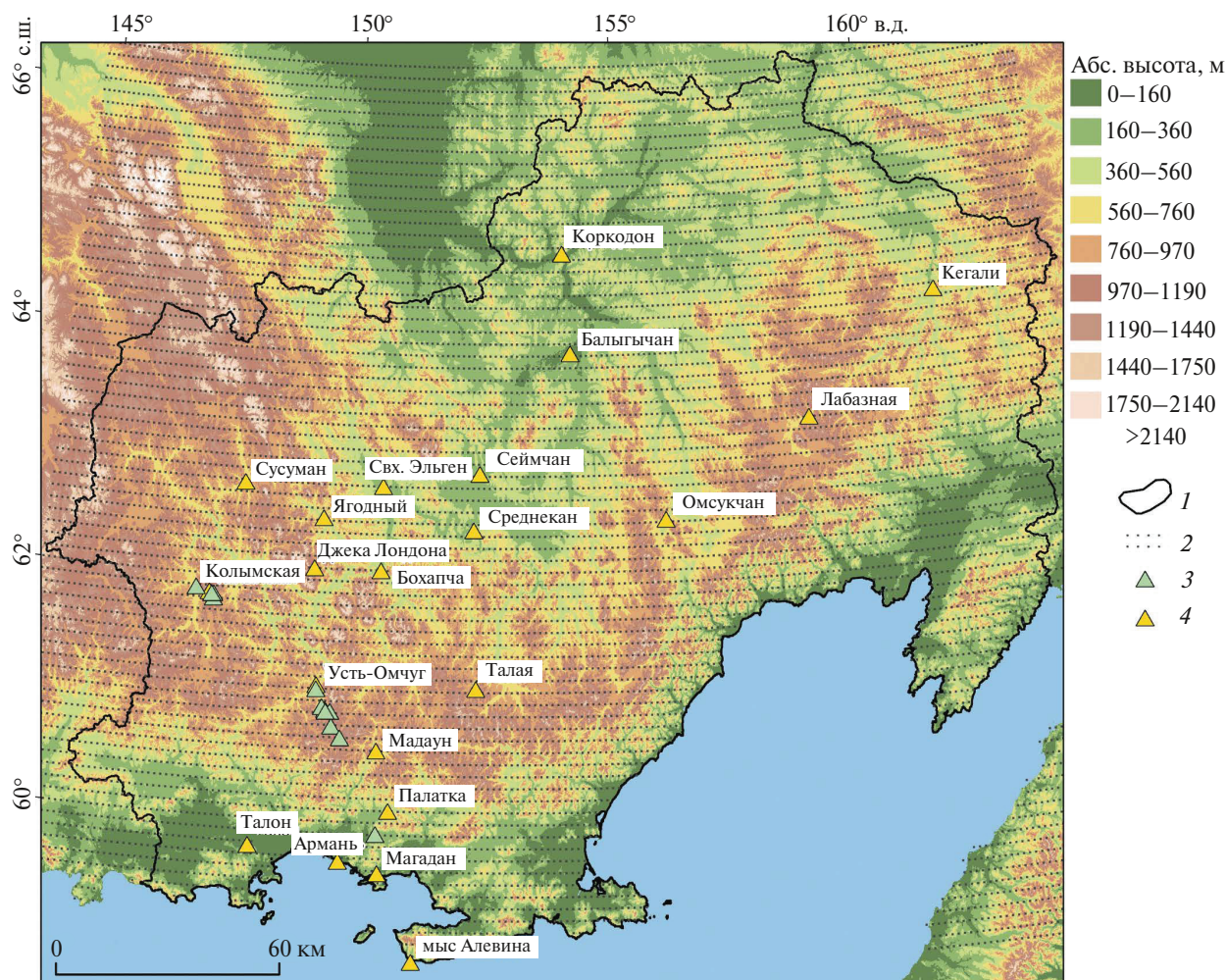
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Данные наземных наблюдений.** Для оценки качества реанализа использовались наблюдённые суточные данные о высоте снежного покрова и твёрдых осадках с 21 метеостанции Магаданской области, расположенных на абсолютных высотах от 9 до 850 м над ур. моря в период 2010–2024 гг. (рис. 1). Большинство метеостанций располагается в долинах рек.

Дополнительно использовались данные с 12 стационарных снегомерных реек, установленных авторами для наблюдения за высотой снежного покрова на термометрических скважинах региональной геокриологической сети мониторинга Магаданской области (Макарьева и др., 2024). Они обеспечивают информацию о высоте снега на большем, чем метеостанции, диапазоне высот – от 175 до 1182 м. Высота снежного покрова у реек фиксировалась с заданным интервалом по времени с помощью фотоловушек в период с сентября 2022 г. по декабрь 2024 г. (Землянскова и др., 2024).

**Данные реанализа ERA5-Land.** Для региона исследования подготовлены данные о высоте снежного покрова (snow depth) и количестве осадков (total precipitation) за период с октября по апрель с суточным шагом. Исходные данные по этим переменным были получены с шагом сетки по горизонтали 0.1° из набора ERA5-Land post-processed daily statistics from 1950 to present (Muñoz-Sabater et al., 2021). Этот набор данных уже содержит суточные суммы осадков и осреднённые за сутки значения высоты снежного покрова. Для сопоставления с наблюдениями были выбраны ближайшие к пунктам наблюдения узлы сетки ERA5-Land, сравнение выполнялось путём извлечения величины из данного узла сетки (без сглаживания).

**Критерии сравнения.** Для сравнения модельных значений ERA5-Land и рядов наблюдений были использованы следующие критерии сравнения: bias (средняя абсолютная ошибка или



**Рис. 1.** Регион исследования с сетью наблюдений и узлами сетки реанализа ERA5-Land. Условные обозначения: 1 – границы Магаданской области; 2 – узлы сетки реанализа ERA5-Land; 3 – места установки фотоловушек; 4 – метеорологические станции (указаны названия). Для сопоставления с наблюдениями использовались ближайшие к пунктам наблюдений узлы сетки

**Fig. 1.** Study region with the observation network and the ERA5-Land grid nodes. Legend: 1 – boundaries of the Magadan Oblast; 2 – ERA5-Land grid nodes; 3 – camera trap locations; 4 – weather stations (station names are indicated). The nearest ERA5-Land grid nodes to observation points were used for comparison

средняя разность), среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя относительная ошибка (MRE), коэффициент корреляции Спирмена ( $r_s$ ). Расчёт данных характеристик производился по формулам:

$$\text{bias} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} |x_{obs,i} - x_{sim,i}|}{N},$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (x_{obs,i} - x_{sim,i})^2}{N}},$$

$$\text{MRE} = \frac{100\%}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_{obs,i} - x_{sim,i}}{x_{obs,i}},$$

где  $N$  – число пунктов наблюдений, по которым выполняется оценка (станции и снегомерные рейки авторов);  $x_{obs,i}$  – значения, полученные по данным наземных наблюдений,  $x_{sim,i}$  – значения, полученные по данным реанализа.

Для учёта влияния рельефа использовалась разница высоты станции и средней высоты ячейки сетки  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  ERA5-Land. Для расчёта средней высоты ячейки брали данные цифровых

моделей рельефа, используемые в продуктах реанализа ERA5: GLOBE DEM (для точек с широтой севернее 60° с.ш.) и SRTM30 (для точек с широтой южнее 60° с.ш.).

Для расчёта продолжительности существования снежного покрова количество дней со снегом принималось для высот снега не менее 1 и 5 см. Порог в 1 см был выбран для определения начала формирования снежного покрова и его полного стаивания, порог 5 см — для оценки продолжительности залегания устойчивого снежного покрова.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Оценка воспроизведения высоты снежного покрова.** Значения рассчитанных критериев сравнения по данным высот снежного покрова для каждой станции представлены в табл. 1. Данные ERA5-Land систематически завышают высоту снежного покрова в Магаданской области: в среднем на 27 см, или на 168 %, относительно наземных наблюдений за весь период залегания снежного покрова. Превышение мощности снега по данным реанализа наблюдается для всех станций, кроме метеостанции Талон (рис. 2, в). Коэффициент корреляции Спирмена и среднеквадратичная ошибка, рассчитанные по всем станциям, составляют 0.73 и 38 см соответственно. Средняя высота ячейки ERA5-Land почти для всех пунктов наблюдений превышает высоту наземных пунктов наблюдений, в среднем на 97 м.

На рис. 2 представлено сравнение высоты снежного покрова по данным ERA5-Land и наблюдениям для отдельных фотоловушек (см. рис. 2, а–б) и метеостанций (см. рис. 2, в–г). Анализ временных рядов высоты снежного покрова по данным ERA5-Land и наземных наблюдений показывает, что величина завышения реанализом фактической высоты снега не зависит от снежности зимы. Исключение — метеостанция Талон. В отличие от других пунктов, здесь данные ERA5-Land занижают высоту снежного покрова по сравнению с наземными наблюдениями. Причём в многоснежные зимы занижение становится более выраженным.

На рис. 3 представлено пространственное распределение средней относительной ошибки высоты снежного покрова. Наибольшие ошибки наблюдаются в горных районах и для станций, расположенных на берегу Охотского моря. Тот же эффект наблюдается в пространственном распределении коэффициента корреляции. Это может быть связано с особенностями рельефа

и микроклимата, влияющими на процессы перераспределения снега. Зависимости рассчитанных статистических характеристик от широты станции не установлено.

Значения абсолютной ошибки высоты снежного покрова зависят от высоты расположения станции: с ростом высоты станции увеличивается завышение реанализом высоты снежного покрова (рис. 4, а). Однако для станций выше 500 м эта зависимость имеет обратный характер. Зависимость абсолютной ошибки высоты снежного покрова от разницы абсолютных высот пунктов наблюдений и реанализа не выражена (см. рис. 4, б). Для остальных рассчитанных статистических характеристик зависимости от высоты станций не наблюдается.

Реанализ ERA5-Land систематически показывает более длительный период залегания снежного покрова, чем фактические наблюдения (табл. 2) — более раннее появление снежного покрова и более позднее его таяние. Однако стоит принять во внимание, что при анализе использовались данные о высоте снега, полученные по рейке, а не в ходе снегомерных наблюдений. В таких данных присутствует недооценка высоты снежного покрова в результате возможного выдувания снега у рейки.

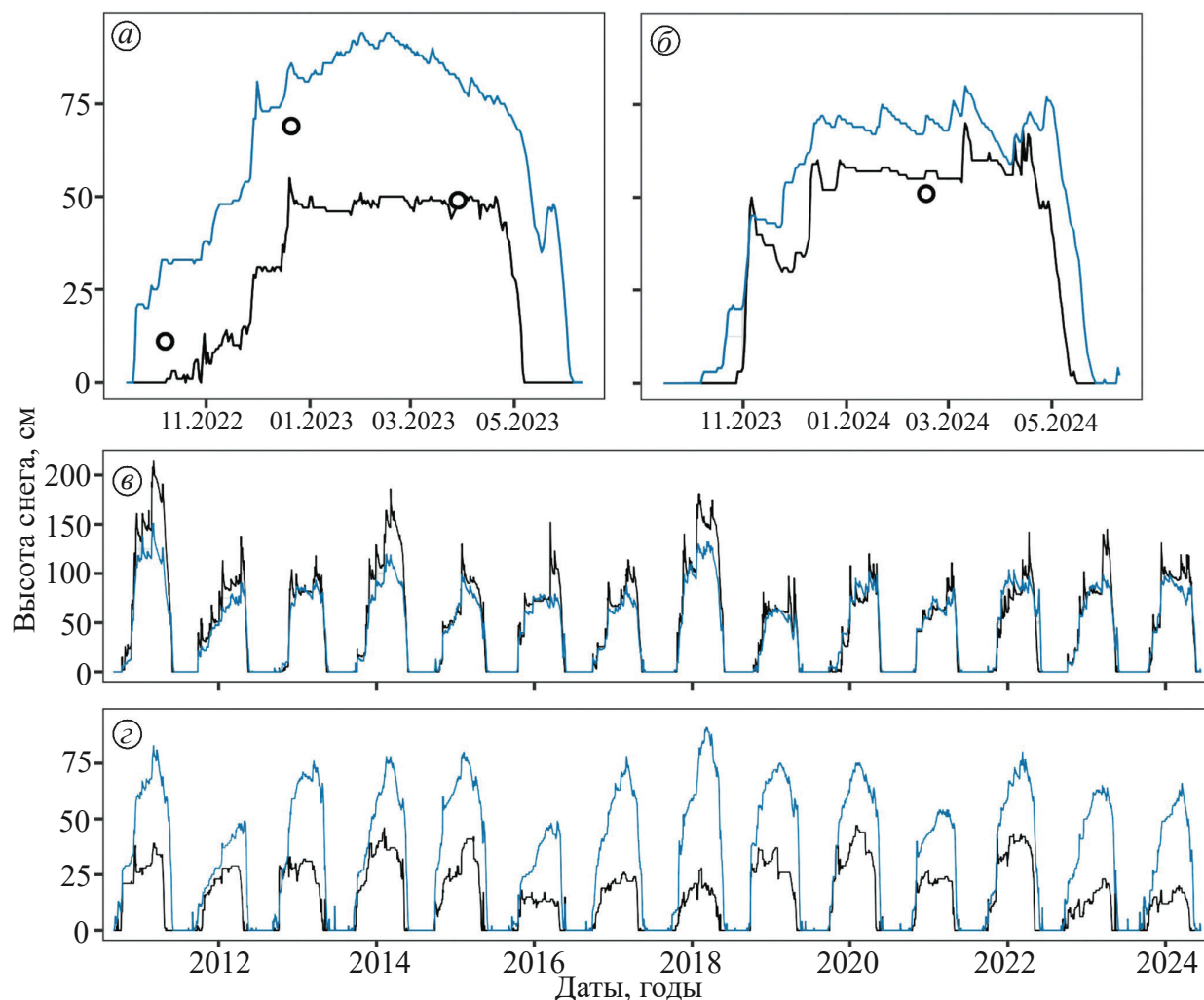
Для каждого сезона была определена дата с максимальной высотой снега на основе данных реанализа, после чего проведено сравнение высот снежного покрова на эту дату (рис. 5). Результаты показали, что средняя высота снежного покрова по данным ERA5-Land превышает наблюдаемые значения в среднем на 40 см с минимальным превышением 1 см и максимальным — 68 см. Средняя относительная ошибка варьирует от 0 до 290 % и составляет 94 %. Наибольшее накопление снега по данным реанализа наблюдается в районе Колымского нагорья.

**Оценка воспроизведения твёрдых осадков.** Завышение высоты снежного покрова по данным ERA5-Land частично объясняется завышением количества твёрдых осадков. Сравнение средних месячных сумм твёрдых осадков и значения рассчитанных критериев сравнения по всем метеорологическим станциям и по месяцам представлено на рис. 6. В среднем за период с октября по апрель превышение составляет 6 мм, что соответствует 113 % относительно наземных наблюдений. Коэффициент корреляции Спирмена и среднеквадратичная ошибка, рассчитанные по всем станциям, составляют 0.84 и 14 см соответственно.

**Таблица 1.** Сравнение наблюдаемых данных с данными реанализа ERA5–Land по станциям**Table 1.** Comparison of observed data with ERA5–Land reanalysis data by weather stations

Пункт наблюдений	Широта, град	Долгота, град	Высота над ур. моря, м	Средняя абс. ошибка, см	RMSE, см	MRE, %	$r_s$	Разница между высотой станции и средней высотой ячейки ERA5–Land, м
Сусуман	62.78	148.17	649	–26	30	–211	0.74	–38
Коркодон	64.75	153.97	103	–9	14	–49	0.95	–256
Сеймчан	62.92	152.42	207	–22	26	–87	0.93	1
Среднекан	62.45	152.32	266	–17	24	–48	0.91	–7
Магадан, Нагаева бухта*	59.58	150.78	118	–27	35	–232	0.70	–13
мыс Алевина*	58.85	151.37	65	–25	33	–219	0.79	–267
Талон	59.77	148.63	22	9	20	–20	0.92	–11
Ягодный	62.52	149.62	487	–31	34	–120	0.86	–104
Джека Лондона	62.10	149.50	806	–31	35	–109	0.80	–127
Колымская	61.85	147.67	850	–14	18	–44	0.89	–312
Усть–Омчуг	61.13	149.63	576	–38	43	–246	0.62	–60
Кегали	64.25	161.07	374	–26	29	–94	0.90	–97
Балыгычан	63.92	154.10	146	–17	22	–53	0.91	–18
Лабазная	63.30	158.50	706	–21	26	–89	0.85	–174
Свх.Эльген	62.80	150.67	312	–27	31	–96	0.85	–21
Бохапча	62.10	150.68	348	–29	34	–87	0.86	–146
Омсукчан	62.52	155.78	542	–34	39	–142	0.84	–110
Талая	61.13	152.38	689	–36	41	–108	0.90	–179
Мадаун	60.60	150.70	523	–52	55	–255	0.83	–140
Палатка	60.10	150.93	341	–47	50	–263	0.74	–57
Армань*	59.67	150.13	9	–47	52	–1120	0.52	–3
Анмангында**	60.93	149.80	745	–39	42	–202	0.87	–166
Солонцовый**	60.91	149.89	803	–28	33	–112	0.80	–170
ГП–2**	60.95	149.74	712	–37	39	–254	0.88	–135
Сопка**	60.79	149.92	1027	–14	16	–28	0.85	–94
CALM**	60.91	149.81	781	–39	42	–260	0.82	–130
CALM УО**	61.10	149.63	600	–39	43	–276	0.85	–36
Бускэчен**	60.70	150.07	978	–45	51	–200	0.49	–128
Перевал Кулу**	61.80	147.75	1170	–15	21	–37	0.62	–8
Кулу**	61.88	147.43	618	–29	33	–170	0.58	–46
Гольцы**	61.84	147.75	1182	–7	28	–35	0.33	4
Верхний**	61.84	147.71	961	–29	31	–179	0.77	–150
Сокол**	59.90	150.73	175	–14	17	–93	0.75	–18
<b>Все станции</b>				–27	38	–168	0.73	–97
<b>Минимум</b>			9	–52	14	–1120	0.33	–312
<b>Максимум</b>			1182	9	55	–20	0.95	4

\* Прибрежные станции; \*\* фотоловушки.



**Рис. 2.** Сравнение наблюдаемой высоты снега (чёрная линия) с высотой снега по данным ERA5-Land (синяя линия) для пунктов наблюдений: ГП-2 (фотоловушка) (а); Сокол (фотоловушка) (б); метеостанция Талон (в); метеостанция Сусуман (г). Точками указаны данные наблюдений снегомерных съёмок

**Fig. 2.** Comparison of observed snow depth (black line) with snow depth from the ERA5-Land data (blue line) for observation sites: GP-2 (camera trap) (a); Sokol (camera trap) (b); Talon weather station (v); Susuman weather station (g). Dots represent snow survey data

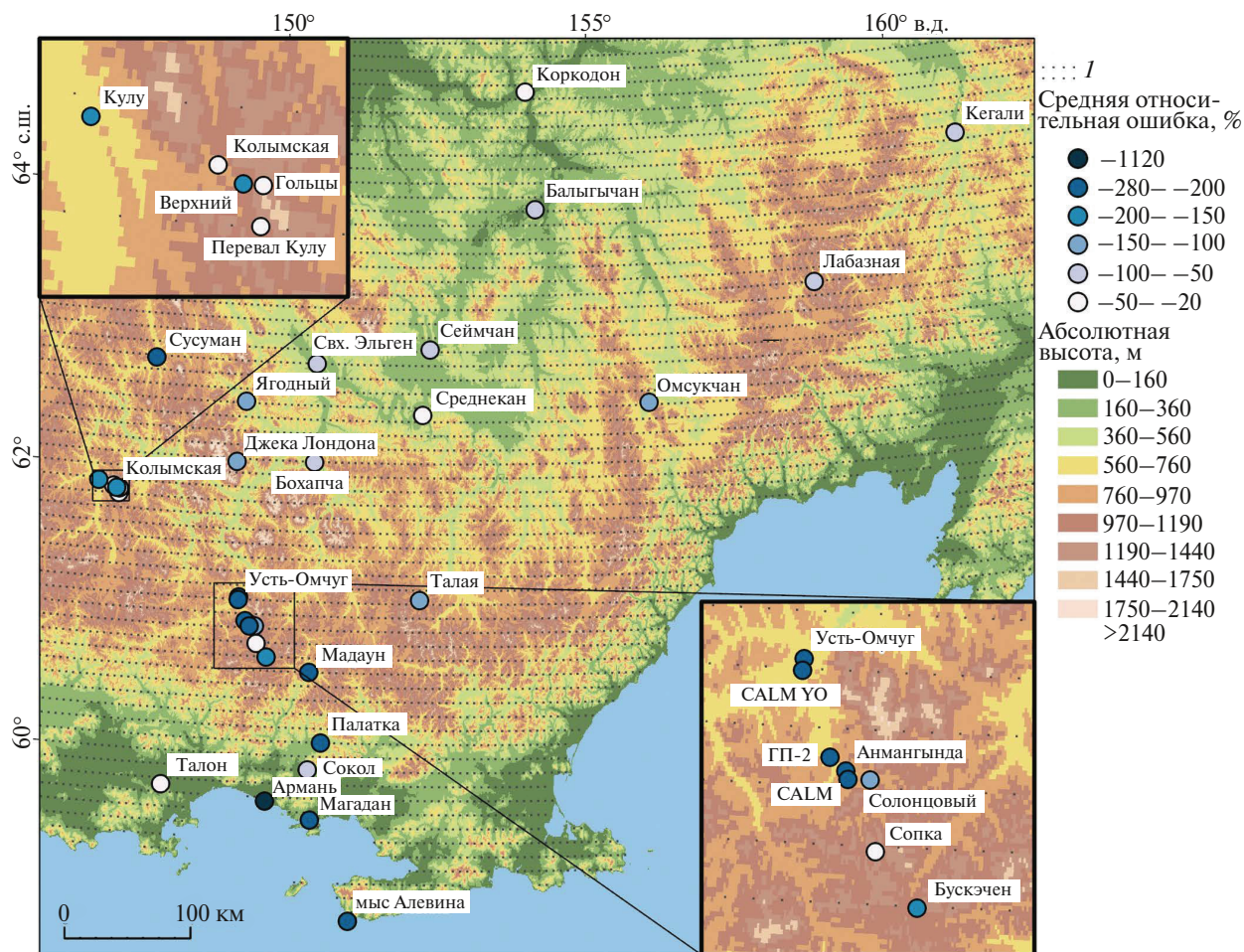
В отличие от высоты снежного покрова, наибольшие ошибки по осадкам наблюдаются на станциях, расположенных в районе Колымского нагорья (Лабазная, Кегали). В то же время, аналогично результатам для снежного покрова, значительные ошибки зафиксированы для прибрежных станций и в долине реки Анманы. На остальной территории Магаданской области выраженных пространственных закономерностей в распределении ошибок выявить не удалось.

Зависимости абсолютной ошибки количества твёрдых осадков от высоты местности или от разницы высот станции и средней высоты

соответствующей ячейки ERA5-Land, а также от широты станции не обнаружено.

Результаты согласуются с литературными данными, в частности с (Титкова, Ананичева, 2023), где отмечалось завышение реанализом ERA5-Land сумм твёрдых осадков на 15–70 % по сравнению с наблюдаемыми значениями для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока.

**Возможные факторы, влияющие на качество воспроизведения реанализом толщины снежного покрова.** Кроме завышения твёрдых осадков, в литературе отмечается систематическое занижение реанализом ERA5-Land температур воздуха,



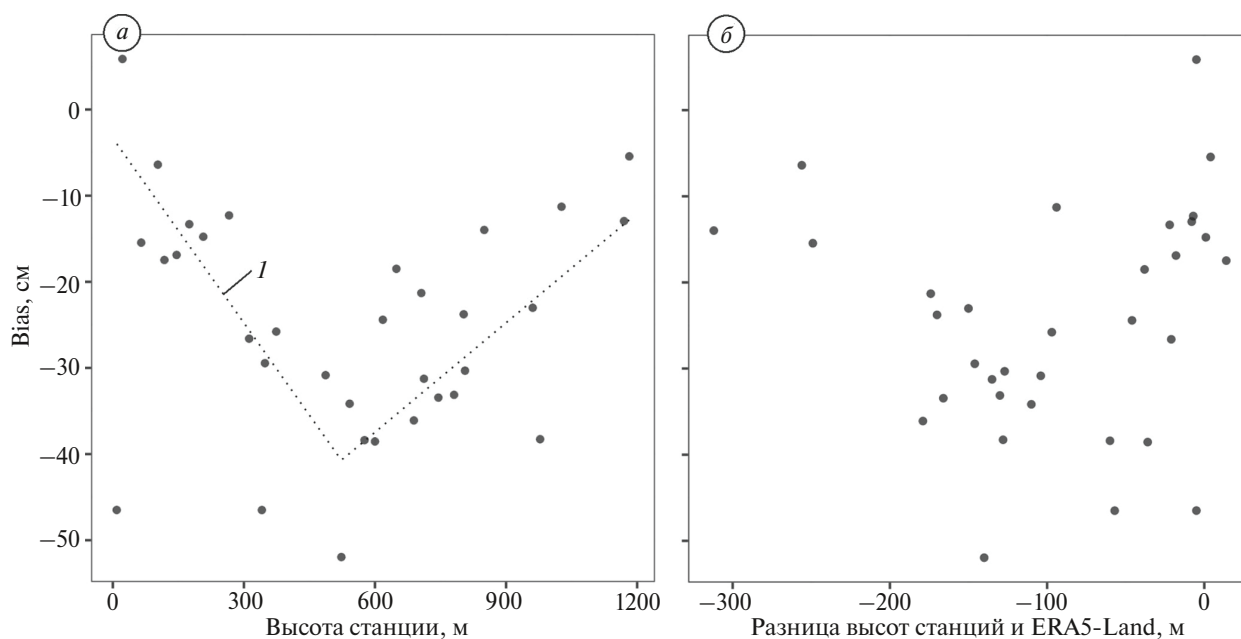
**Рис. 3.** Пространственное распределение средней относительной ошибки высоты снежного покрова по данным реанализа. *I* – узлы сетки ERA5-Land

**Fig. 3.** Spatial distribution of the mean relative error of ERA5-Land snow depth assessment. *I* – ERA5-Land grid nodes

особенно в горных регионах. Подобные ошибки зафиксированы для Альп (Dalla Torre et al., 2024), Анд (Kim et al., 2025), горных систем Дальнего Востока России (Титкова, Ананичева, 2023), Тибета (Yan et al., 2024). Наиболее сильное занижение приходится на периоды формирования и таяния снежного покрова, что приводит к увеличению продолжительности его существования в данных реанализа по сравнению с фактическими наблюдениями. Так, на примере Тибетского плато (Yan et al., 2024) авторы пришли к выводу, что доля территории, покрытой снежным покровом по данным ERA5-Land, преувеличена в связи с занижением температур воздуха и завышения твёрдых осадков. Однако более длительная продолжительность залегания снежного покрова, наоборот, может обуславливать занижение температур воздуха (cold bias) (Lei et al., 2023).

Значительным фактором ошибок воспроизведения служит низкое пространственное разрешение ERA5-Land (9 км), которое затрудняет корректное отображение климатических характеристик в сильно расчленённом рельефе. Это также отмечается в работах (Poschlod, Daloz, 2024; Majidi et al., 2025). Как показывают результаты (Poschlod, Daloz, 2024), качество воспроизведения снежного покрова и других характеристик существенно зависит от шага сетки данных реанализа, а для повышения точности можно рассматривать альтернативные продукты более высокого разрешения. Кроме того, возможно применение методов даунскейлинга – повышения пространственного разрешения данных реанализа (Zhang et al., 2024).

Дополнительными источниками погрешности служит и то, что в реанализе ERA5-Land не учитываются такие процессы, как сублимация



**Рис. 4.** Зависимости средней абсолютной ошибки (bias) высоты снежного покрова по данным реанализа от: высоты станции (а); разницы абсолютной высоты пункта наблюдения и средней высоты ячейки ERA5-Land (б). 1 – Средняя (схематическая) линия зависимости высоты снежного покрова от высоты станции

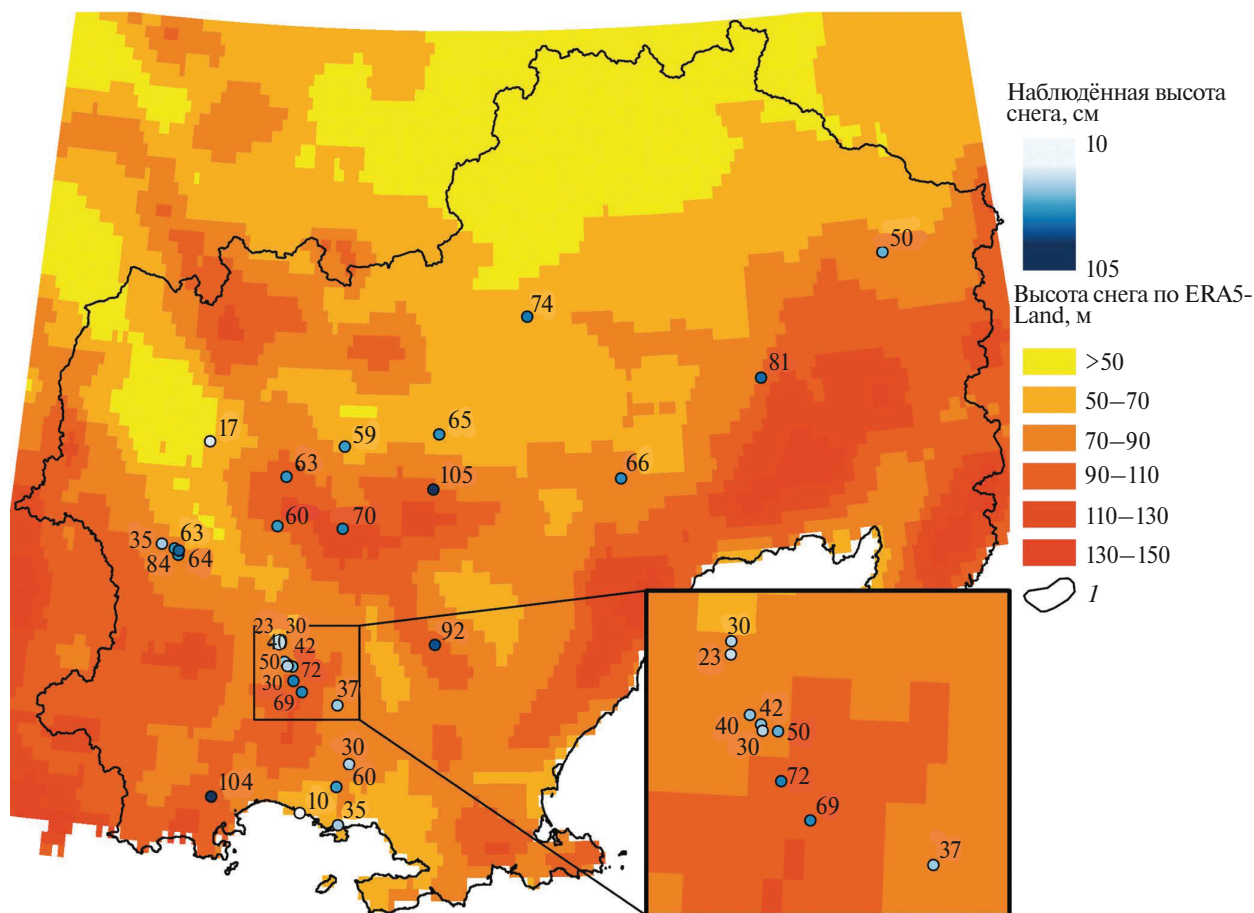
**Fig. 4.** Relationships of snow depth bias with: station elevation, a.s.l. (a); difference between station elevation and mean ERA5-Land grid cell elevation, a.s.l. (b). 1 – Schematic line showing relationship between snow depth and station elevation

**Таблица 2.** Разница в продолжительности дней с высотой снега не меньше 1 см / 5 см (только для данных без пропусков) по данным наблюдений и ERA5-Land

**Table 2.** Difference in the number of days with snow depth of at least 1 cm / 5 cm (only for data without gaps) according to observations and ERA5-Land data

Станция	Сезон			Среднее за период 2010–2021 гг.
	2021/22 г.	2022/23 г.	2023/24 г.	
Сусуман	–43/–29	–48/–46	–49/–46	–40/–33
Коркодон	–52/–25	–	–	–25/–15
Сеймчан	–30/–50	–21/–41	–16/–5	–27/–24
Среднекан	–25/–30	–	–	–16/–10
Магадан, Нагаева бухта*	–40/–31	–21/–23	–18/–10	–27/–23
мыс Алевина*	–47/–50	–	–	–32/–32
Талон	–21/–20	–12/–12	–16/–8	–16/–12
Анмангында**	–	–51/–56	–66/–51	–
ГП-2**	–	–60/–65	–64/–58	–
CALM**	–	–31/–33	–66/–52	–
Бускэчен**	–	–49/–45	–51/–66	–
Перевал Кулу**	–	–46/–40	–24/–36	–
Сокол**	–	–	–34/–25	–
Солонцовый**	–	–	–49/–42	–
Сопка**	–	–	–24/–10	–

\* Прибрежные станции; \*\* фотолоушки.



**Рис. 5.** Распределение высоты снежного покрова по данным ERA5-Land и по данным наземных наблюдений на дату годового максимума по данным реанализа – 17.03.2024. 1 – границы Магаданской области. Числами на карте обозначена наблюдаемая высота снега на пунктах наблюдения

**Fig. 5.** Snow depth distribution according to the ERA5-Land and ground-based observations on the date of maximum snow depth according to the ERA5-Land (March 17, 2024). 1 – Boundaries of the Magadan Oblast. Numbers on the map indicate observed snow depth at observation sites

снега и перенос снега ветром (Muñoz-Sabater et al., 2021). Последний процесс играет значительную роль в распределении характеристик снежного покрова в горных районах.

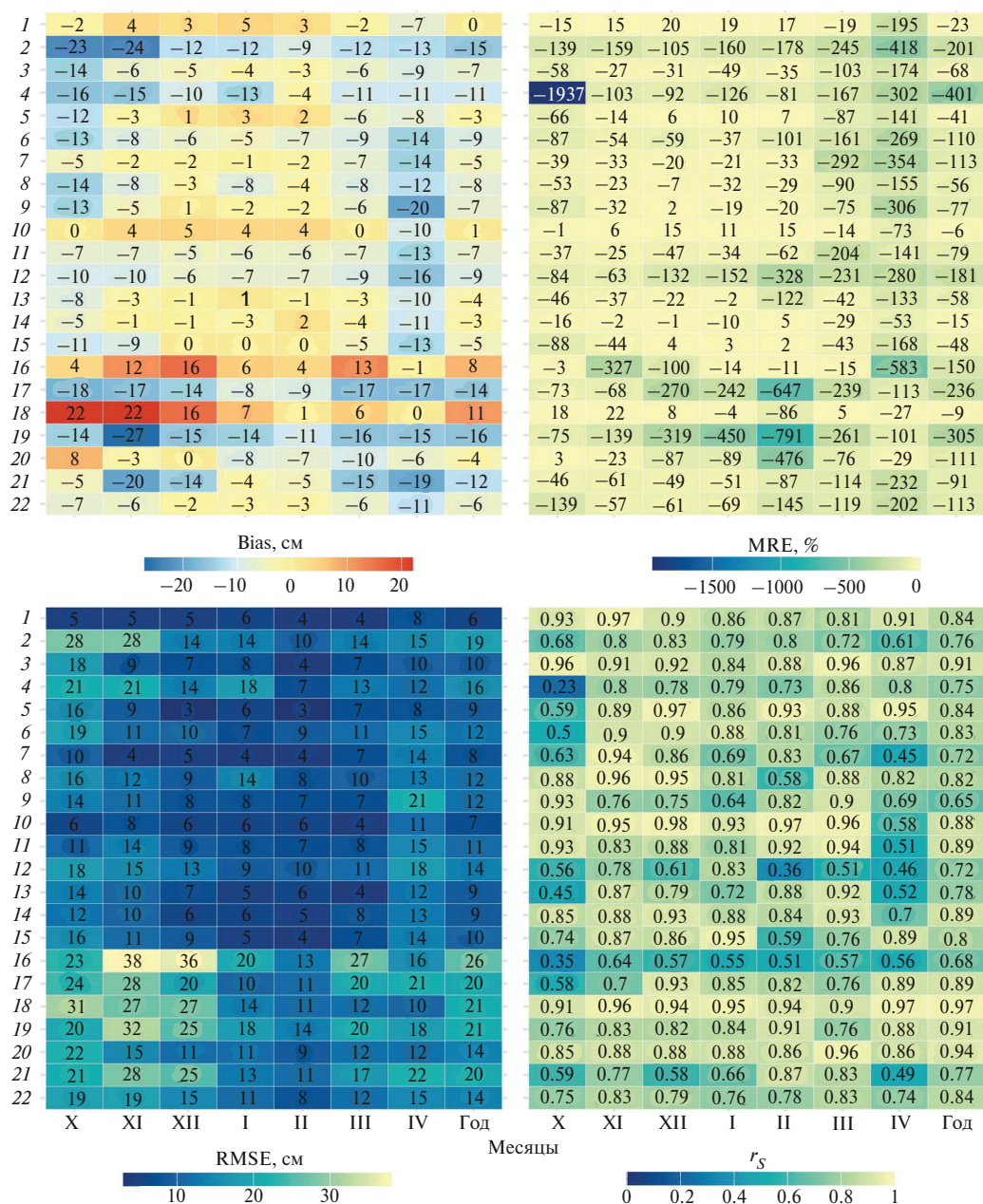
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка качества воспроизведения реанализом ERA5-Land мощности снежного покрова и количества твёрдых осадков в условиях горной криолитозоны Магаданской области. Анализ показал, что данные реанализа ERA5-Land обладают рядом существенных ограничений для оценки характеристик снежного покрова. Для большинства пунктов исследования выявлено значительное завышение

высоты снежного покрова и сумм твёрдых осадков по данным ERA5-Land.

Низкое пространственное разрешение (около 9 км) затрудняет корректное воспроизведение высоты снежного покрова в горных и прибрежных районах, где рельеф и локальные особенности оказывают значительное влияние на распределение осадков и высоту снега.

Результаты подтверждают необходимость обязательной верификации данных реанализа для конкретных регионов перед их применением в исследованиях. Полученные результаты способствуют более точному пониманию возможностей и ограничений использования данных реанализа. Это актуально для исследований мерзлоты, так как характеристики снежного покрова влияют на термический режим



**Рис. 6.** Рассчитанные статистические характеристики сравнения наблюдаемых данных и данных реанализа ERA5-Land по месяцам для пунктов наблюдений (обозначены цифрами), расположенных снизу вверх согласно увеличению их широты, а также обобщённые по всем станциям (под номером 22). Bias – средняя абсолютная ошибка, MRE – средняя относительная ошибка, RMSE – среднеквадратичная ошибка,  $r_s$  – коэффициент корреляции Спирмена.

**Условные обозначения:** 1 – Коркодон, 2 – Кегали, 3 – Бальгычан, 4 – Лабазная, 5 – Сеймчан, 6 – Совхоз Эльген, 7 – Сусуман, 8 – Омсукчан, 9 – Ягодный, 10 – Среднекан, 11 – Бохпача, 12 – Джека Лондона, 13 – Колымская, 14 – Талая, 15 – Усть-Омчуг, 16 – Мадаун, 17 – Палатка, 18 – Талон, 19 – Армань, 20 – Магадан, Нагаева бухта, 21 – мыс Алевина, 22 – характеристики, рассчитанные по всем станциям

**Fig. 6.** Calculated statistical characteristics of comparison between observed data and the ERA5-Land reanalysis data by month for observation sites (numbered from bottom to top in order of increasing latitude), as well as aggregated for all stations (22). MRE – mean relative error, RMSE – root mean square error,  $r_s$  – Spearman correlation coefficient.

**Legend:** 1 – Korkodon, 2 – Kegal, 3 – Balygychan, 4 – Labaznaya, 5 – Seymchan, 6 – Sovkhoz Elgen, 7 – Susuman, 8 – Omsukchan, 9 – Yagodny, 10 – Srednekan, 11 – Bokhapcha, 12 – Jack London, 13 – Kolymskaya, 14 – Talaya, 15 – Ust-Omchug, 16 – Madaun, 17 – Palatka, 18 – Talon, 19 – Arman, 20 – Magadan, Nagaeva Bay, 21 – Cape Alevina, 22 – characteristics aggregated for all stations

многолетнемёрзлых пород и глубину промерзания и протаивания, а также в задачах расчёта речного стока в период весеннего половодья.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта “Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата” (ID PURE 103963992).

**Acknowledgments.** This research has been supported by the Saint Petersburg State University as part of the project “Comprehensive assessment of natural and anthropogenic factors of intensification of water exchange processes in the permafrost zone under climate change conditions” (ID PURE 103963992).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилова М.К. Климат и многолетнее промерзание горных пород / Ред. В.Т. Балобаев. Новосибирск: Наука, 1978. 214 с.
- Головинов Е.Э., Васильева Н.А. Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 3. С. 92–105.  
<https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105>
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России. // Изв. РАН. Сер. География. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
- Землянскова А.А., Макарьева О.М., Никитина П.А., Волгина А.Д., Герасимов В.К. Динамика снежного покрова на территории Магаданской Области. // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Т. 11 С. 539–545.  
<https://doi.org/10.24412/2687-1092-2024-11-539-545>
- Калинин Н.А., Крючков А.Д., Сидоров И.А., Абдуллин Р.К., Шихов А.Н. Климатические характеристики влагозапасов снега на территории Пермского края. // Лёд и Снег. 2025. Т. 65. № 1. С. 50–68.  
<https://doi.org/10.31857/S2076673425010044>
- Китаев Л.М. Сопряжённость изменений температуры воздуха, толщины снежного покрова и температуры почвы Восточно-Европейской равнины // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 3. С. 43–49.  
<https://doi.org/10.15372/KZ20210304>
- Крючков А.Д., Калинин Н.А., Сидоров И.А. Качество характеристик снежного покрова, полученных на основе реанализа ERA 5-Land для территории Пермского края // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 3. С. 383–396.  
<https://doi.org/10.31857/S2076673423030055>
- Макарьева О.М., Абрамов Д.А., Землянскова А.А., Остахов А.А., Нестерова Н.В. Температура многолетнемёрзлых пород Верхнеколымского нагорья по данным термометрических скважин за 2021–2022 годы // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. № 3. С. 19–32.  
<https://doi.org/10.15372/KZ20240302>
- Морейдо В.М., Терский П.Н., Абрамов Д.В. Оценка качества воспроизведения метеорологических характеристик несколькими моделями атмосферного реанализа на территории Крымского полуострова // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 6. С. 731–742.  
<https://doi.org/10.31857/S0321059624060011>
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние динамики температуры воздуха и высоты снежного покрова на промерзание грунта // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С. 99–105.
- Павлов А.В. Расчёт и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск: Изд-во Наука, 1980. 240 с.
- Титкова Т.Б., Ананичева М.Д. Использование реанализа ERA5–Land и данных метеостанций в горных районах России для оценки изменения ледниковых систем Восточной Сибири и Дальнего Востока. // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 2. С. 199–213.  
<https://doi.org/10.31857/S2076673423020163>
- Фомин В.В., Ундерских М.Г. Использование реанализов для оценки пространственно-временной динамики температуры воздуха на Урале и в Западной Сибири во второй половине XX – начале XXI веков // Леса России и хозяйство в них. 2020. Т. 74. № 3. С. 4–11.
- Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 1. Р. 79–87.
- Шмакин А.Б., Осокин Н.И., Сосновский А.В., Зазовская Э.П., Борзенкова А.В. Влияние снежного покрова на промерзание и протаивание грунта на Западном Шпицбергене // Лёд и Снег. 2013. Т. 124. № 4. С. 52.  
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-4-52-59>
- Akyurek Z., Kuter S., Karaman Ç.H., Akpınar B. Understanding the Snow Cover Climatology over Turkey from ERA5–Land Reanalysis Data and MODIS Snow Cover Frequency Product // Geosciences. 2023. V. 13. № 10. P. 311.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences13100311>
- Copernicus // Электронный ресурс. URL:<https://cds.climate.copernicus.eu/> (Дата обращения: 20.06.2024).

- Dalla Torre D., Di Marco N., Menapace A., Avesani D., Righetti M., Majone B.* Suitability of ERA5-Land reanalysis dataset for hydrological modelling in the Alpine region // *Journ. of Hydrology: Regional Studies*. 2024. V. 52. P. 101718.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101718>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.  
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kim K.Y., Rajaram H., Lakshmi V.* Observing decreasing snow cover and increasing surface temperature across the Andes with remotely sensed and reanalysis data // *Environmental Research Communications*. 2025. V. 7. № 2. P. 021009.  
<https://doi.org/10.1088/2515-7620/adb382>
- Lei Y., Pan J., Xiong C., Jiang L., Shi J.* Snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau observed from space in against ERA5: Matters of scale // *Climate Dynamics*. 2023. V. 60. № 5–6. P. 1523–1541.  
<https://doi.org/10.1007/s00382-022-06376-0>
- Li Q., Jiang Y., Wei L., Liu F., Zhu J.* Comparison of ERA5-Land and CMPAS reanalysis data for the regional assessment of precipitation in Chongqing, China // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2025. V. 137. № 2. P. 16.  
<https://doi.org/10.1007/s00703-025-01062-2>
- Majidi F., Sabetghadam S., Gharaylou M., Rezaian R.* Evaluation of the performance of ERA5, ERA5-Land and MERRA-2 reanalysis to estimate snow depth over a mountainous semi-arid region in Iran // *Journ. of Hydrology: Regional Studies*. 2025. V. 58. P. 102246.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102246>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H.* 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>
- Poschlod B., Daloz A.S.* Snow depth in high-resolution regional climate model simulations over southern Germany – suitable for extremes and impact-related research? // *The Cryosphere*. 2024. V. 18. № 4. P. 1959–1981.  
<https://doi.org/10.5194/tc-18-1959-2024>
- Sharifi E., Eitzinger J., Dorigo W.* Performance of the State-Of-The-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain: A Regional Study over Austria // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. № 17. P. 2018.  
<https://doi.org/10.3390/rs11172018>
- Yan S., Chen Y., Hou Y., Liu K., Li X., Xing Y., Wu D., Cui J., Zhou Y., Pu W.* Which global reanalysis dataset has better representativeness in snow cover on the Tibetan Plateau? // *The Cryosphere*. 2024. V. 18. № 9. P. 4089–4109.  
<https://doi.org/10.5194/tc-18-4089-2024>
- Zhang Y., Li J., Liu D.* Spatial Downscaling of ERA5 Reanalysis Air Temperature Data Based on Stacking Ensemble Learning // *Sustainability*. 2024. V. 16. № 5. P. 1934.  
<https://doi.org/10.3390/su16051934>

Citation: Zhunusova O.R., Zemlyanskova A.A., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V. Comparison of ERA5-Land reanalysis data with direct measurements of snow cover characteristics in the Magadan Region. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (4): 628–642. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040089.

## Comparison of ERA5-Land reanalysis data with direct measurements of snow cover characteristics in the Magadan Region

© 2025 O. R. Zhunusova<sup>a, #</sup>, A. A. Zemlyanskova<sup>a</sup>, O. M. Makarieva<sup>a</sup>,  
A. N. Shikhov<sup>a, b</sup>, N. V. Nesterova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*Perm State University, Perm, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: zhun.oksana@gmail.com*

Received June 20, 2025; revised July 20, 2025; accepted September 25, 2025

The article presents results of comparison of the ERA5-Land reanalysis data with results of direct (in situ) measurements of snow depth and the solid precipitation in the permafrost zone in the Magadan Region (Northeast Russia). The analysis was based on daily observations of 21 weather stations (9–850 m a.s.l., 2010–2024) and the authors' data from 12 stationary snow measuring stakes installed at thermometric boreholes of the regional permafrost monitoring network (175–1182 m a.s.l., 2022–2024). The snow depth on the stakes was recorded at a given time interval using camera traps. The ERA5-Land grid nodes closest to the observation sites with a spatial resolution of  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (~9 km) were used for the comparison with regard for differences in elevation between grid cells and observation sites. The results indicate that the ERA5-Land reanalysis systematically overestimates snow depth (on the average by 27 cm or 168%) and solid precipitation (on average by 6 mm or 113% for the period October–April) compared to in situ measurements. The average correlation coefficient between reanalysis data and observations is 0.73 for snow depth and 0.84 for solid precipitation. Divergence increases in mountainous areas and for stations located on the coast of the Sea of Okhotsk. The dependence of the overestimation of snow depth on the elevation of the observation point was revealed. Thus, the overestimation of snow depth reproduced from the reanalysis data increases up to an absolute elevation of about 500 m, but on levels higher 500 m, this dependence changes to the opposite. ERA5-Land shows earlier snow cover formation and later melting in comparison with observations. In addition to the overestimation of solid precipitation, further sources of uncertainties are the low spatial resolution of the ERA5-Land data and the lack of consideration of sublimation and wind-driven snow transport in the model. The findings contribute to a better understanding of the capabilities and limitations of using the ERA5-Land data in the mountainous permafrost regions.

**Keywords:** ERA5-Land reanalysis, snow depth, North-Eastern Russia, Magadan Oblast, permafrost

### REFERENCES

- Gavrilova M.K. Climate and Perennial Rock Freezing. Novosibirsk: Nauka, 1978. 214 p. [In Russian].
- Golovinov E.E., Vasileva N.A. Comparison of long-term meteorological characteristics based on reanalysis data and ground-based observations in the Moscow region. *Melioratsiya i Gidrotekhnika*. Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2022, 12 (3): 92–105. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105> [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. Seriya geograficheskaya*. Proc. of the RAS. The series is geographical. 2022, 86 (3): 435–446. [In Russian].
- Zemlyanskova A.A., Makarieva O.M., Nikitina P.A., Volgina A.D., Gerasimov V.K. Snow Cover Dynamics in the Magadan Region. *Relief i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii*. Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2024, 11: 539–545.

- <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2024-11-539-545> [In Russian].
- 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].
- Kitaev L.M. Conjunction of Changes in Air Temperature, Snow Cover Thickness and Soil Temperature of East European Plain. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2021, 25 (3): 43–49. <https://doi.org/10.15372/KZ20210304> [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].
- Makarieva O.M., Abramov D.A., Zemlyanskova A.A., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Permafrost Temperature in the Upper Kolyma Highland According to the Data of Thermometric Boreholes 2021–2022. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2024, 28 (3): 19–32. <https://doi.org/10.15372/KZ20240302> [In Russian].
- Moreido V.M., Terskii P.N., Abramov D.V. Assessing the reproduction quality of meteorological characteristics by several atmospheric reanalysis models on the territory of Crimean Peninsula. *Vodnye Resursy. Water Resources*. 2024, 51 (6): 731–742. [In Russian].
- Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Impact of Dynamics of Air Temperature and Snow Cover Thickness on the Ground Freezing. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2015, 19 (1): 99–105. [In Russian].
- Pavlov A.V. *Raschyot i regulirovanie merzlotnogo rezhima pochvy*. Calculation and regulation of the permafrost regime of the soil. Novosibirsk: Nauka, 1980: 240 p. [In Russian].
- Titkova T.B., Ananicheva M.D. Using ERA5–Land Reanalysis and Data from Weather Stations in the Mountainous Regions of Russia to Assess Changes in the Glacial Systems of Eastern Siberia and the Far East. *Led i sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 199–213. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020163> [In Russian].
- Fomin V.V., Underskikh M.G. The assessment of the spatial and temporal dynamics temperature in the Urals and Western Siberia in the second half of the 20<sup>th</sup> – early 21<sup>st</sup> centuries with the use of reanalysis. *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh*. Forests of Russia and economy in them. 2020, 3 (74): 4–11 [In Russian].
- Sherstyukov A.B. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2008, 12 (1): 79–87. [In Russian].
- Shmakina A.B., Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Zazovskaya E.P., Borzenkova A.V. Influence of snow cover on soil freezing and thawing in the West Spitsbergen. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2013, 124 (4): 52. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-4-52-59> [In Russian].
- Akyurek Z., Kuter S., Karaman Ç.H., Akpınar B. Understanding the Snow Cover Climatology over Turkey from ERA5-Land Reanalysis Data and MODIS Snow Cover Frequency Product Geosciences. 2023, 13 (10): 311. <https://doi.org/10.3390/geosciences13100311>
- Copernicus: official site. Retrieved from: URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (Last access: June 20, 2024).
- Dalla Torre D., Di Marco N., Menapace A., Avesani D., Righetti M., Majone B. Suitability of ERA5-Land reanalysis dataset for hydrological modelling in the Alpine region *Journ. of Hydrology: Regional Studies*. 2024, 52: 101718. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101718>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D. The ERA5 global reanalysis Quarterly *Journ. of the Royal Meteorological Society*. 2020, 146 (730): 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kim K.Y., Rajaram H., Lakshmi V. Observing decreasing snow cover and increasing surface temperature across the Andes with remotely sensed and reanalysis data. *Environmental Research Communications*. 2025, 7 (2): 021009. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/adb382>
- Lei Y., Pan J., Xiong C., Jiang L., Shi J. Snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau observed from space in against ERA5: Matters of scale. *Climate Dynamics*. 2023, 60 (5–6): 1523–1541. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06376-0>
- Li Q., Jiang Y., Wei L., Liu F., Zhu J. Comparison of ERA5-Land and CMPAS reanalysis data for the regional assessment of precipitation in Chongqing, China. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 2025, 137 (2): 16. <https://doi.org/10.1007/s00703-025-01062-2>
- Majidi F., Sabetghadam S., Gharaylou M., Rezaian R. Evaluation of the performance of ERA5, ERA5-Land and MERRA-2 reanalysis to estimate snow depth over a mountainous semi-arid region in Iran. *Journ. of Hydrology: Regional Studies*. 2025, 58: 102246. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102246>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H. 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>

- Poschlod B., Daloz A.S.* Snow depth in high-resolution regional climate model simulations over southern Germany – suitable for extremes and impact-related research? *The Cryosphere*. 2024, 18 (4): 1959–1981. <https://doi.org/10.5194/tc-18-1959-2024>
- Sharifi E., Eitzinger J., Dorigo W.* Performance of the State-Of-The-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain: A Regional Study over Austria. *Remote Sensing*. 2019, 11 (17): 2018. <https://doi.org/10.3390/rs11172018>
- Yan S., Chen Y., Hou Y., Liu K., Li X., Xing Y., Wu D., Cui J., Zhou Y., Pu W.* Which global reanalysis dataset has better representativeness in snow cover on the Tibetan Plateau? *The Cryosphere*. 2024, 18 (9): 4089–4109. <https://doi.org/10.5194/tc-18-4089-2024>
- Zhang Y., Li J., Liu D.* Spatial Downscaling of ERA5 Reanalysis Air Temperature Data Based on Stacking Ensemble Learning. *Sustainability*. 2024, 16 (5): 1934. <https://doi.org/10.3390/su16051934>