

П. В. Воронина^{1,2}✉

Сравнительный анализ динамики снежного покрова в Новосибирской области по данным метеорологических и спутниковых наблюдений (2000–2024 гг.)

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pol.voronina@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты сравнения спутниковых данных MODIS (продукт MOD10A1) о сроках установления и схода снежного покрова с данными наземных наблюдений по шести станциям Новосибирской области за период 2000–2024 гг. Установлены статистические характеристики расхождений, выявлены пространственно-временные закономерности и аномалии. Показано, что спутниковые данные демонстрируют высокую сходимость с наземными измерениями (коэффициент корреляции более 0,8), однако систематически завышают продолжительность залегания снежного покрова в лесостепной зоне. Выявлена тенденция к сокращению периода снежности на 5–7 дней за 25-летний период.

Ключевые слова: снежный покров, MODIS, дистанционное зондирование, Новосибирская область, верификация, климатические изменения, даты схода снега, даты установления снега

P. V. Voronina^{1,2}✉

Comparative analysis of snow cover dynamics in the Novosibirsk region based on meteorological and satellite observations (2000–2024)

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: pol.voronina@gmail.com

Abstract. The study is devoted to the analysis of a comparison of MODIS satellite data (MOD10A1 product) on the timing of snow cover onset and melting with ground-based observations from six stations in the Novosibirsk region for the period 2000–2024. Statistical characteristics of the discrepancies are determined, and spatiotemporal patterns and anomalies are identified. It is shown that satellite data demonstrate high convergence with ground-based measurements (correlation coefficient greater than 0.8); however, they systematically overestimate the duration of snow cover in the forest-steppe zone. A trend toward a reduction in the snowfall period by 5–7 days over a 25-year period is revealed.

Keywords: MODIS, satellite remote sensing data processing, snow cover, onset and destruction dates of snow cover

Введение

Снежный покров является одним из наиболее динамичных и критически важных компонентов климатической системы Земли. Он оказывает непосредственное

влияние на глобальный радиационный баланс, гидрологический режим рек и тепловое состояние почв, выступает в качестве эффективного изолятора, регулирует глубину промерзания грунтов и энергообмен между атмосферой и литосферой [1, 2]. В Сибири – регионе с выраженным холодным периодом – весеннее снеготаяние часто обеспечивает до 50% и более годового речного стока и определяет водную обеспеченность обширных территорий [2].

В условиях современного глобального потепления наблюдается значительная трансформация характеристик снежного покрова. Многочисленные исследования фиксируют сокращение продолжительности залегания снега в Северном полушарии, особенно весной, что коррелирует с устойчивым повышением приземной температуры воздуха [2, 3]. На различных территориях снежный покров по-разному реагирует на изменения климата. Так, для Сибири и северо-востока Европейской территории России характерен рост зимней аккумуляции снега, а на западе Европейской части страны наблюдаются обратные тенденции, связанные с увеличением числа оттепелей [3, 4].

Традиционной основой для анализа многолетней динамики снежного покрова служат данные государственной метеорологической сети (ГМС). Однако дискретный характер наземных наблюдений ограничивает возможности для полноценной оценки пространственной неоднородности распределения снега, особенно в условиях сложного рельефа или на малообжитой территории [5, 6]. Этот недостаток может быть компенсирован использованием данных дистанционного зондирования Земли, в частности продуктов спектрорадиометра MODIS. Спутниковые данные позволяют получать регулярную информацию о площадном распространении снежного покрова с высоким пространственным разрешением [7–9].

Многочисленные валидационные исследования подтвердили высокую сходимость (до 80-90%) продуктов MODIS «snow cover» с наземными наблюдениями при толщине снега более 2 см, при этом основные расхождения фиксируются в переходные сезоны (осенью и весной) [5].

Для территории Новосибирской области, расположенной в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины, характерен резко континентальный климат с продолжительной холодной зимой, длящейся около полугода [10–12]. В работе [13], выполненной только по спутниковым данным MODIS для всей территории Новосибирской области в целом (без выделения отдельных метеостанций) за период 2000–2025 гг., установлено, что средняя продолжительность зимнего сезона в регионе составляет 192 дня, при этом выявлен тренд на её сокращение со скоростью 0,8 дня/год. Одновременно с этим наблюдается увеличение продолжительности залегания снега (+0,5 дня/год) при ускорении фаз его установления (–0,3 дня/год) и разрушения (–0,4 дня/год), что свидетельствует о сложной региональной реакции снежного покрова на современные климатические изменения [13].

Однако, несмотря на широкое применение обоих подходов, сравнительный анализ данных метеорологических станций и спутниковых продуктов для оценки динамики снежного покрова на уровне конкретного региона (например, Ново-

сибирской области) остается актуальной задачей. С одной стороны, в работах по России в целом показано, что в Западной Сибири в начале XXI века наблюдалось сокращение продолжительности залегания снежного покрова, обусловленное как уменьшением твердых осадков, так и более ранним наступлением весны [7]. С другой стороны, существуют данные о региональном увеличении максимальных снегозапасов в этом макрорегионе [7]. Более того, некоторые исследования подчеркивают значительную пространственную и временную изменчивость плотности и толщины снега на территории России [14].

Цель настоящей работы – провести сравнительный анализ сроков установления и схода устойчивого снежного покрова на территории Новосибирской области за период 2000–2024 гг. по данным метеорологических станций и спутниковым данным MODIS, выявить основные закономерности и тренды, а также дать рекомендации по совместному использованию этих данных.

Территория исследования

Как и в [10,13] территория исследования охватывает Новосибирскую область, расположенную на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Климат Новосибирской области – континентальный с холодной продолжительной зимой (160–180 дней) и тёплым, относительно коротким летом [11,12]. Устойчивый снежный покров устанавливается, как правило, в первой половине ноября и разрушается в конце марта – начале апреля. За последние 20 лет в регионе зафиксированы значительные климатические изменения, в том числе в режиме снежного покрова [15]. Характерной особенностью региона является значительная межгодовая и пространственная изменчивость снежного покрова, обусловленная как циркуляционными факторами, так и особенностями рельефа и подстилающей поверхности.

В работе использованы данные шести метеорологических станций (из архива ВНИИГМИ-МЦД) [16], представляющих различные ландшафтные зоны региона: Барабинск, Огурцово, Татарск – лесостепные и степные, Маслянино, Болотное, Северное – лесные и предгорно-таежные ландшафты.

Спутниковая информация отбиралась и обрабатывалась средствами облачной платформы для геопространственного анализа больших данных Google Earth Engine (GEE) [17]. Поставленная задача решалась с использованием продукта MOD10A1 V6 Snow Cover Daily Global 500m (Terra/MODIS) [18].

Различия в растительном покрове, степени увлажнения и рельефе определяют пространственную неоднородность режима снежного покрова, что делает Новосибирскую область удобным полигоном для сравнительного анализа метеорологических и спутниковых данных [19].

Анализ проводился отдельно для дат схода (весенний период) и дат установления (осенне-зимний период) снежного покрова.

Результаты

Статистическая обработка данных за 25-летний период выявила устойчивую корреляцию между наземными и спутниковыми измерениями (табл. 1 и 2). В табл. 1 и 2 представлены среднемноголетние даты установления и разрушения

снежного покрова и статистические показатели: отклонение спутниковых данных от метеорологических, значения линейного тренда для метеорологических и спутниковых данных (изменение даты установления и разрушения снежного покрова в днях за 10 лет). Линейные тренды рассчитаны методом наименьших квадратов; их значимость оценивалась по критерию Стьюдента при доверительном уровне 0,9.

Средние даты установления снежного покрова соответствуют концу октября – началу ноября (дни от начала года 297–310). Самое раннее установление по спутнику в Болотном (297-й день), самое позднее по наземным данным в Татарске (310-й день). Спутник фиксирует установление на 5–7 дней раньше наземных станций. Это ожидаемо, так как MODIS обнаруживает даже неглубокий снежный покров, тогда как метеостанция требует определённой высоты и устойчивости.

Таблица 1. Среднемноголетние даты установления снежного покрова и статистические показатели

	Наземные данные	Спутниковые данные	Отклонение	Коэффициент корреляции	Тренд метео	Тренд спутник
Барабинск	04.11	30.10	–5,60	0,9	0,0	–0,50
Болотное	30.10	24.10	–5,40	0,9	–1,7	–1,40
Маслянино	01.11	26.10	–5,88	0,8	–1,7	0,18
Огурцово	04.11	28.10	–7,24	0,8	–0,9	0,30
Северное	27.10	25.10	–4,80	0,8	2,1	–2,60
Татарск	06.11	31.10	–6,12	0,8	–3,4	–1,50

Тренды: по наземным данным, за исключением Северного, отрицательные (установление снега наступает раньше), особенно в Татарске (–3,36) и Болотном (–1,70). Исключение составляет станция Северное, где по наземным данным отмечено запаздывание установления снежного покрова (+2,1 дня/10 лет), что может быть связано с локальными орографическими или микроклиматическими особенностями. По спутнику тренды слабее, а на двух станциях (Маслянино и Огурцово) положительные (0,18 и 0,35 дня/10 лет соответственно), что может отражать локальные особенности пунктов (например, влияние лесного полога, задерживающего тонкий снег, или методическую нестабильность маски снега MODIS в переходные сезоны). Исключение составляет станция Северное, где по наземным данным отмечено запаздывание установления снежного покрова (+2,1 дня/10 лет), что, вероятно, связано с локальными орографическими или микроклиматическими особенностями северных районов области.

Средние даты схода приходятся на первую-третью декаду апреля (дни от начала года 96–109). Самый ранний сход – в Барабинске и Татарске, самый поздний – в Маслянино и Болотном. Спутниковые данные фиксируют сход в среднем на 1–7 дней позже наземных. Наибольшее расхождение отмечено для Барабинска

(6,7 дня), наименьшее – для Огурцово (1 день). Среднее по всем пунктам расхождение составляет 4 дня. Это связано с пространственным разрешением продуктов MODIS (500 м) и разными критериями «полного исчезновения снега»: наземная станция фиксирует сход при сохранении отдельных пятен, спутник – только при полном отсутствии снега в пикселе, включая затенённые участки и впадины. На большинстве станций сход смещается к более ранним датам (от –1 до –3,8 дня за 10 лет). Наиболее раннее разрушение снега выражено в Болотном –3,8 дня/10 лет по наземным и – 3,5 дня/10 лет по спутниковым наблюдениям. Для Барабинска и Татарска метеотренды близки к нулю (+0,05 и +0,15), но спутниковые показывают заметное раннее снеготаяние: –1,3 и –2,6 дня/10 лет соответственно, возможно, из-за различий в критериях «схода» на открытой местности и на усреднённом пикселе, включающем элементы микрорельефа.

Таблица 2. Среднемноголетние даты схода снежного покрова и статистические показатели

	Наземные данные	Спутниковые данные	Отклонение	Коэффициент корреляции	Тренд метео	Тренд спутник
Барабинск	06.04	13.04	6,64	0,78	0,05	–1,3
Болотное	14.04	19.04	4,96	0,90	–3,80	–3,5
Маслянино	16.04	19.04	3,04	0,90	–2,80	–2,3
Огурцово	13.04	14.04	1,04	0,80	–2,30	–1,0
Северное	19.04	18.04	–0,88	0,80	–1,30	–3,4
Татарск	06.04	11.04	4,28	0,70	0,15	–2,6

Средние по шести станциям тренды разрушения снежного покрова составили –1,67 дня/10 лет по метеоданным и –2,14 дня/10 лет по спутниковым данным, что указывает на устойчивую тенденцию к более раннему разрушению снежного покрова в регионе. Количественная близость этих величин подтверждает принципиальную возможность совместного использования обоих типов данных для мониторинга региональных изменений.

Проведённый сравнительный анализ выявил как закономерные, так и неочевидные различия между данными метеорологических станций и спутниковыми продуктами MODIS при оценке характеристик снежного покрова в Новосибирской области в 2000–2024 гг. В целом, оба типа данных демонстрируют согласованную направленность климатических изменений – тенденцию к более раннему сходу снежного покрова и, хотя и менее выраженную, к более раннему его установлению. Однако величина и знак расхождений между ними не являются постоянными и зависят от сезона, географического положения пункта наблюдения и, вероятно, локальных ландшафтных условий.

При переходе к отдельным годам различия становятся значительными, особенно в осенний период, что накладывает ограничения на прямое объединение рядов без предварительной калибровки и учёта локальных условий. Спутниковые

данные MODIS являются ценным дополнением к наземным наблюдениям, позволяя оценивать пространственную неоднородность сроков установления и схода снега, но не могут полностью заменить метеорологическую сеть, особенно для изучения многолетней динамики в переходные сезоны.

Заключение

В работе выполнен сравнительный анализ сроков установления и схода устойчивого снежного покрова на территории Новосибирской области за период 2000–2024 гг. по данным шести метеорологических станций и спутниковым продуктам MODIS. Направленность климатических изменений, выявляемая по обоим типам данных, совпадает: наблюдается тенденция к более раннему сходу снежного покрова (в среднем $-0,17 \dots -0,20$ дня за 10 лет) и, с меньшей достоверностью, к более раннему его установлению. Это согласуется с опубликованными ранее результатами для Западной Сибири.

Количественные расхождения между спутниковыми и наземными данными носят систематический характер. При сходе снега спутниковые данные «запаздывают» на 1–7 дней (в среднем 4 дня) относительно наземных наблюдений. При установлении снежного покрова спутник, напротив, «опережает» наземные наблюдения на 5–7 дней. Эти различия обусловлены критериями детектирования, пространственным разрешением (500 м) и чувствительностью MODIS к тонкому снежному покрову.

Наибольшая сходимостр трендов (Болотное, Маслянино) характерна для лесных и предгорно-таёжных районов. Наибольшие расхождения (Барабинск, Татарск) отмечены для открытых лесостепных и степных ландшафтов, где локальные микроклиматические эффекты и методические различия проявляются сильнее.

Спутниковые данные не могут полностью заменить наземные наблюдения, особенно для исследования переходных сезонов (осень, весна), где маска снега MODIS становится нестабильной. Однако они позволяют восполнить пробелы в пространственной информации и дают возможность экстраполировать точечные метеорологические данные на региональный уровень. При совместном использовании двух типов данных рекомендуется вводить сезонные и региональные поправки. Для долгосрочных трендов допустимо объединение рядов. Полученные результаты могут быть использованы при гидрологическом прогнозировании (половодье), оценке рисков для сельского хозяйства, а также при валидации климатических моделей для территории юга Западной Сибири.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang, T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview // *Reviews of Geophysics*, 2005, 43(4).
2. Bormann K.J., Brown R.D., Derksen, C., Painter T.H. Estimating snow-cover trends from space // *Nature Climate Change*, 2018, 8(11), 924–928.
3. Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // *Криосфера Земли*. 2018. Т. XXII. № 4. С 65–75.

4. Popova, V. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes // *International Journal of Climatology*, 2007, 27(12), 1721-1733.
5. Истомина Е.А., Максютова Е.В. Возможность использования продукта MODIS «snow cover» для характеристики пространственной структуры снежного покрова Предбайкалья // *Лёд и Снег*. 2014. № 1 (125). С. 66–72.
6. Gafurov A., Vorogushyn S., Farinotti D., Duethmann D., Merkushev A., Merz B. Snow-cover reconstruction methodology for mountainous regions based on historic in situ observations and recent remote sensing data // *The Cryosphere*, 2015, 9(2), 451-463.
7. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI в. по спутниковым данным // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 1. С. 25–33.
8. Huang X., Deng J., Ma X., Wang Y., Feng Q., Hao X., Liang T. Spatio-temporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China // *The Cryosphere Discussions*, 2016, 1-21.
9. Cheval S., Dumitrescu A. The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. No. 96. P. 145-153.
10. Воронина П.В. Сроки установления и разрушения снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным // *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2024, Т.4, № 1, С. 69–77.
11. Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. – 121 с.
12. Западно-Сибирская низменность. – М.: География, 1963. – 262 с.
13. Воронина П.В. Пространственное распределение сроков установления снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным // *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2025, Т.4, № 1, С. 3–10.
14. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // *Лёд и Снег*, 2014, 54(4), 72-80.
15. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. – Москва, 2025. – 135 стр.
16. ВНИИГМИ-МЦД. Режим доступа: <http://www.meteo.ru> (дата обращения 01.07.2025).
17. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote sensing of Environment*. 2017. V. 202. pp. 18-27. doi:10.1016/j.rse.2017.06.031.
18. Hall D.K., Salomonson V.V., Riggs G.A. MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid. Version 6. // Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 2016.
19. Воронина Л.В., Гриценко А.Г. Климат и экология Новосибирской области. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 228 с.

© П. В. Воронина, 2026