

П. В. Воронина^{1,2}✉

Динамика снежного покрова на территории Новосибирской области по спутниковым данным

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. Исследование посвящено анализу сроков установления, залегания и разрушения снежного покрова в Новосибирской области за период 2000-2025 гг. на основе спутниковых данных MODIS. Выявлены тенденции сокращения продолжительности зимнего сезона (–0.8 дня/год), увеличения периода залегания снега (+0.5 дня/год) и ускорения фаз его установления (–0.3 дня/год) и разрушения (–0.4 дня/год). Результаты согласуются с глобальными трендами, но демонстрируют региональную специфику, обусловленную континентальным климатом и ростом зимних осадков.

Ключевые слова: MODIS, обработка спутниковых данных, устойчивый снежный покров, сроки установления и разрушения снежного покрова

P. V. Voronina^{1,2}✉

Snow cover dynamics on the Novosibirsk region from remote sensing data

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 the timing of snow cover establishment, occurrence and destruction in the Novosibirsk Region for the period 2000-2025 based on MODIS satellite data. Trends toward a shorter winter season (–0.8 days/year), an increase in the period of snow occurrence (+0.5 days/year), and an acceleration of the phases of its establishment (–0.3 days/year) and destruction (–0.4 days/year) have been identified. The results are consistent with global trends, but demonstrate regional specifics due to the continental climate and increased winter precipitation.

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

Введение

Период залегания устойчивого снежного покрова, установление его осенью и разрушение весной являются важными этапами годового цикла, оказывающими влияние на энергетический и водный обмены в системе «почва–атмосфера», на формирование гидрологического цикла, на существенные последствия для экосистем холодных регионов. В исследованиях [1–6] показано, что за последнюю четверть XX и начало XXI века в Северном полушарии произошло

значительное изменение продолжительности снежного сезона, уменьшились площади снега весной и летом (в горных районах) и увеличились осенью и зимой. Современные исследования подчеркивают, что сокращение снежного сезона в Северном полушарии достигло 1.91 дня/декаду [1, 7, 8]. Для Сибири характерна уникальная динамика, связанная с континентальным климатом и широтной зональностью [9, 10].

Распределение снежного покрова, запаздывание или опережение сроков его установления и разрушения влияют на водообеспеченность территории, режим рек, формирование весеннего половодья, пополнение подземных вод, вегетационный период сельскохозяйственных культур, экономическое и экологическое развитие территории.

Данные дистанционного зондирования перспективны для мониторинга снежного покрова в связи с их широким пространственным охватом и регулярностью съемки. Использование данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения Terra/MODIS несомненно обладает преимуществом, заключающемся в регулярной повторяемости съёмки и значительном охвате изучаемой, порой труднодоступной, территории [11, 12].

В работе рассматривается период залегания снега от первого дня начала его установления на территории Новосибирской области до последнего дня обнаружения снега весной с выделением сроков установления и разрушения снежного покрова в качестве отдельных показателей. Одной из основных задач работы является получение климатических характеристик сроков установления и разрушения снежного покрова – средних и стандартного отклонения за 2000–2025 гг. по спутниковым данным MODIS на территории Новосибирской области.

Территория и материалы исследования

Как и в [13] территорией исследования является Новосибирская область, располагающаяся на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. В Новосибирской области выражена весьма отчетливо широтная природно-климатическая зональность [9, 10, 14, 15].

В настоящей работе, как и в [16, 17], спутниковая информация отбиралась и обрабатывалась средствами облачной платформы для геопространственного анализа больших данных Google Earth Engine (GEE) [18]. Поставленная задача решалась с использованием продукта MOD10A1 V6 Snow Cover Daily Global 500m (Terra/MODIS) [19].

Обсуждение результатов

Климат Новосибирской области резко-континентальный, с холодной и продолжительной зимой, которая длится около полугода. Зимний сезон делится на три периода: установление снежного покрова, залегание снега и разрушение снежного покрова.

На рис. 1 представлена межгодовая изменчивость продолжительности зимнего сезона по спутниковым данным по Новосибирской области с зимы 2000-2001 гг. до зимы 2024-2025 гг. Средняя продолжительность сезона (на графике

это красная линия) составляет 192 дня. На рис. 1 показан тренд, который указывает на сокращение продолжительности зимнего периода на 0.8 дня/год.

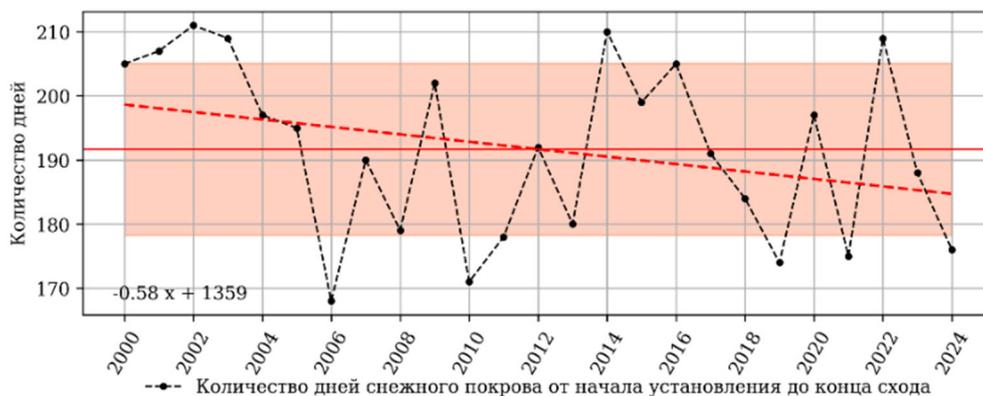


Рис. 1. Продолжительность зимнего периода на территории Новосибирской области с 2000 по 2025 гг.

Установление снежного покрова представляет собой этап годового цикла, с которым связаны процессы, протекающие между атмосферой и сушей. Период установления снежного покрова определяем со дня первого обнаружения снега на территории области до ее полного покрытия снегом. В Новосибирской области первый снег появляется в конце сентября на севере территории и в первой декаде ноября на юге. По первым дням обнаружения снежного покрова на территории с 2000 г. до 2025 г. вычислен средний день начала установления для Новосибирской области, аналогично определена средняя дата окончания процесса залегания снега. Средним периодом установления снежного покрова для Новосибирской области является промежуток с 16 октября по 9 ноября (25 дней). По количеству дней процесс установления снежного покрова определяется как быстрый или продолжительный (рис. 2).

В течение двух десятилетий прослеживается тенденция на более позднее начало установления снежного покрова и на более раннее его окончание, и в целом уменьшение длительности этого процесса по Новосибирской области [13].

Следующий этап зимы – это залегание снега – начинается, когда вся территория области становится покрытой снегом. В Новосибирской области оттепели редкое явление, не приводящее к таянию снега, поэтому зима протекает с устойчивым снежным покровом вплоть до начала его весеннего схода. Раннее установление снежного покрова предохраняет почву от глубокого промерзания. Средняя продолжительность залегания снежного покрова по Новосибирской области составляет 145 дней. По двум десятилетиям выделяется тенденция на увеличение периода залегания снега по Новосибирской области (рис. 3). Положительный тренд продолжительности залегания снега (+0.5 дня/год) связан с увеличением зимних осадков, что согласуется с исследованиями для Западной Сибири [20].

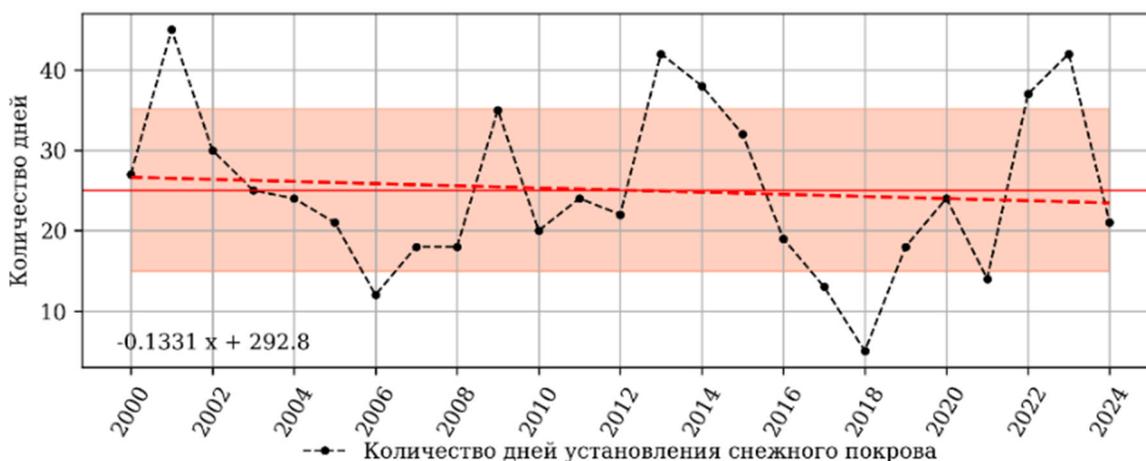


Рис. 2. Продолжительность установления снежного покрова по Новосибирской области

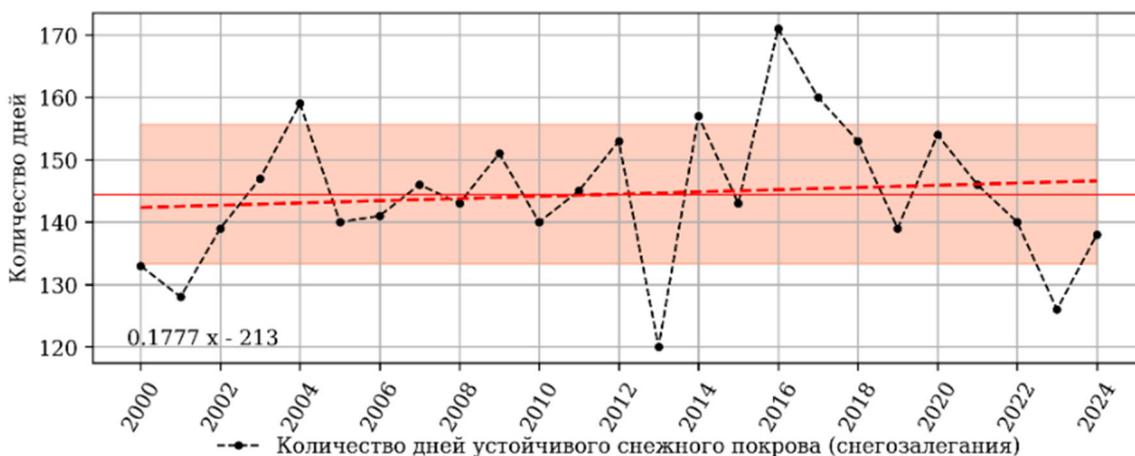


Рис. 3. Продолжительность залегания снега по Новосибирской области

Таяние снега в конце зимы это один из важнейших этапов сезонного цикла, влияющий на урожайность территории, ее водообеспеченность, формирование весеннего половодья. Опережение или запаздывание сроков схода снежного покрова территории может приводить к образованию аномалий атмосферной циркуляции в весенний период [21]. Процесс весеннего снеготаяния и разрушения устойчивого снежного покрова в Новосибирской области начинается в апреле и завершается окончательно в южных степных районах в конце апреля, в лесной зоне – в мае. Но в зависимости от характера зимних условий эти сроки могут сдвигаться на две недели или даже на месяц.

Продолжительность схода снежного покрова в среднем по Новосибирской области составляет 22 дня с 04.04 по 25.04 (рис. 4). Во второе десятилетие нынешнего столетия процесс разрушения снежного покрова по Новосибирской области лежит в промежутке средних значений, а построенный тренд показывает уменьшение продолжительности периода таяния снега (-0.4 дня/год).

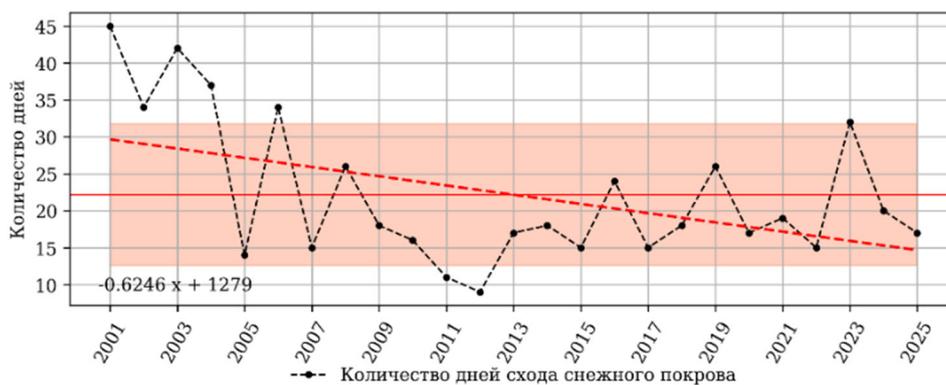


Рис. 4. Продолжительность разрушения снежного покрова по Новосибирской области

Использование спутниковых данных MODIS, примененное в данной работе, подтверждается результатами валидационных исследований. Как показано в работах [11, 12], продукты MODIS обеспечивают точность определения снежного покрова до 80–93%, что делает их надежным инструментом для мониторинга в условиях ограниченности наземных наблюдений. Однако, как отмечают в [7] и в [22], ключевым ограничением MODIS остается грубое разрешение (500 м), что может приводить к недооценке локальной изменчивости снежного покрова в горных и лесных регионах. Для Новосибирской области, характеризующейся равнинным рельефом, это ограничение менее критично, что повышает достоверность полученных результатов.

Проведенный анализ сроков установления и разрушения снежного покрова в Новосибирской области согласуется с глобальными и региональными тенденциями, выявленными в современных исследованиях. Так, сокращение продолжительности зимнего периода и смещение сроков схода снега наблюдаются во многих северных регионах Евразии, что связано с усилением весеннего потепления [2, 23]. Например, исследования [20, 23] демонстрируют значительное сокращение периода залегания снежного покрова на севере Евразии с середины XX века, обусловленное ростом температур и изменением циркуляционных процессов. Аналогичные тенденции раннего таяния снега зафиксированы в работе для Северного полушария, где сокращение снежного сезона достигает 1.91 дня/декаду из-за ускоренного схода снежного покрова.

Выявленная тенденция увеличения периода залегания снега при сокращении сроков его установления и разрушения требует дополнительного анализа. Подобные нелинейные изменения могут быть связаны с региональными климатическими аномалиями, такими как усиление зимних осадков, компенсирующих потепление, что отмечается в исследованиях по Западной Сибири [20, 24]. Кроме того, работа [25] подчеркивает роль атмосферных процессов, таких как Североатлантическое колебание, в формировании внутрисезонной изменчивости снежного покрова, что актуально для Новосибирской области, находящейся под влиянием континентальных воздушных масс.

Выявленное сокращение периода установления снега (-0.3 дня/год) соответствует глобальным тенденциям [26].

Заключение

Снежный покров может рассматриваться как один из наиболее чувствительных индикаторов изменения окружающей среды. Климатообразующая функция заключается в возможности снежного покрова оказывать влияние на распределение некоторых климатических показателей на той или иной территории. Являясь «продуктом» климата, сам снежный покров оказывает влияние на компоненты климата: распределение солнечной радиации, температуру, атмосферное давление, влажность, циркуляцию воздуха.

В результате проведенных исследований по выявлению сроков установления, залегания и схода снежного покрова по данным дистанционного зондирования по Новосибирской области с 2000 по 2025 гг. выявлена направленность на сокращение зимнего периода, при этом прослеживается тенденция на сокращение периодов установления и разрушения снежного покрова, но период залегания снега увеличивается.

Данные дистанционного зондирования перспективны для изучения пространственно-временной динамики распределения снежного покрова. Материалы космической съёмки дополняют и расширяют точечную информацию сети Гидрометеослужбы о появлении и сходе снежного покрова, позволяют построить пространственное распределение установления и разрушения снежного покрова по территории, особенно для той её части, которая не охвачена наземными наблюдениями. Снежный покров имеет значительное климатообразующее значение, а аномалии сроков установления и схода влияют на социально-экономическое состояние территории. Изучение распределения, установления и схода снежного покрова позволяет выявить, уточнить особенности климата, что важно для исследования и прогнозирования экологических процессов и их взаимодействия с двумя средами – атмосферой и почвой. Полученные в ходе такого исследования результаты могут послужить основой для районирования территории с целью ее хозяйственного освоения.

Полученные результаты вносят вклад в понимание региональных последствий глобального потепления для снежного покрова, дополняя выводы работ [2, 20]. Сокращение зимнего периода в Новосибирской области соответствует общемировым тенденциям, однако уникальность региона проявляется в сочетании увеличения продолжительности залегания снега с сокращением фаз его установления и разрушения. Это подчеркивает необходимость учета локальных климатических и ландшафтных особенностей при прогнозировании гидрологических и экологических последствий изменений климата [27, 28].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chen X., Liang Sh., Cao Y. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013 // Environ. Res. Lett. 11 (2016) 084002, doi:10.1088/1748-9326/11/8/084002.

2. Musselman, K.N., Clark, M.P., Liu, C., Ikeda, K. and Rasmussen, R. Slower snowmelt in a warmer world // *Nature Climate Change*. 2017. 7(3). pp. 214–219.
3. Allchin M.I., Déry S.J. A spatio-temporal analysis of trends in Northern Hemisphere snowdominated area and duration, 1971–2014 // *Annals of Glaciology* 58(75pt1), 2017, pp.21–35, doi: 10.1017/aog.2017.47.
4. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 // *Environ. Res. Lett.* 6 (2011) 045204 (10pp), doi:10.1088/1748-9326/6/4/045204.
5. Masloumidis I., Dafis S., Kyros G., Lagouvardos K., Kotroni V. Snow cover and depth climatology and trends in Greece // *Climate* 2025, 13, 34. doi:10.3390/cli13020034.
6. Li H., Zhong X., Zheng L., Hao X., Wang J., Zhang J. Classification of Snow Cover Persistence across China // *Water*, 2022, 14, 933. doi:10.3390/w14060933.
7. Notarnicola C. Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018 // *Remote Sensing of Environment*, 2020, 243, 111781.
8. Fugazza D., Manara V., Senese A., Diolaiuti G., Maugeri M. Snow cover variability in the Greater Alpine region in the MODIS Era (2000–2019) // *Remote Sens.* 2021, 13, 2945. doi:10.3390/rs13152945.
9. Кравцов В.М., Донукалова Р.П. География Новосибирской области. – Новосибирск: Инфолио-пресс, 1999. – 205 с.
10. Кузнецов А.В., Кузнецов Н.А. Охотничьи угодья Новосибирской области. – Новосибирск: Новосибирское книжное издательство, 1987. – 232 с.
11. 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.
12. 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.
13. 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. - ISSN 2618-981X.
14. Почвенно-климатический атлас Новосибирской области. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. – 121 с.
15. Западно-Сибирская низменность. – М.: География, 1963. – 262 с.
16. Melón-Nava, A. Recent Patterns and Trends of Snow Cover (2000–2023) in the Cantabrian Mountains (Spain) from Satellite Imagery Using Google Earth Engine // *Remote Sens.* 2024, 16, 3592. doi:10.3390/rs16193592.
17. Zhang Y., Ye C., Yang R., Li K. Reconstructing Snow Cover under Clouds and Cloud Shadows by Combining Sentinel-2 and Landsat 8 Images in a Mountainous Region // *Remote Sens.* 2024, 16, 188. doi:10.3390/rs16010188
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Вильфанд Р.М., Садоков В.П., Тищенко В.А. О связи границы снежного покрова с интенсивностью циклонической деятельности в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 9. С. 32–39.

22. Bormann K.J., Brown R.D., Derksen C., Painter T.H. Estimating snow-cover trends from space // *Nature Climate Change*, 2018, doi:10.1038/s41558-018-0318-3.
23. Попова В.В., Полякова И.А. Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Лёд и Снег*. 2013. № 2 (122). С. 29–39.
24. Попова В.В., Морозова П.А., Титкова Т.Б., Семенов В.А., Черенкова Е.А., Ширяева А.В., Китаев Л.М. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 4. С. 73–86.
25. Song L., Wu R. Intraseasonal Snow Cover Variations Over Western Siberia and Associated Atmospheric Processes // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124, 8994–9010. doi:10.1029/2019JD030479.
26. Guo H., Wang X., Guo Z., Zhu G., Che T., Wang J., Huang X., Han C., OuYang Z. Review of snow phenology variation in the Northern Hemisphere and its relationship with climate and vegetation // *The Cryosphere*, 2022, doi:10.5194/tc-2022-229.
27. Barnhart, T.B., Molotch, N.P., Livneh, B., Harpold, A.A., Knowles, J.F. and Schneider, D. Snowmelt rate dictates streamflow // *Geophysical Research Letters*. 2016. 43(15). pp. 8006–8016.
28. Beniston, M. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps // *Journal of Hydrology*. 2012. 412. pp. 291–296.

© П. В. Воронина, 2025