

## Районирование территории Архангельской области по условиям схода снежного покрова в период активного снеготаяния: 11-летний анализ по данным MODIS (2014–2024)

А. Л. Минеев, Е. В. Полякова, Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова, И. Н. Болотова

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, 163020, Россия  
E-mail: mineew.al@gmail.com*

Представлены результаты анализа пространственно-временной изменчивости снежного покрова на территории Архангельской области в период активного снеготаяния (апрель) за 2014–2024 гг. Исходными данными послужили продукты MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутник Terra), на основе которых рассчитаны медианные значения доли покрытия снегом SCF (*англ.* Snow Cover Fraction) для каждого года. Для устранения влияния водных объектов использованы данные Dynamic World. На первом этапе выполнена нормализация стандартной Z-оценкой относительно среднеобластных показателей каждого года, что позволило привести данные разных лет к сопоставимому виду. На втором этапе введена широтная поправка с применением линейной регрессии — таким образом итоговые значения отражают локальные отклонения от широтной нормы, а не общую тенденцию север-юг. На основе «очищенных» данных рассчитана средняя величина отклонений и их повторяемость за 11-летний период. Выполнено районирование территории по классам устойчивого дефицита (отрицательные отклонения) и профицита (положительные отклонения) снежного покрова. Установлено, что пространственное распределение выделенных классов тесно связано с формами рельефа: отрицательные аномалии приурочены к крутым, прогретым склонам и поймам рек, положительные — к плато и низменностям.

**Ключевые слова:** снежный покров, MODIS, дистанционное зондирование, Архангельская область

Одобрена к печати: 10.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-162-170

### Введение

Снежный покров считается одним из наиболее чувствительных индикаторов климатических изменений, играя ключевую роль в формировании водного баланса, теплового режима почв и в функционировании экосистем бореальных и арктических регионов (Тихонов и др., 2021; Rantanen et al., 2022). Исследования показывают, что за последние десятилетия в Северном полушарии произошло смещение сроков схода снега на более ранние даты, сокращение продолжительности залегания снежного покрова и уменьшение его площади (Варламова, Соловьев, 2024; Chen et al., 2021; Déry et al., 2005).

Особую значимость анализ характеристик снежного покрова приобретает в весенний период, когда происходит активное снеготаяние, во многом определяющее гидрологический режим территории, сроки начала вегетационного сезона и в конечном счёте продуктивность растительных сообществ (Симонова, 2023; Yang et al., 2022). Как показано в работе (Тихонов и др., 2021), применение алгоритмов восстановления характеристик снежного покрова в зоне хвойных лесов требует использования методов, основанных на данных оптического диапазона. В качестве таких данных может выступать нормализованный разностный снежный индекс NDSI (*англ.* Normalized Difference Snow Index) и производные от него продукты, такие как доля покрытия снегом SCF (*англ.* Snow Cover Fraction), полученные с помощью спектро-радиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Пьянков, Шихов, 2016; Hall, Riggs, 2007; Hall et al., 2002).

Архангельская область, расположенная на северо-западе России в подзонах северной и средней тайги, представляет собой репрезентативный регион для изучения пространствен-

но-временной изменчивости схода снежного покрова. Территория характеризуется значительной широтной протяжённостью и наличием положительных и отрицательных локальных форм рельефа, которые на фоне общего равнинного характера местности могут создавать условия для перераспределения снежного покрова. Существующие исследования вносят существенный вклад в понимание процессов снеготаяния: в работе (Лупян и др., 2018) на примере Московской области показана возможность выявления локальных зон раннего схода снега, а в исследовании (Варламова, Соловьев, 2024) выполнен детальный анализ региональных закономерностей снеготаяния на обширной территории Сибири. Однако методологический подход, позволяющий разделить вклад широтного градиента (естественного увеличения снежности с юга на север) и локальных факторов (рельефа, растительности, микро-климатических условий) в формирование картины снеготаяния, до настоящего времени для территории Архангельской области не применялся.

Цель настоящего исследования — выполнить районирование территории Архангельской области по условиям схода снежного покрова в период активного снеготаяния (апрель) на основе 11-летних данных MODIS (2014–2024) с применением двухэтапной процедуры нормализации, включающей стандартную  $Z$ -оценку и широтную поправку.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) сформировать временные ряды медианных значений SCF за апрель для каждого года исследуемого периода с маскированием водных объектов;
- 2) выполнить нормализацию данных с помощью стандартной  $Z$ -оценки для приведения разных лет к сопоставимому виду;
- 3) осуществить регрессионный анализ зависимости стандартной  $Z$ -оценки от широты и рассчитать остатки, отражающие локальные отклонения от широтной нормы;
- 4) оценить для каждого пикселя среднюю многолетнюю величину отклонения и повторяемость;
- 5) провести классификацию территории по степени устойчивости и интенсивности отрицательных (дефицит снега) и положительных (профицит снега) отклонений;
- 6) выявить связь пространственного распределения выделенных классов с формами рельефа.

## Материалы и методы

В работе использованы данные спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Terra, — продукт MOD10A1 версии 6.1. Продукт MOD10A1 представляет собой ежедневные изображения с пространственным разрешением 500 м, содержащие значения нормализованного разностного снежного индекса NDSI и доли покрытия снегом SCF. Для анализа отобраны сцены за апрель 2014–2024 гг. Выбор апреля обусловлен тем, что в Архангельской области этот месяц приходится на период активного снеготаяния, когда пространственная неоднородность схода снежного покрова проявляется наиболее контрастно.

Для маскирования водных объектов использован продукт Dynamic World (Brown et al., 2022), представляющий собой набор данных о типах земного покрова с пространственным разрешением 10 м, созданный на основе временных рядов снимков Sentinel-2. Из коллекции отобраны сцены за летний период 2023 г. (июнь — август), как наиболее репрезентативные для идентификации открытых водных поверхностей. На основе этих данных сформирована бинарная маска водных объектов посредством выделения пикселей, соответствующих классу «вода».

Обработка спутниковых данных выполнена на платформе Google Earth Engine. На первом этапе для каждого года исследуемого периода (2014–2024) сформирована коллекция снимков MOD10A1 за апрель по границам исследуемого региона. На втором этапе выполнено маскирование водных объектов. На третьем этапе для каждого года рассчитан медианный композит SCF по всем сценам апреля, прошедшим маскирование. Медианный композит представляет собой объединение всех сцен коллекции, в котором результирующее значение

каждого пикселя рассчитывается как медиана всех доступных наблюдений за заданный временной интервал. Использование медианы вместо среднего значения позволило минимизировать влияние остаточной облачности и случайных выбросов. На четвёртом этапе выполнено  $Z$ -преобразование полученных медианных композитов. Для каждого года рассчитывались среднее арифметическое и стандартное отклонение SCF по всем пикселям в границах Архангельской области. Затем для каждого пикселя вычислялась  $Z$ -оценка:

$$Z_{i,j,y} = \frac{SCF_{i,j,y} - \overline{SCF}_y}{\sigma_{SCF_y}},$$

где  $i, j$  — координаты пикселя;  $y$  — год;  $\overline{SCF}_y$  — среднее значение;  $\sigma_{SCF_y}$  — стандартное отклонение SCF по области за год  $y$ .

Полученные  $Z$ -оценки характеризуют отклонение снежности каждого пикселя от средне-областного уровня в конкретном году в единицах стандартного отклонения. Эта процедура позволила привести данные разных лет к сопоставимой шкале, нивелировав межгодовые различия в общей снежности региона.

Далее обработка полученных в Google Earth Engine растров выполнена в среде R версии 4.3.3 с использованием пакетов terra, tidyverse, tmap и patchwork.

Первичный анализ показал наличие выраженной зависимости  $Z$ -оценок от широты (рис. 1), что отражает естественный широтный градиент снежности: на севере области снег сходит позже, на юге — раньше. Поскольку цель исследования заключалась в выявлении локальных отклонений, не связанных с широтной зональностью, выполнена процедура широтной поправки. Для каждого года построена модель линейной регрессии:

$$Z_{i,j,y} = a_y + b_y Y_{i,j} + \varepsilon_{i,j,y},$$

где  $Z_{i,j,y}$  —  $Z$ -оценка SCF для пикселя с координатами  $(i, j)$  в году  $y$ ;  $Y_{i,j}$  — широта центра пикселя  $(i, j)$ ;  $a_y$  — свободный член регрессионной модели года  $y$ ;  $b_y$  — коэффициент регрессии, показывающий изменение  $Z$ -оценки на единицу широты для года  $y$ ;  $\varepsilon_{i,j,y}$  — остатки модели.

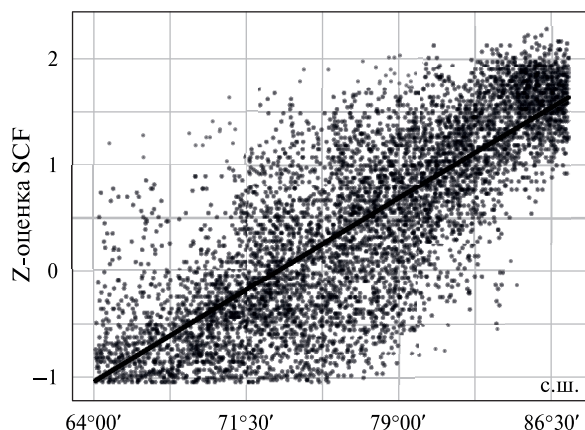


Рис. 1. Зависимость  $Z$ -оценки SCF от широты

Остатки регрессии ( $\varepsilon_{i,j,y}$ ) интерпретировались как локальные отклонения от широтной нормы: положительные значения соответствуют более высокой доле снежного покрытия относительно ожидаемой для данной широты (профицит снега), отрицательные — более низкой доле (дефицит снега).

Таким образом, под локальной *аномалией снежного покрова* в настоящем исследовании понимается разность между фактическим значением доли покрытия снегом SCF в конкретном пикселе и значением, ожидаемым исходя из широтной нормы, выраженной в единицах стандартного отклонения.

На основе очищенных от широтной зональности аномалий для каждого пикселя рассчитаны следующие показатели:

1. Средняя многолетняя аномалия:  $\overline{\varepsilon_{i,j}} = \frac{1}{n} \sum_{y=1}^n \varepsilon_{i,j,y}$ , где  $n$  — количество лет наблюдений (11 в данном исследовании).
2. Повторяемость отрицательных аномалий:  $f_{i,j}^- = \text{count}(\overline{\varepsilon_{i,j}} < 0) / n$ , где  $\text{count}(\overline{\varepsilon_{i,j}} < 0)$  — количество лет с отрицательной аномалией в пикселе.
3. Повторяемость положительных аномалий:  $f_{i,j}^+ = \text{count}(\overline{\varepsilon_{i,j}} > 0) / n$ , где  $\text{count}(\overline{\varepsilon_{i,j}} > 0)$  — количество лет с положительной аномалией в пикселе.

Под *повторяемостью аномалии* в настоящем исследовании понимается доля лет, в которых наблюдалась аномалия, от общего периода наблюдений. Для выделения зон с устойчивыми аномалиями снеготаяния выполнена классификация пикселей на основе сочетания среднего значения аномалии с её повторяемостью (табл. 1, 2).

Таблица 1. Классы дефицита снежного покрова

Класс	Описание	Условия
1	Слабый периодический дефицит	$-0,5 < \overline{\varepsilon_{i,j}} < 0$ и $f_{i,j}^- \geq 0,5$
2	Умеренный регулярный дефицит	$-1,0 < \overline{\varepsilon_{i,j}} \leq -0,5$ и $f_{i,j}^- \geq 0,7$
3	Сильный постоянный дефицит	$\overline{\varepsilon_{i,j}} \leq -1,0$ и $f_{i,j}^- \geq 0,8$

Таблица 2. Классы профицита снежного покрова

Класс	Описание	Условия
1	Слабый периодический профицит	$0 < \overline{\varepsilon_{i,j}} < 0,5$ и $f_{i,j}^+ \geq 0,5$
2	Умеренный регулярный профицит	$0,5 \leq \overline{\varepsilon_{i,j}} < 1,0$ и $f_{i,j}^+ \geq 0,7$
3	Сильный постоянный профицит	$\overline{\varepsilon_{i,j}} \geq 1,0$ и $f_{i,j}^+ \geq 0,8$

Граничные значения классов выбраны эмпирически на основе анализа распределения среднего значения аномалии. Учёт повторяемости позволяет исключить из рассмотрения случайные (эпизодические) аномалии и выделить только устойчивые пространственные шаблоны.

## Результаты

На рис. 2 (см. с. 166) представлены основные результаты районирования территории Архангельской области по условиям схода снежного покрова в апреле 2014–2024 гг.

Пространственное распределение среднесноголетних аномалий демонстрирует чёткую связь с формами рельефа. Отрицательные значения (дефицит снега) приурочены к прогретым склонам южной и восточной экспозиции, а также к поймам рек, где снег сходит в первую очередь. Положительные значения (профицит снега) тяготеют к платообразным возвышенностям, плоским водоразделам и участкам с пониженным дренажом. Амплитуда среднесноголетних отклонений составляет от  $-3$  до  $+2,9\sigma$ .

Анализ полученных классов по доле занимаемой площади показывает, что территория Архангельской области практически поровну разделена между зонами устойчивого дефицита и профицита снежного покрова. Зоны дефицита занимают 49 % территории, зоны про-

фицита — 51 %. В структуре дефицита преобладают слабые периодические аномалии (32 %). Умеренный регулярный дефицит охватывает 15 % территории, а сильный постоянный дефицит — 3 %. В структуре профицита также доминируют слабые периодические аномалии (36 %). Умеренный регулярный профицит занимает 11 % территории, а сильный постоянный профицит — 4 %. Таким образом, слабые периодические аномалии обоих знаков в сумме покрывают 68 % территории области, формируя основной фон пространственной неоднородности снеготаяния. Умеренные регулярные аномалии занимают 26 % территории, а сильные постоянные — лишь 7 %. При этом сильные аномалии дефицита и профицита представлены сопоставимыми по площади участками (3 и 4 % соответственно) и приурочены к наиболее контрастным элементам рельефа.

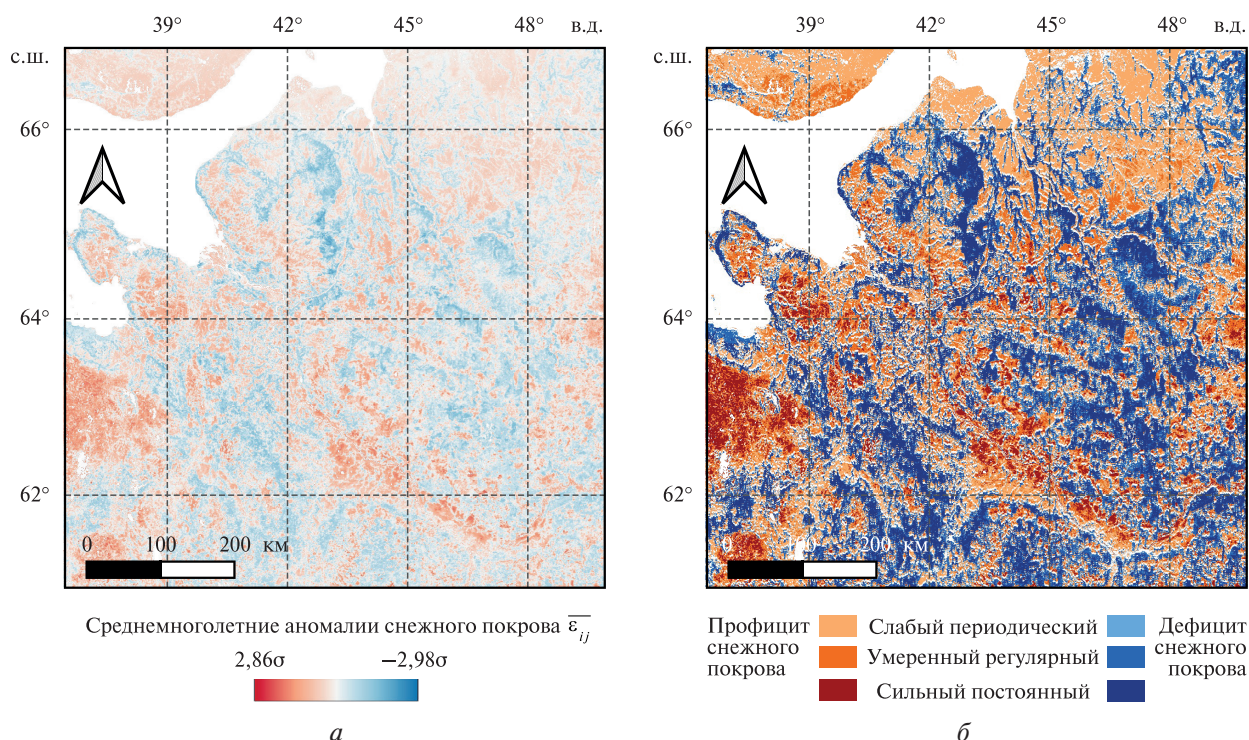


Рис. 2. Результаты исследования: *a* — распределение среднееголетних аномалий  $\{\overline{\varepsilon_{i,j}}\}$ , рассчитанных за 11-летний период; *b* — районирование территории Архангельской области по классам устойчивого дефицита и профицита снежного покрова

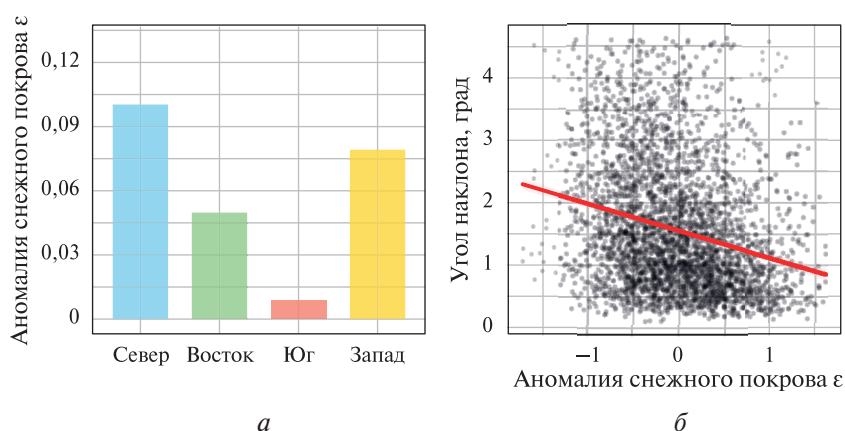


Рис. 3. Связь локальных аномалий снежного покрова с геоморфометрическими параметрами рельефа: *a* — распределение средней аномалии в зависимости от экспозиции склонов; *b* — зависимость аномалий от угла наклона

Количественный анализ связи аномалий с экспозицией склонов (рис. 3, см. с. 166) подтверждает, что наиболее выраженный дефицит снега наблюдается на склонах южной и восточной экспозиции, получающих максимальную солнечную радиацию в весенний период. На склонах северной экспозиции, напротив, наблюдается профицит снежного покрова. Зависимость аномалий от крутизны склонов носит обратный характер: с увеличением угла наклона местности аномалия закономерно снижается, переходя от профицита на равнинных участках к устойчивому дефициту на крутых склонах.

Выявленная связь пространственного распределения аномалий с рельефом согласуется с известными представлениями. На возвышенных участках (плато, плоские водоразделы) снегонакопление, как правило, выше за счёт меньшего ветрового выдувания и более низкой температуры, что обуславливает устойчивый профицит. На крутых склонах, особенно южных экспозиций, снеготаяние ускоряется благодаря повышенной инсоляции, что приводит к формированию устойчивого дефицита. В поймах рек ранний сход снега может быть связан как с обогревающим влиянием водных масс, так и с особенностями микрорельефа. Полученные результаты хорошо согласуются с наблюдениями (Лупян и др., 2018) за существованием локальных зон раннего снеготаяния, не связанных с антропогенными факторами, а также с выводами (Симонова, 2023) о значимости рельефа и экспозиции склонов для формирования неоднородностей снежного покрова в высоких широтах.

## Обсуждение

Предложенный двухэтапный подход к нормализации спутниковых данных ( $Z$ -преобразование с последующей широтной поправкой) позволяет эффективно выделять устойчивые локальные аномалии снежного покрова на региональном уровне. Ключевым преимуществом методики следует считать возможность разделить вклад широтного градиента, обусловленного климатической зональностью, и локальных факторов (рельефа, экспозиции склонов, характера подстилающей поверхности). Полученные остатки регрессии, интерпретируемые как локальные аномалии снежного покрова, демонстрируют чёткую пространственную структуру, устойчиво воспроизводящуюся на протяжении всего 11-летнего периода наблюдений.

Результаты согласуются с основными выводами исследования (Горный и др., 2021), выполненного для территории Северной Евразии по данным MODIS, которое показало, что вместо ожидаемого монотонного повышения температуры подстилающей поверхности наблюдается регулярная система обширных областей нагрева и остывания. Авторы связывают этот феномен с активизацией процессов общей циркуляции атмосферы и реакцией лесных экосистем на изменение климата. Районирование территории Архангельской области по классам устойчивого дефицита и профицита снежного покрова демонстрирует аналогичную пространственную неоднородность: вместо плавного широтного градиента наблюдается мозаичная структура, приуроченная к локальным формам рельефа. Это позволяет предположить, что выявленная в работе (Горный и др., 2021) термодинамическая неоднородность подстилающей поверхности может быть одним из факторов, модулирующих снеготаяние на локальном уровне.

Необходимо отметить ряд ограничений проведённого исследования. Во-первых, данные MODIS с разрешением 500 м не позволяют детектировать аномалии меньшего масштаба. Во-вторых, 11-летний ряд наблюдений видится относительно коротким для выявления устойчивых климатических трендов, хотя и достаточным для картирования повторяющихся пространственных шаблонов. В-третьих, предложенная методика не разделяет вклад различных факторов (ветрового перераспределения, различий в снегонакоплении, интенсивности таяния) в формирование итоговой аномалии, что требует постановки дополнительных натуральных наблюдений.

## Заключение

В результате исследования выполнено районирование территории Архангельской области по условиям схода снежного покрова в период активного снеготаяния на основе 11-летних данных MODIS. Установлено, что зоны устойчивого дефицита снега занимают 49 % территории, зоны профицита — 51 %. Выявлена чёткая связь аномалий с рельефом: дефицит приурочен к крутым склонам южной и восточной экспозиции и поймам рек, профицит — к платообразным возвышенностям и плоским водоразделам. Полученные результаты могут быть использованы при разработке региональных гидрологических моделей и прогнозировании весеннего половодья.

Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН № гос. регистрации 125022502869-4.

## Литература

1. Варламова Е. В., Соловьев В. С. Региональные особенности схода снежного покрова в Сибири в условиях быстрого потепления Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 284–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-284-297.
2. Горный В. И., Киселев А. В., Крицук С. Г. и др. Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 155–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
3. Лупян Е. А., Бурцев М. А., Крашенинникова Ю. С. Зона раннего схода снежного покрова в Дмитровском районе Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 277–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-277-281.
4. Пьянков С. В., Шихов А. Н. Моделирование пространственного распределения снегозапасов на крупном водосборе с применением спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 29–41. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-29-41.
5. Симонова К. И. Анализ влияния снеготаяния на межгодовую и сезонную динамику растительности в дельте реки Лены // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 205–216. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-205-216.
6. Тихонов В. В., Соколова Ю. В., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю. О возможности восстановления снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 47–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-47-64.
7. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B. et al. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping // Scientific Data. 2022. V. 9(1). Article 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
8. Chen X., Yang Y., Ma Y., Li H. Distribution and attribution of terrestrial snow cover phenology changes over the Northern Hemisphere during 2001–2020 // Remote Sensing. 2021. V. 13(9). Article 1843. DOI: 10.3390/rs13091843.
9. Déry S. J., Stieglitz M., McKenna E. C., Wood E. F. Characteristics and trends of river discharge into Hudson, James, and Ungava Bays, 1964–2000 // J. Climate. 2005. V. 18(14). P. 2540–2557. DOI: 10.1175/JCLI3440.1.
10. Hall D. K., Riggs G. A. Accuracy assessment of the MODIS snow products // Hydrological Processes. 2007. V. 21(12). P. 1534–1547. DOI: 10.1002/hyp.6715.
11. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. et al. MODIS snow-cover products // Remote sensing of Environment. 2002. V. 83(1–2). P. 181–194. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00095-0.
12. Rantanen M., Karpechko A. Yu., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Communications Earth and Environment. 2022. V. 3(1). Article 168. 10 p. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
13. Yang T., Li Q., Zou Q. et al. Impact of snowpack on the land surface phenology in the Tianshan Mountains, Central Asia // Remote Sensing. 2022. V. 14(14). Article 3462. DOI: 10.3390/rs14143462.

## Zoning of Arkhangelsk Region by snow cover disappearance conditions during active snowmelt period: An 11-year analysis based on MODIS data (2014–2024)

A. L. Mineev, E. V. Polyakova, Yu. G. Kutinov, Z. B. Chistova, I. N. Bolotova

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS  
Arkhangelsk 163020, Russia  
E-mail: mineew.al@gmail.com*

The paper presents the results of an analysis of the spatial and temporal variability of snow cover in Arkhangelsk Region during active snowmelt period (April) from 2014 to 2024. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products were used as initial data to calculate median snow cover fraction (SCF) values for each year. Dynamic World data were applied to mask out water bodies. At the first stage, normalization using a standard Z-score relative to the regional mean values of each year was performed, which made it possible to harmonize data from different years. At the second stage, a latitudinal correction was introduced using linear regression, so that the final values reflected local deviations from the latitudinal norm rather than the general north–south trend. Based on the de-trended data, the mean anomaly values and their recurrence over the 11-year period were calculated. The territory was zoned into classes of persistent snow cover deficit (negative anomalies) and surplus (positive anomalies). The spatial distribution of the identified classes is found to be closely related to landforms: negative anomalies are confined to steep, sun-exposed slopes and river floodplains, while positive anomalies are associated with plateaus and lowlands.

**Keywords:** snow cover, MODIS, remote sensing, Arkhangelsk Region

Accepted: 10.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-162-170

### References

1. Varlamova E. V., Solovyev V. S., Regional features of snow cover disappearance in Siberia under fast Arctic warming, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 284–297 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-284-297.
2. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G. et al., Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of Northern Eurasia to climate change, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 155–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
3. Loupian E. A., Burtsev M. A., Krasheninnikova Yu. S., Snow cover early melting zone in Dmitrov District of the Moscow Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 2, pp. 277–281 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-277-281.
4. Pyankov S. V., Shikhov A. N., Modeling the spatial distribution of snow cover on a large catchment area using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 4, pp. 29–41 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-29-41.
5. Simonova K. I., Effects of snowmelt on seasonal and interannual vegetation dynamics in the Lena Delta, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 205–216 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-205-216.
6. Tikhonov V. V., Sokolova Yu. V., Boyarskii D. A., Komarova N. Yu., On the possibility of retrieving snow water equivalent from satellite microwave radiometry data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 5, pp. 47–64 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-47-64.
7. Brown C. F., Brumby S. P., Guzder-Williams B. et al., Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping, *Scientific Data*, 2022, V. 9(1), Article 251, DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
8. Chen X., Yang Y., Ma Y., Li H., Distribution and attribution of terrestrial snow cover phenology changes over the Northern Hemisphere during 2001–2020, *Remote Sensing*, 2021, V. 13(9), Article 1843, DOI: 10.3390/rs13091843.
9. Déry S. J., Stieglitz M., McKenna B. C., Wood E. F., Characteristics and trends of river discharge into Hudson, James, and Ungava Bays, 1964–2000, *J. Climate*, 2005, V. 18(14), pp. 2540–2557, DOI: 10.1175/JCLI3440.1.

10. Hall D. K., Riggs G. A., Accuracy assessment of the MODIS snow products, *Hydrological Processes*, 2007, V. 21(12), pp. 1534–1547, DOI: 10.1002/hyp.6715.
11. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. et al., MODIS snow-cover products, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 83(1–2), pp. 181–194, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00095-0.
12. Rantanen M., Karpechko A. Yu., Lipponen A. et al., The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979, *Communications Earth and Environment*, 2022, V. 3(1), Article 168, 10 p., DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
13. Yang T., Li Q., Zou Q. et al., Impact of snowpack on the land surface phenology in the Tianshan Mountains, Central Asia, *Remote Sensing*, 2022, V. 14(14), Article 3462, DOI: 10.3390/rs14143462.