

Оценка изменений площади снежного покрова в Казахстане с 2000 по 2022 год

А. М. Кауазов¹, Т. А. Тиллякарим^{1,2}, В. Г. Сальников¹, С. Е. Полякова¹

¹ *Казахский национальный университет имени аль-Фараби
Алматы, 050040, Казахстан
E-mail: kauazov.azamat@kaznu.kz*

² *РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан
E-mail: tillakarim_r@meteo.kz*

Приведены результаты исследования современных изменений площади снежного покрова (*англ.* snow cover area — SCA) на территории Казахстана за период с 2000 по 2022 г. Использовались спутниковые данные NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) в виде продукта NDSI (*англ.* Normalized Difference Snow Index — нормализованный разностный снежный индекс) Terra/MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Corrected Reflectance пространственным разрешением 1 км. Показана карта динамики схода снежного покрова в 2022 г. Продемонстрирована значительная межгодовая изменчивость площади снежного покрова. Рассмотрена сравнительная динамика и тенденции снеготаяния в первой декаде марта и апреля за период 2000–2022 гг. В среднем SCA на первую декаду марта и апреля составляет соответственно 74 и 30 % от площади исследуемой территории. Обнаружен короткопериодный тренд на повышение площади снежного покрова в 2004–2011 гг. Проанализированы статистические параметры снеготаяния по двум периодам: 2000–2010 и 2011–2022 гг. Показано уменьшение площади в последнем периоде, в частности средней площади, первого и второго квартала, как в апреле, так и в марте. По фактическим данным за период с 2000 по 2022 г. выявлена статистически незначимая слабая тенденция к сокращению площади снежного покрова на 4 % на каждые 10 лет.

Ключевые слова: снежный покров, площадь, NDSI, SCA, снеготаяние, дистанционное зондирование, изменение климата, Казахстан

Одобрена к печати: 01.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-298-305

Введение

Казахстан относится к странам с резко континентальным климатом. В северной половине республики продолжительность холодного периода достигает полугода. Соответственно, устойчивый снежный покров в Казахстане преимущественно наблюдается в северной половине. При этом сельское хозяйство в северной части Казахстана в основном ориентировано на выращивание яровых зерновых культур. Озимые культуры не возделываются вследствие суровых зим. Яровые произрастают в подавляющем большинстве на богаре, т. е. не орошаются, и поэтому очень чувствительны к увлажнению. Казахстан относится к зоне недостаточного увлажнения и, как следствие, к зоне рискованного земледелия. Поэтому снежный покров как аккумулятор зимних осадков очень важен для растениеводства и пастбищного животноводства. Наиболее продолжительное залегание снежного покрова наблюдается на территории Акмолинской, Костанайской и Северо-Казахстанской областей, а также в горных районах востока и юго-востока Казахстана (Климат..., 2006; Республика..., 2006).

Известно, что запас воды в снежном покрове определяет весеннее увлажнение почвы в предпосевной период, а недостаточное количество снега может быть причиной засух. В ряде исследований (Локощенко, 2005; Попова, 2004) показана возможность прогноза засух на основании высоты залегания и положения границы схода снежного покрова в весенний период. В. В. Попова (2004) установила, что после раннего схода снежного покрова наблюдаются сильные засухи. Наоборот, когда имело место позднее таяние снега (границы снежного покрова южнее обычной), засухи не было: поздний сход снежного покрова обуславливает достаточное количество осадков в весенне-летний период.

При этом большинство рек Казахстана относится к рекам так называемого казахстанского типа, когда талые снеговые воды становятся основным источником питания, формируя подавляющую часть речного стока. Вместе с тем весеннее таяние снега обуславливает паводки, повышает риски наводнений и чрезвычайных ситуаций (ЧС), а также определяет режим обводнения (Терехов, Пак, 2019; Терехов и др., 2019). В Казахстане регулярный космический мониторинг схода снежного покрова осуществляется с 2000 г. (Кауазов и др., 2011). Достигнуты определённые результаты в области сезонного и многолетнего мониторинга снежного покрова по данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) (Кауазов, 2010; Кауазов и др., 2010; Терехов, 2018; Терехов и др., 2019, 2020). Исследуется многолетняя изменчивость снежного покрова, отмечается тенденция к раннему сходу (Кауазов и др., 2016; Сальников и др., 2015). Однако представленные данные ограничиваются периодом до 2015 г. Кроме того, на отдельных территориях Евразии учащаются аномалии в залегании и таянии снежного покрова, отмечаются бесснежные периоды (Кауазов и др., 2011; Китаев, Кислов, 2008; Лупян и др., 2016, 2018).

Фактически, снежный покров (его границы залегания, высота и продолжительность залегания) выступает чувствительным индикатором изменения климата (Котляков, 1994). В этой связи интересно рассмотреть современные изменения снежного покрова в Казахстане. Цель настоящей работы заключается в исследовании текущих изменений снежного покрова.

Данные и методика

В работе для оценки площади снежного покрова были использованы данные NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) в виде продукта NDSI (*англ.* Normalized Difference Snow Index — нормализованный разностный снежный индекс) Terra/Aqua MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Corrected Reflectance пространственным разрешением 1 км на период март — апрель с 2000 по 2022 г. (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>). Данный продукт уже включает выделенные границы снежного покрова, по которым рассчитывалась занятая снежным покровом площадь. Пиксель считается покрытым снегом, если доля снежного покрова превышает 50 %. Поэтому в настоящей работе использованы данные NDSI с долей снежного покрова в пикселе 60 % и более.

Мониторинг снеготаяния можно условно разделить на три уровня: 1) оперативный (ежедневное картирование границ снежного покрова); 2) сезонный (мониторинг снеготаяния в зимне-весенний сезон); 3) межсезонный (сравнительный анализ снеготаяния в разные годы) (Спивак, 2010). Оперативный мониторинг снежного покрова, в частности определение его границ, в настоящее время легко выполняется с применением NDSI (Нейштадт, 2006; Hall et al., 1995). В данной работе использован стандартный продукт NDSI (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

Традиционно для оценки климата, и в частности продолжительности залегания снежного покрова, в климатологии используют понятие «устойчивый снежный покров». Это снежный покров, который лежит 30 дней и более с перерывами в три дня или без перерыва. Подход с использованием данного понятия позволяет отделить климатические изменения от короткопериодных погодных флуктуаций, что делает его общепризнанным в задачах спутникового мониторинга снеготаяния (Титкова и др., 2017).

Для идентификации ежедневных снимков также была использована цветовая палитра RGB (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий). Для каждого дня определялся свой уникальный цветовой код (сочетание трёх цветов: красного, зелёного, синего). Так как снеготаяние происходит достаточно быстро и граница снежного покрова смещается до 100 км в день и более, то слои не перекрывают друг друга, вследствие того что каждый последующий слой меньше предыдущего, поэтому ранги всех слоёв одинаковые. Затем снежный покров каждого дня окрашивался соответствующим ему цветом. Далее ежедневные карты площади снежного покрова накладывались друг на друга. В итоге получалась многослойная цветная карта динамики снеготаяния (*рис. 1*, см. с. 300).

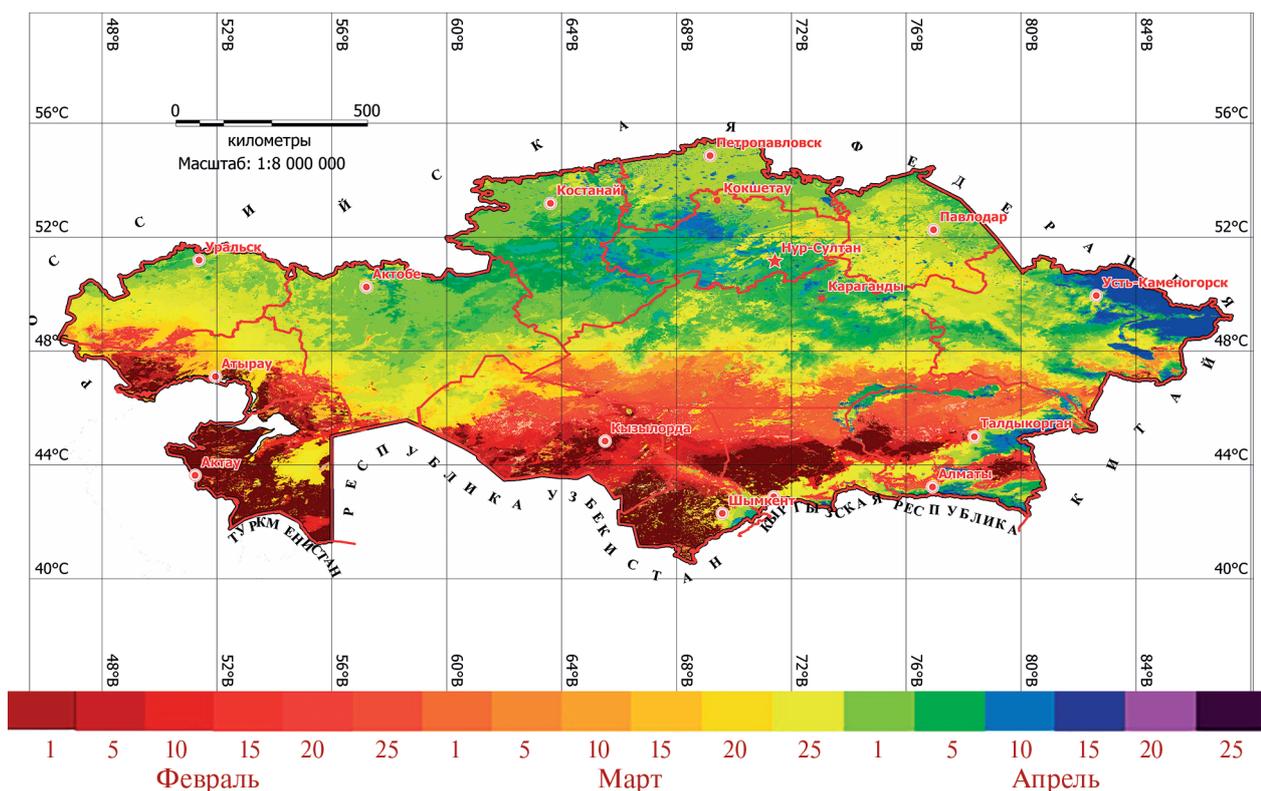


Рис. 1. Динамика схода снежного покрова в 2022 г.

На рис. 1 показан образец итоговой карты мониторинга снеготаяния для уровня сезонного мониторинга на примере снеготаяния в 2022 г. По подобным картам можно определить площадь покрытой снегом территории (англ. snow cover area — SCA) на определённый период и дату схода.

Для третьего уровня мониторинга, т. е. для оценки межгодовой изменчивости динамики снеготаяния и, соответственно, текущих изменений, были определены площади, занятые снежным покровом на первую декаду марта и апреля каждого года рассматриваемого периода (2000–2020).

Следует отметить, что площади снежного покрова обозначаются в настоящей статье за декадный период, однако на самом деле в основном, за редким исключением, они формировались с первого по второй день декады, в редких случаях формирование полной и непрерывной границы снега требовало три дня и более.

Хотя, как мы писали выше, граница формируется за первые 1–3 дня, теоретически возможно, что будет период облачности больше 5 дней. Поэтому при оценке площади мы оперируем понятием «декада», хотя фактически имеются данные за пентадный срок и менее.

Результаты и обсуждение

Данные о датах схода снежного покрова, полученные по ДДЗЗ, показывают, что под весенним снеготаянием в Казахстане в большинстве случаев подразумевается снеготаяние в северной половине Казахстана, так как в южной половине страны снежный покров либо неустойчивый, либо сходит ещё до начала марта. При этом наиболее продолжительное (до апреля) залегание устойчивого снежного покрова наблюдается на территории Северного Казахстана. Поэтому результаты исследования для первой декады апреля, по сути, отражают изменения в Северном Казахстане. В северной части страны снежный покров разрушается в первой декаде апреля, в отдельные (обычно малоснежные) годы — в третьей декаде марта, а в многоснежные — во второй декаде апреля. В целом эти результаты хорошо согласуются с данными,

представленными на картах Национального атласа Республики Казахстан, построенных по наземным данным.

Анализ изменения площадей и их динамики выявил значительную межгодовую изменчивость площади. Относительно большие площади были заняты снежным покровом в первой декаде марта в 2003, 2011 и 2012 гг., а в первой декаде апреля — в 2003, 2005, 2010, 2011, 2015 и 2021 гг. (рис. 2).

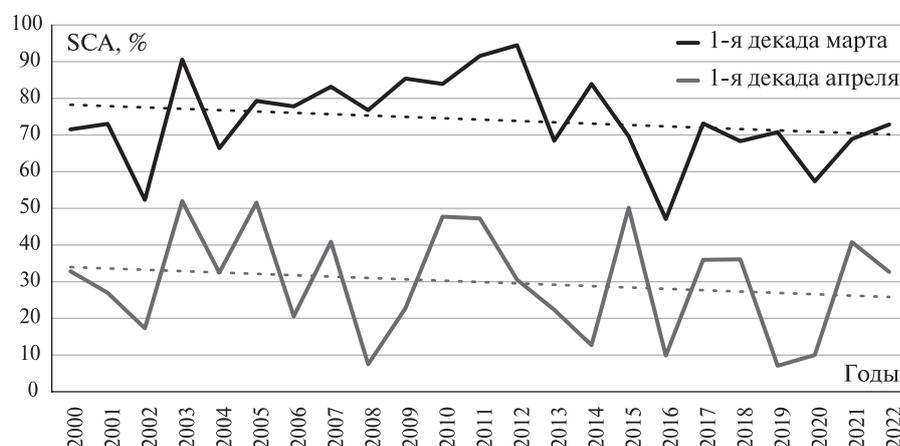


Рис. 2. Максимальные площади, занятые снежным покровом (SCA), на первую декаду марта и апреля в 2000–2022 гг. (в процентах от территории Казахстана)

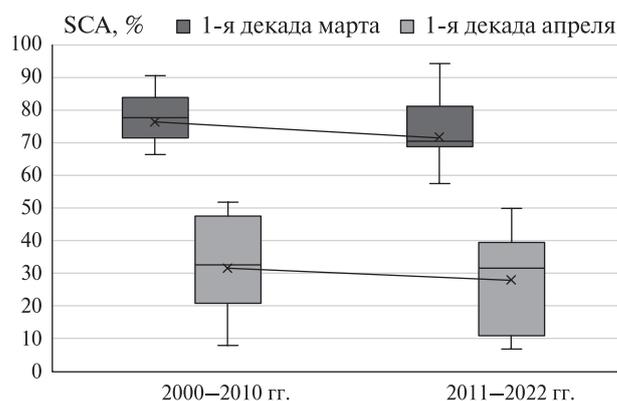
Сравнительно небольшие площади снежного покрова в первую декаду марта отмечены в 2002, 2004, 2013, 2016 и 2020 гг., а в первой декаде апреля — в 2002, 2008, 2014, 2016, 2019 и 2020 гг.

В среднем SCA на первую декаду марта и апреля составляет соответственно 74 и 30 % от площади исследуемой территории. Если говорить о скорости стаивания, то в среднем с первой декады марта до первой декады апреля площадь снежного покрова сократилась на 60 % от начальной площади, т. е. от снежного покрова освободилось территория, равная 45 % площади страны. Относительно быстрые сроки разрушения снежного покрова наблюдались в 2008, 2014, 2019 и в 2020 гг., когда за месяц растаяло соответственно 90, 85, 90 и 83 % площади снежного покрова. Относительно медленный сход снега наблюдался в 2005, 2015 и 2021 гг., когда площадь снежного покрова за месяц сократилась на 35, 20 и 41 % от исходной площади соответственно.

Представляют большой интерес тенденции изменения снежного покрова. Нужно отметить, что длина ряда небольшая, менее 30 лет — традиционно принятого периода для оценки климатических изменений. Тем не менее правомерно предпринять попытку проведения оценки тенденций и статистики на имеющемся ряде, так как ожидать дополнительных данных в течение 10 лет нецелесообразно. Поэтому сделаем оговорку, что в настоящей работе мы рассматриваем не климатические тенденции, а современные изменения с 2000 г. (см. рис. 2 и 3).

Анализ динамики (см. рис. 2) показывает неустойчивую тенденцию к снижению площади снежного покрова как в апреле, так и в марте.

Рис. 3. Сравнительная диаграмма размаха площадей (в процентах от территории Казахстана), занятых снежным покровом (SCA), на первую декаду марта и апреля двух периодов: 2000–2010 и 2011–2022 гг.



На фоне общей тенденции к снижению имеется короткопериодный тренд на увеличение площади снежного покрова в первой декаде марта в 2004–2011 гг., а для апреля — в 2008–2011 гг. Тенденция к снижению очень слабая — около 4 % на каждые 10 лет. Статистическая проверка на уровне значимости $\alpha = 0,05$ ожидаемо показала статистическую незначимость данной тенденции.

Сравнительная оценка по периодам (см. рис. 3) показывает однозначную картину уменьшения площади. В частности, уменьшается среднее значение, первый и второй квартиль, как для апреля, так и для марта. Медиана уменьшается для мартовских значений, а для апреля уменьшение очень незначительное. При этом данные по апрелю во второй период характеризуются заметным снижением первого квартиля. В целом с 2000 г. как для марта, так и для апреля отмечается незначительная и незначимая тенденция к сокращению площади снежного покрова. Таким образом, современные тенденции снежного покрова демонстрируют инертность отмечаемого на всей территории Казахстана потепления.

Заключение

Результаты исследования показывают, что изменения площади снежного покрова пока незначительные — около 4 % на каждые 10 лет — и незначимые, тем не менее, учитывая сильную связь снежного покрова с температурой, в будущем правомерно ожидать сокращения площади снежного покрова.

Хотя современные изменения могут показаться небольшими, однако северная часть Казахстана давно относится к зоне рискованного земледелия. В связи с сокращением снежного покрова ситуация ещё больше ухудшится, наибольшее потенциально негативное воздействие будет оказано на сельское хозяйство. Учащаются так называемые снежные засухи, возможно учащение весенних засух и сокращение урожайности яровых зерновых культур. Изменения также негативно скажутся на секторе рекреации. Влияние на водный сектор будет зависеть от итогового зимнего влагозапаса, который может не измениться, так как осадки могут выпадать в жидкой фазе. Также вероятно некоторое увеличение осадков, в связи с изменением атмосферной циркуляции возможно увеличение частоты циклонической активности. При этом для сектора ЧС, транспорта и строительства сокращение площади снежного покрова совместно с его производными (периодом залегания и высоты), а также с повышением температуры, может оказать положительное воздействие за счёт снижения суровости и продолжительности холодного периода. В заключение хотелось бы ещё раз подчеркнуть, что в настоящей работе рассматриваются не климатические тенденции, а современные изменения.

Литература

1. Кауазов А. М. Возможность определения дат схода снежного покрова в Северном Казахстане по спутниковым данным NOAA/AVHRR // Вестн. Казахского нац. ун-та. Сер. географ. 2010. № 1. С. 95–99.
2. Кауазов А. М., Муратова Н. Р., Тюребаева С. И., Бердыгулов Н. Мониторинг снеготаяния в Северном Казахстане с использованием спутниковых данных NOAA/AVHRR. Прикладные космические исследования в Казахстане / под ред. Жантаева Ж. Ш. Алматы: Дайк-Пресс, 2010. С. 25–29.
3. Кауазов А. М., Муратова Н. Р., Тюребаева С. И. Анализ динамики схода снежного покрова в Республике Казахстан с 2001 по 2010 г. по спутниковым данным NOAA/AVHRR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 42–46.
4. Кауазов А. М., Дара А. С., Батырбаева М. Ж., Витковская И. С., Муратова Н. Р., Сальников В. Г., Турулина Г. К., Полякова С. Е., Спивак Л. Ф., Тюребаева С. И. Исследование динамики дат схода снежного покрова в Северном Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 161–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-161-168.
5. Китаев Л. М., Кислов А. В. Региональные различия снегонакопления — современные и будущие изменения // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 2. С. 98–104.

6. Климат // Северо-Казахстанская область: энциклопедия. 2-е изд., доп. Алматы: Арыс, 2006. С. 29–31.
7. Котляков В. М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 39 с.
8. Локощенко М. А. Снежный покров и его современные изменения в Москве // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 71–82.
9. Лупян Е. А., Бурцев М. А., Крашенинникова Ю. С. Наблюдение бесснежной зоны в долине реки Апуквям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 213–216. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-213-216.
10. 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.
11. Нейштадт И. А. Построение безоблачных композитных спутниковых изображений MODIS для мониторинга растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 359–365.
12. Попова В. В. Структура многолетних колебаний высоты снежного покрова в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 78–90.
13. Республика Казахстан. Природные условия и ресурсы / под ред. Н. А. Искакова, А. Р. Медеу. Алматы, 2006. Т. 1. 232 с.
14. Сальников В. Г., Турулина Г. К., Таланов Е. А., Полякова С. Е., Кауазов А. М., Воротынцева В. В. Структура многолетних колебаний образования и разрушения снежного покрова в Северном Казахстане // Тр. Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 133–144.
15. Сивак Л. Ф. Основы создания систем космического мониторинга: метод. пособие. 2-е изд. Алматы: Дайк-Пресс, 2010. 88 с.
16. Терехов А. Г. Спутниковый мониторинг формирования снежного покрова Казахстана // Гидрометеорология и экология. 2018. Т. 90. № 3. С. 29–36.
17. Терехов А. Г., Пак А. А. Спутниковый прогноз влияния пополнения Капшагайского водохранилища (КНР) на водность трансграничной р. Иле в 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 298–302. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
18. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Юничева Н. Р. Аномальный режим снежности 2019 г. и многолетние тренды в изменениях высоты снежного покрова Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 351–355. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
19. Терехов А. Г., Ивкина Н. И., Юничева Н. Р., Витковская И. С., Алтай А. Г. Изменения снежного покрова сухих степей и полупустынь Казахстана на примере бассейна реки Эмбы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 101–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-101-113.
20. Титкова Т. Б., Китаев Л. М., Виноградова В. В. Короткопериодная изменчивость сроков залегания снежного покрова по данным MODIS на севере Евразии в условиях современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 223–238.
21. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment. 1995. No. 54. pp. 127–140.

Assessment of changes in snow cover area in Kazakhstan from 2000 to 2022

A. M. Kauazov¹, T. A. Tillakarim^{1,2}, V. G. Salnikov¹, S. E. Polyakova¹

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan
E-mail: a_kauazov@mail.ru

² RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan
E-mail: tillakarim_t@meteo.kz

The article presents the results of a study of recent changes in the snow cover area (SCA) in the territory of Kazakhstan for the period from 2000 to 2022. NASA satellite data were used in the form of the NDSI Terra/MODIS Corrected Reflectance product with a spatial resolution of 1 km. A map of the dynamics of snow cover melting in 2022 is presented. Significant interannual variability of snow cover area is shown. The comparative dynamics and trends of snowmelt in the first ten days of March and April for the period 2000–2022 are considered. On average, SCA for the 1st decade of March and the 1st decade of April is 74 and 30 %, respectively, of the area of the study territory. A short-term trend for an increase in the area of snow cover in 2004–2011 was found. The statistical parameters of snowmelt are analyzed for two periods: 2000–2010 and 2011–2022. A decrease in the area in the last period is shown, in particular, a decrease in the average area, the first and second quartiles, both in April and March. According to the actual data for the period from 2000 to 2022, a statistically insignificant weak trend was revealed for the reduction of snow cover area by 4 % every 10 years.

Keywords: snow cover, area, NDSI, SCA, snowmelt, remote sensing, climate change, Kazakhstan

Accepted: 01.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-298-305

References

1. Kauazov A. M., Possibility of determining dates of snow cover melting in Northern Kazakhstan using NOAA/AVHRR satellite data, *J. Geography and Environmental Management*, 2010, No. 1, pp. 95–99 (in Russian).
2. Kauazov A. M., Muratova N. R., Tyurebayeva S. I., Berdygulov N., Snowmelt monitoring in Northern Kazakhstan using NOAA/AVHRR satellite data, *Prikladnye kosmicheskie issledovaniya v Kazakhstane* (Applied space research in Kazakhstan), Almaty: Dayk-Press, 2010, pp. 25–29 (in Russian).
3. Kauazov A. M., Muratova N. R., Tyurebayeva S. I., The analysis of dynamics of a snowmelt in the Republic of Kazakhstan from 2001 to 2010 under satellite data NOAA/AVHRR, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 42–46 (in Russian).
4. Kauazov A. M., Dara A. S., Baturbayeva M. Zh., Vitkovskaya I. S., Muratova N. R., Salnikov V. G., Turulina G. K., Polyakova S. E., Spivak L. F., Tyurebayeva S. I., Investigation of timing dynamics of snow cover loss in Northern Kazakhstan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 161–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-161-168.
5. Kitaev L. M., Kislov A. V., Regional differences of snow accumulation — contemporary and future changes, *Earth's Cryosphere*, 2008, Vol. 12, No. 2, pp. 98–104 (in Russian).
6. Climate, *Severo-Kazakhstanskaya oblast': entsiklopediya* (North Kazakhstan region: encyclopedia), 2nd ed., Almaty: Arys, 2006, pp. 29–31 (in Russian).
7. Kotlyakov V. M., *Mir snega i l'da* (World of snow and ice), Moscow: Nauka, 1994, 39 p. (in Russian).
8. Lokoshchenko M. A., Snow cover and its modern changes in Moscow, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2005, No. 6, pp. 71–82 (in Russian).
9. Loupian E. A., Burtsev M. A., Krashenninnikova Yu. S., Observations of a snowless area in the Apukvaia River valley, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 213–216 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-213-216.
10. Loupian E. A., Burtsev M. A., Krashenninnikova Yu. S., Snow cover early melting zone in Dmitrov District of the Moscow Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 277–281 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-277-281.
11. Neishtadt I. A., Construction of Cloudless MODIS Composite Satellite Images for Vegetation Monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Issue 3, Vol. 2, pp. 359–365 (in Russian).

12. Popova V. V., The Structure of Long-term Variations in Snow Cover Height in Northern Eurasia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2004, No. 8, pp. 78–90 (in Russian).
13. *Respublika Kazakhstan. Prirodnye usloviya i resursy* (Republic of Kazakhstan. Natural conditions and resources), Almaty, 2006, Vol. 1, 232 p. (in Russian).
14. Salnikov V. G., Turulina G. K., Talanov E. A., Polyakova S. E., Kauazov A. M., Vorotyntseva V. V., The structure of long-term fluctuations in the formation and destruction of snow cover in Northern Kazakhstan, *Hydrometeorological research and forecasting*, 2015, Vol. 358, pp. 133–144 (in Russian).
15. Spivak L. F., *Osnovy sozdaniya sistem kosmicheskogo monitoringa* (Basics of creating space monitoring systems), Vol. 2, Almaty: Dayk-Press, 2010, 88 p. (in Russian).
16. Terekhov A. G., Satellite monitoring of the snow cover formation in Kazakhstan, *Hydrometeorology and ecology*, 2018, Vol. 90, No. 3, pp. 29–36 (in Russian).
17. Terekhov A. G., Pak A. A., Influence of the Kapshagay Reservoir (China) refill on transboundary River Ile runoff and satellite-based forecasting, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 298–302 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
18. Terekhov A. G., Abayev N. N., Yunicheva N. R., Anomalous snow regime in 2019 and long-term trends in snow depth in Kazakhstan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 351–355 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
19. Terekhov A. G., Ivkina N. I., Yunicheva N. R., Vitkovskaya I. S., Yeltay A. G., Snow cover changes of the Kazakhstan dry steppes and semi-deserts: the case of River Emba basin studies, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 101–113 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-101-113.
20. Titkova T. B., Kitaev L. M., Vinogradova V. V., Short-period variability in snow cover duration in the north of Eurasia in modern climate conditions from MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 223–238 (in Russian).
21. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sensing of Environment*, 1995, No. 54, pp. 127–140.