

Построение и радиометрическая нормализация безоблачных композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности для мониторинга лесов

С. А. Барталев, И. И. Ворушилов, В. А. Егоров

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117997, Россия*

E-mails: bartalev@d902.iki.rssi.ru, ivanvorush@gmail.com, egorov@d902.iki.rssi.ru

Получаемые спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра при наличии снежного покрова на земной поверхности характеризуются высоким уровнем информативности для решения ряда задач мониторинга лесов. Использование таких данных приводит к повышению яркостного контраста между древесной растительностью и свободной от неё земной поверхностью, а также к снижению вариабельности спектрально-отражательных характеристик последней. Предложен метод построения на основе временных рядов данных ДЗЗ безоблачных композитных изображений, включающий в себя выделение на первом этапе свободных от снежного покрова территорий, а также безлесных и покрытых лесом участков с наличием снега на земной поверхности. Последующий статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ направлен на фильтрацию ошибок классификации, восстановление пропущенных измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности и формирование композитных изображений в заданном временном интервале спутниковых наблюдений. Предложенный метод продемонстрировал свою применимость к построению для территории России композитных изображений земной поверхности с наличием снежного покрова по данным систем ДЗЗ MODIS, Proba-V и Sentinel-2. Для повышения эффективности анализа многолетних временных серий композитных спутниковых изображений разработан метод их взаимной радиометрической нормализации, обеспечивающий компенсацию не обусловленных влиянием динамики леса межгодовых вариаций спектрально-отражательных характеристик земной поверхности. В основу метода радиометрической нормализации временных рядов композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности положено использование локализованных нормализующих соотношений, оцениваемых по значениям спектральной яркости свободных от лесного покрова опорных участков. Применение разработанного метода для радиометрической нормализации временного ряда композитных изображений, полученных по данным MODIS за период 2001–2021 гг. для территории России, свидетельствует о снижении межгодовых вариаций спектрально-отражательных характеристик для 93 % пикселей, соответствующих участкам земной поверхности с наличием снежного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, композитные изображения, снежный покров, мониторинг лесов

Одобрена к печати: 22.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69

Введение

Получаемые спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра отражённого солнечного излучения при наличии снежного покрова на земной поверхности характеризуются высокой информативностью для решения многих задач изучения и мониторинга лесов (Барталев и др., 2016). Формирование сезонного снежного покрова приводит к повышению яркостных отличий (контраста) древесной растительности и свободных от неё участков земной поверхности (фона), а также к снижению уровня вариабельности спектрально-отражательных характеристик последнего. Данные оптической спутниковой съёмки земной поверхности с наличием снега находят применение для картографирования лесов (Барталев и др., 2011), оценки их объёма стволовой древесины (Барталев и др., 2016; Zharko et al., 2020), определения характеристик

проективного покрытия древесного полога и мониторинга вырубок (Ховратович и др., 2019, Khovratovich et al., 2020).

Один из эффективных путей спутникового картографирования и мониторинга лесов на больших территориях сопряжён с использованием свободных от маскирующего влияния облаков композитных изображений земного покрова, формируемых на основе временных рядов данных ДЗЗ в оптическом диапазоне спектра (Bartalev et al., 2003). Наиболее простые методы построения такого рода композитных изображений по данным съёмки в период вегетации растительности часто основаны на выборе наблюдений, соответствующих максимуму значений вегетационного индекса за фиксированные временные интервалы (Holben, 1986). Более сложные и универсальные методы построения композитных изображений основаны на использовании совокупности пороговых и статистических критериев для фильтрации подверженных влиянию облаков данных с последующим осреднением свободных от шумов измерений для фиксированных временных интервалов или выбором наилучших по заданному критерию наблюдений (Барталев и др., 2011).

Для построения спутниковых композитных изображений земной поверхности с наличием снежного покрова требуется надёжное его отделение от облаков, затруднённое близостью отражательных характеристик указанных объектов в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах (Hall et al., 2002; Riggs, Hall, 2015). При построении композитных изображений покрытых лесом территорий также необходимо обеспечить надёжное разделение данных, соответствующих наличию снега на земной поверхности и на кронах деревьев. В первом случае снежный покров способствует повышению информативности композитных изображений для мониторинга лесов, а во втором выступает в качестве маскирующего фактора, приводящего к искажению их спектрально-отражательных характеристик.

В условиях высокой яркости фона усиливается проявление зависимости спектрально-отражательных характеристик лесов от геометрических условий их освещения и наблюдения, в первую очередь от высоты Солнца и зенитного угла визирования (Pisek et al., 2010). Это, в свою очередь, диктует при построении композитных изображений необходимость адекватного учёта факторов даты и времени спутниковой съёмки, определяющих высоту Солнца и, следовательно, относительный вклад теней от деревьев в интегральные значения отражательных характеристик лесного покрова в поле зрения съёмочной системы.

Необходимо также отметить, что вклад в пространственно-временную вариабельность спектральной яркости покрытых лесом территорий могут вносить высота снежного покрова и изменчивость его отражательных характеристик под влиянием различных факторов, включая наличие ледяной корки, уровень влагосодержания снега, степень шероховатости его поверхности. Очевидно, что для эффективного решения задач мониторинга лесов построение однородных рядов композитных изображений покрытой снегом земной поверхности требует минимизации влияния факторов изменчивости её спектрально-отражательных свойств, не связанных с характеристиками лесного покрова. Это может быть достигнуто как за счёт ограничения диапазонов изменения значений контролируемых параметров (например, высоты Солнца и/или зенитного угла визирования) при построении временного ряда композитных спутниковых изображений, так и путём их последующей взаимной радиометрической нормализации. В основу радиометрической нормализации временных рядов композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности может быть положено использование для получения коэффициентов нормализующих соотношений значений спектральной яркости свободных от лесного покрова опорных участков.

Необходимость учёта упомянутых выше и некоторых других особенностей требует разработки специализированных методов построения и радиометрической нормализации композитных изображений земной поверхности с наличием снежного покрова, способных обеспечить максимально возможную информативность и временную однородность данных, используемых для оценки характеристик и мониторинга лесов.

Построение композитных изображений покрытой снегом земной поверхности

Метод построения безоблачных композитных изображений покрытой снегом земной поверхности, логическая схема которого представлена на *рис. 1*, включает в себя следующую последовательность основных этапов обработки спутниковых данных ДЗЗ:

- первичная пороговая классификация одномоментных спутниковых изображений с выделением таких классов, как облака, отбрасываемые ими на земную поверхность тени и свободные от снега участки, территории с открытым снежным покровом, леса с наличием снега на земле и/или кронах;
- статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ с взаимной переклассификацией ошибочно отнесённых на предыдущем этапе к классам открытого снежного покрова и лесов пикселей, а также с последующей фильтрацией результатов классификации на основе критериев внутриклассовой изменчивости спектрально-отражательных характеристик;
- статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ для пикселей класса лесов с выявлением и фильтрацией измерений спектральной яркости, полученных при наличии снега на кронах деревьев;
- реконструкция временных рядов данных ДЗЗ с восстановлением спектрально-отражательных характеристик земной поверхности в пикселях спутниковых изображений, находящихся под влиянием облаков или исключённых из рассмотрения по результатам статистической фильтрации на предыдущих этапах обработки;
- выбор наиболее статистически репрезентативных в заданном временном интервале значений спектрально-отражательных характеристик покрытой снегом земной поверхности и формирование соответствующих композитных изображений.

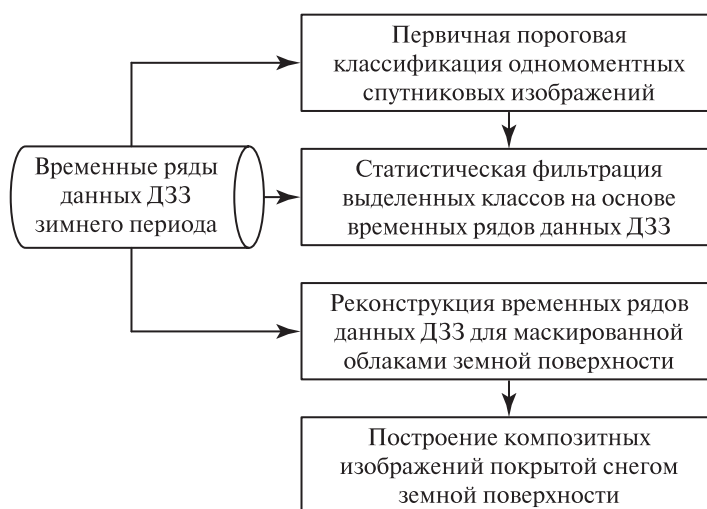


Рис. 1. Логическая схема метода построения безоблачных композитных изображений покрытой снегом земной поверхности на основе временных рядов данных ДЗЗ

Выполняемая на первом шаге первичная пороговая классификация одномоментных спутниковых изображений направлена на выделение следующих классов: 1) облака, 2) тени от облаков и свободная от снега земная поверхность, 3) открытый снег, 4) лесной покров с наличием снега на земной поверхности и/или на кронах деревьев. Соответствующие пикселям классов 1 и 2 данные ДЗЗ совокупно исключаются из использования при дальнейшем построении композитных изображений. Для первичной классификации используется двумерное распределение значений R_b и R_{sw} коэффициента спектральной яркости (КСЯ), измеренных соответственно в голубом и среднем ИК-диапазонах спектра. В данном пространстве

значений КСЯ участки с наличием снега, в том числе находящиеся под кронами деревьев, характеризуются в видимой области спектра более высокой отражательной способностью по сравнению со свободной от снежного покрова земной поверхностью. Предварительное построение гистограммы двумерного распределения значений R_b и R_{sw} с участием данных спутниковых наблюдений зимнего периода (пример изображения приведён на *рис. 2*) позволило оценить пороговые значения для разделения заданных классов.

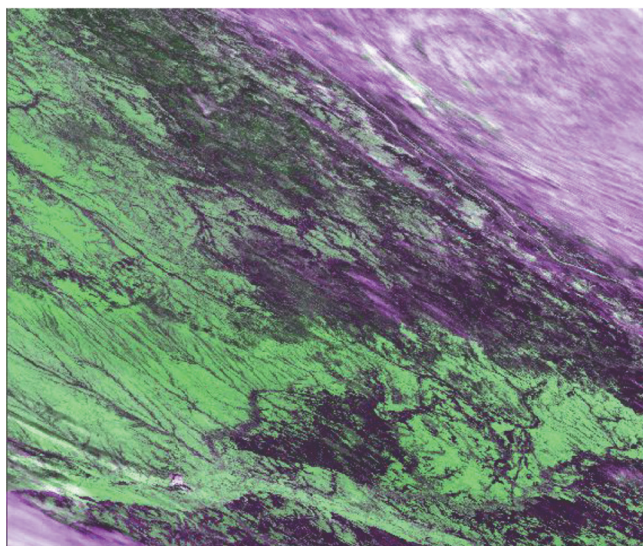


Рис. 2. Пример спутникового изображения территории с наличием снега на земной поверхности по данным съёмки Terra-MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (продукт MOD09, RGB: red-NIR-red). Облака отображаются светло-розовыми оттенками, покрытые снегом безлесные территории — оттенками зелёного, а занятые лесом земли — тёмными цветами

При этом непосредственное использование для данной цели в качестве разделяющего признака нормализованного разностного индекса снега NDSI (*англ.* Normalized Difference Snow Index) (формула (1)) (Hall et al., 1995 Tran et al., 2019) не является оптимальным, поскольку леса высокой сомкнутости (прежде всего, хвойных вечнозелёных пород) и лишённые снежного покрова безлесные территории характеризуются близкими его значениями:

$$\text{NDSI} = \frac{R_b - R_{sw}}{R_b + R_{sw}}. \quad (1)$$

Следует отметить, что в выбранном пространстве признаков использование NDSI в качестве параметра может быть выражено в виде:

$$R_b = R_{sw} \frac{1 + \text{NDSI}}{1 - \text{NDSI}}, \quad R_b = R_{sw} \text{ при } \text{NDSI} = 0.$$

Вместе с тем наличие снега приводит к снижению значений КСЯ земной поверхности в среднем ИК-диапазоне, а эффект снижения отражательной способности снежного покрова проявляется уже на длине волны 1,2 мкм и возрастает на длинах волн 1,6 и 2,2 мкм.

Представленная на *рис. 3* (см. с. 61) двумерная гистограмма значений КСЯ в голубом и среднем ИК-диапазонах спектра иллюстрирует возможности разделения по данным ДЗЗ необходимых классов на основе задания следующих пороговых значений:

- «снег», если $R_b > 0,05$ и $0,03 < R_{sw} < 0,2$;
- «облачность, тени и прочие территории», если $R_{sw} < 0,03$, или $R_{sw} > 0,2$, или $R_b < 0,05$.

Заданные пороговые значения КСЯ обеспечивают умеренно консервативную фильтрацию пикселей, гарантированно соответствующих облакам и свободным от снега участкам

земной поверхности. Однако близость КСЯ некоторых типов облаков и открытого снега не позволяет обеспечить их разделение по одномоментным спутниковым изображениям с достаточной степенью надёжности.

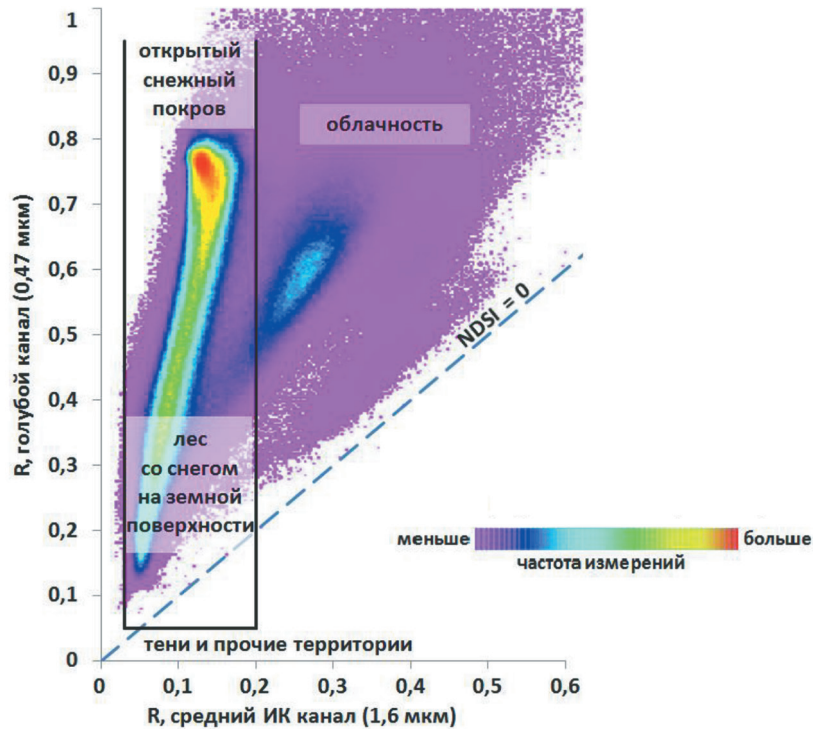


Рис. 3. Иллюстрация первичной пороговой классификации одномоментных спутниковых изображений в двумерном пространстве значений КСЯ в голубом и среднем ИК-диапазонах спектра на примере данных системы MODIS

Дальнейшее разделение указанных объектов и фильтрация пикселей для покрытых лесом территорий с наличием снега на кронах деревьев достигается на основе анализа временных рядов КСЯ участков, отнесённых на этапе первичной классификации спутниковых изображений к снежному покрову.

Статистический анализ временного ряда значений КСЯ $R(x, y, t)$ в точке с координатами (x, y) в момент времени t на выявленных участках с наличием снега исходит из предположения значительно большего числа наблюдений, свободных от маскирующего влияния облаков, в сравнении зашумлёнными. При этом для повышения уровня репрезентативности статистического анализа возможно использование спутниковых данных ДЗЗ, полученных в соседние годы. Вместе с тем необходимо учитывать возрастающую возможность проявления негативного влияния фактора межгодовых деструктивных изменений лесного покрова. Для снижения влияния этого фактора предпочтительно включать в анализ дополнительные данные ДЗЗ, полученные в предшествующие годы. Временные ряды данных КСЯ используются для оценки их средней величины $M_R(x, y, t_1:t_2)$ и стандартного отклонения $\sigma_R(x, y, t_1:t_2)$ в данной точке за период времени с t_1 по t_2 . Необходимость использования временных рядов данных спутниковых наблюдений обусловлена низким уровнем разделимости по одномоментным изображениям в пространстве признаков R_b и R_{sw} устойчивого снежного покрова на земной поверхности и снежного облачного фронта в атмосфере. Выделение участков с высоким уровнем случайного шума в точке $R(x, y, t)$ осуществляется отдельно по данным измерений КСЯ в красном (англ. red) (R_{red}) и ближнем инфракрасном (англ. near infrared — NIR) (R_{NIR}) спектральных диапазонах на основе критерия (2):

$$|R(x, y, t) - M_R(x, y, t_1:t_2)| > 2\sigma_R(x, y, t_1:t_2). \quad (2)$$

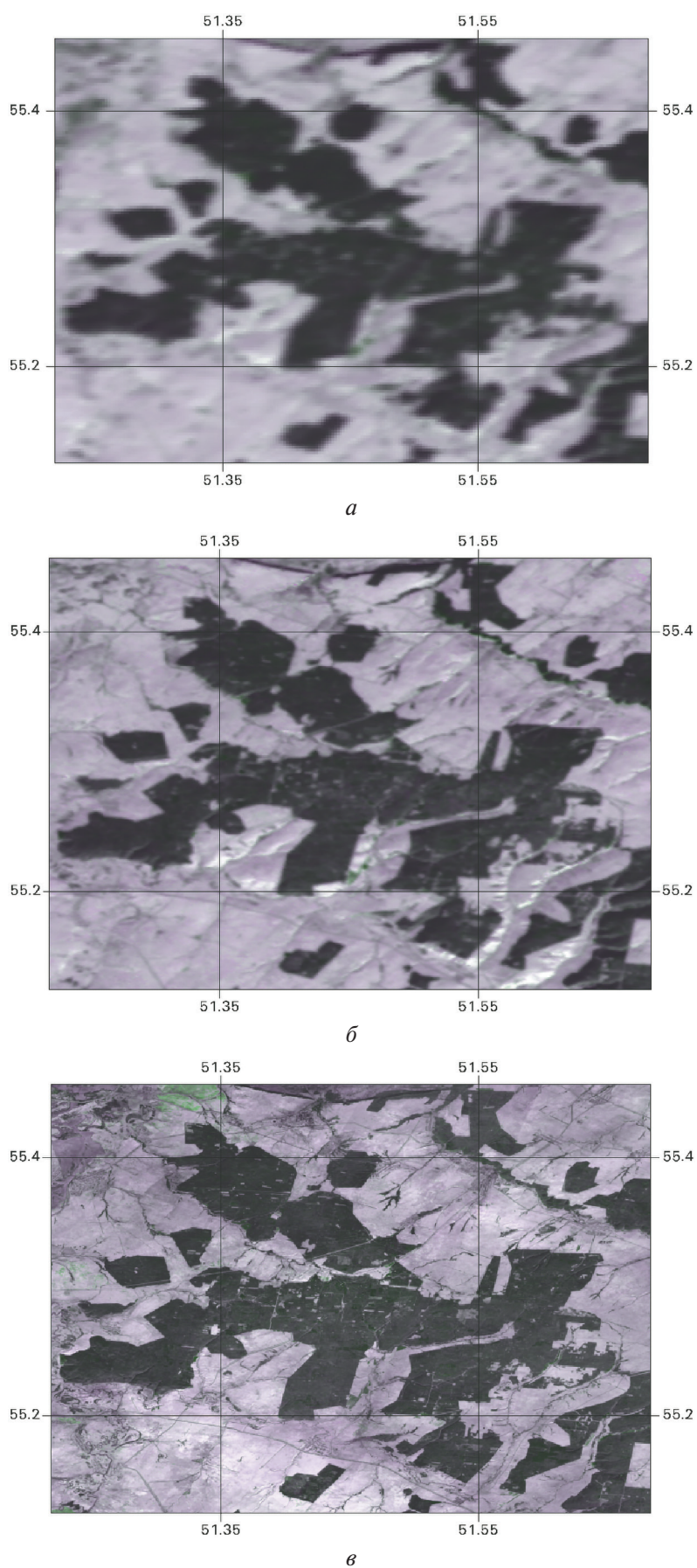


Рис. 4. Примеры композитных изображений покрытой снегом земной поверхности по данным съёмок: *a* — MODIS (230 м); *б* — Proba-V (100 м); *в* — Sentinel-2 (10 м). RGB-синтез: R_{red} (R), R_{NIR} (G), R_{red} (B)

Необходимо отметить, что прошедшие фильтрацию временные ряды данных спутниковых наблюдений могут существенно различаться в разные годы характером внутригодового распределения данных измерений КСЯ снежного покрова. Указанные различия в датах спутниковых измерений, в свою очередь, проявляются в вариациях значений КСЯ земной поверхности, прежде всего за счёт влияния различий высоты Солнца. Характерные для зимнего периода года низкие значения последней приводят к повышенному вкладу теней от деревьев, форм рельефа и некоторых других вертикальных элементов местности в межгодовые различия спектрально-отражательных характеристик земной поверхности. Для компенсации этого фактора при построении композитных изображений покрытой снегом земной поверхности предусмотрена процедура реконструкции временных рядов данных на участках пропусков, образовавшихся после фильтрации зашумлённых измерений. Указанная процедура включает в себя детектирование и фильтрацию остаточных шумов, а также заполнение пропусков и сглаживание временных рядов данных ДЗЗ, обеспечивая получение регулярных и непрерывных во времени значений КСЯ земной поверхности (Миклашевич и др., 2019).

В результате проведённой предварительной обработки данных ДЗЗ значительно снижается влияние мешающих факторов, что даёт возможность построения композитных изображений покрытой снегом земной поверхности. Построение композитных изображений осуществляется по данным восстановленных рядов КСЯ в каждом спектральном канале на основе поиска значения, соответствующего минимальному отклонению $\Delta_{\text{MIN}}(x, y, t_1:t_2)$ от средней величины $M_R(x, y, t_1:t_2)$, вычисленной по данным заданного временного интервала $(t_1:t_2)$. В результирующие композитные изображения для заданного спектрального диапазона включаются значения КСЯ, для которых выполняется условие:

$$|R(x, y, t) - M_R(x, y, t_1:t_2)| = \Delta_{\text{MIN}}(x, y, t_1:t_2).$$

Приведённые на *рис. 4* (см. с. 62) в качестве примеров фрагменты композитных изображений покрытой снегом земной поверхности получены на участок территории в Республике Татарстан по данным съёмки в красном и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах в период с 1 января по 30 апреля спутниковыми системами различного пространственного разрешения, а именно Terra-MODIS (230 м, 2021 г.), Proba-V (100 м, 2018 г.) и Sentinel-2 (2019–2021).

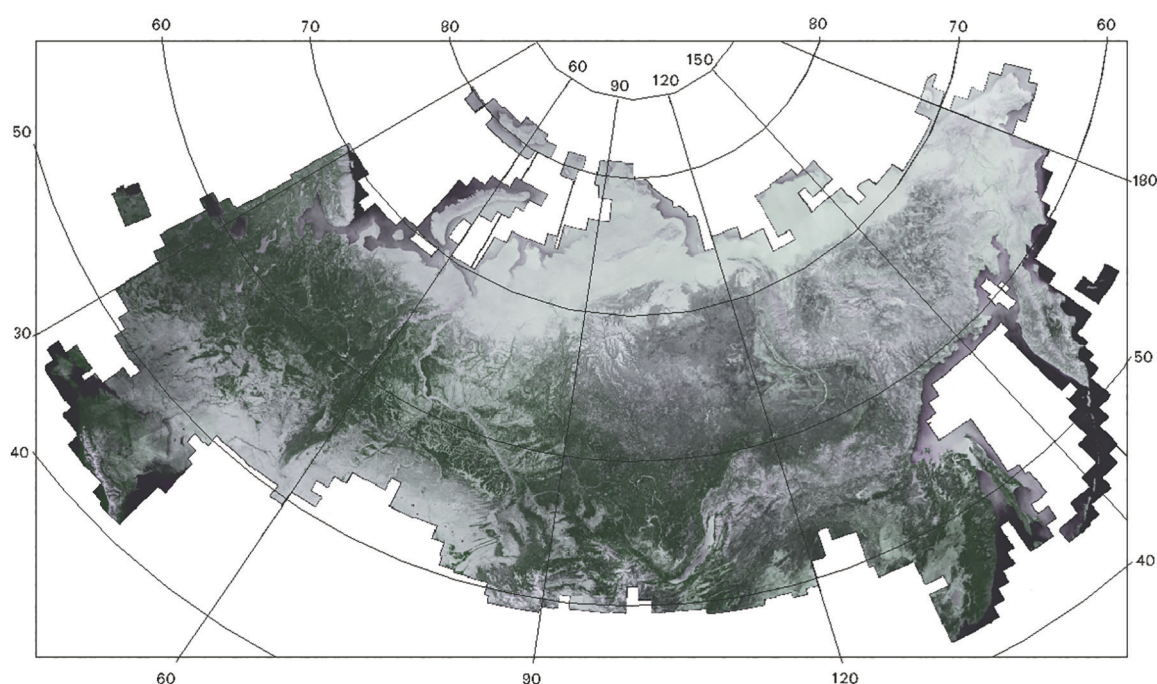


Рис. 5. Композитное изображение покрытой снегом земной поверхности на территорию России по данным съёмки Sentinel-2. RGB-синтез: R_{red} (R), R_{NIR} (G), R_{red} (B)

Композитное изображение покрытой снегом земной поверхности, полученное на территорию России по данным съёмки Sentinel-2, представлено на *рис. 5* (см. с. 63). Приведённые примеры наглядно демонстрируют высокий контраст между участками покрытых лесом и безлесных территорий при наличии снежного покрова на земной поверхности.

Радиометрическая нормализация композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности

Описанный выше метод позволяет получать многолетние временные ряды очищенных от маскирующего влияния облаков композитных спутниковых изображений, характеризующих спектрально-отражательные свойства покрытой снегом земной поверхности. Вместе с тем анализ ежегодных композитных изображений показывает наличие межгодовых вариаций значений КСЯ, обусловленных, как уже отмечалось выше, не только динамикой лесов, но и изменчивостью отражательных характеристик снежного покрова, вызванной влиянием различных факторов, включая наличие ледяной корки, уровень влагосодержания снега, степень шероховатости его поверхности. Наличие такого рода факторов варибельности значений КСЯ может приводить к искажению результатов многолетнего анализа композитных изображений, в частности при решении задач оценки характеристик и дистанционного мониторинга лесов. Кроме того, к числу факторов, потенциально способных приводить к искажению результатов анализа многолетних спутниковых данных, можно отнести и изменение радиометрических характеристик сенсора съёмочной системы ДЗЗ, вызванное, как правило, постепенным снижением его чувствительности на протяжении жизненного цикла эксплуатации.

Для компенсации влияния вышеуказанных факторов межгодовой варибельности многолетних композитных изображений покрытой снегом земной поверхности разработан метод их взаимной радиометрической нормализации, логическая схема которого представлена на *рис. 6*. В основе метода лежит локально-адаптивная оценка на свободных от леса территориях КСЯ открытого снега в предположении полного покрытия им участков, соответствующих пикселям изображений. Для этого из используемого для радиометрической нормализации композитных изображений множества пикселей необходимо исключить участки с наличием древесно-кустарниковой растительности.

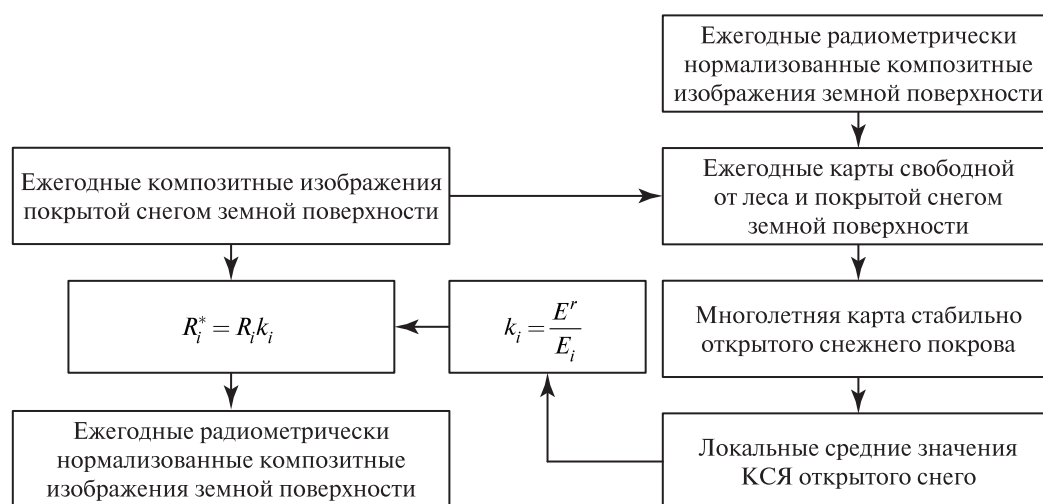


Рис. 6. Логическая схема радиометрической нормализации композитных изображений покрытой снегом земной поверхности. E_i и E^r — локальные средние значения КСЯ открытого снежного покрова, полученные на регулярной сети с использованием композитных изображений произвольного i -го и опорного годов; R_i и R_i^* — значения КСЯ в пикселях исходного и радиометрически нормализованного композитных изображений; k_i — заданные на регулярной сети значения коэффициентов радиометрической нормализации композитного изображения

Локально-адаптивная оценка КСЯ покрытых снегом безлесных участков осуществляется методом LAGMA (*англ.* Locally-Adaptive Global Mapping Algorithm) (Барталев и др., 2016; Bartalev et al., 2014) в узлах регулярной пространственной сети. Для отбора опорных участков используются ежегодно обновляемые спутниковые карты растительного покрова (Барталев и др., 2016). По ежегодным композитным изображениям определяются максимальные значения КСЯ в красном и ближнем ИК-диапазонах спектра на занятых лесом территориях с последующим исключением из рассмотрения участков с более низкой отражательной способностью. Дополнительная пространственная фильтрация направлена на исключение из рассмотрения участков, непосредственно примыкающих к покрытым лесом территориям или расположенных в буферной зоне заданной ширины. Для взаимной радиометрической нормализации многолетних композитных изображений в качестве опорных территорий отбираются участки открытого снега, остающиеся свободными от древесной растительности на протяжении всего рассматриваемого периода спутниковых наблюдений.

Таким образом, на вход алгоритма LAGMA поступают опорная выборка пикселей, соответствующих стабильно безлесным территориям, и временной ряд композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности. На основе ежегодных данных проводится вычисление локализованных средних значений КСЯ открытого снежного покрова E_i с их присвоением узлам регулярной сети с заданным размером ячейки. При этом территория локализованного сбора статистики значений КСЯ по опорной выборке пикселей должна заведомо превышать заданные размеры ячейки регулярной сети. С использованием полученных локализованных средних значений КСЯ открытого снега проводится вычисление коэффициентов радиометрической нормализации k_i . При этом коэффициенты радиометрической нормализации временного ряда изображений вычисляются относительно года, выбранного в качестве опорного:

$$k_i = \frac{E^r}{E_i}.$$

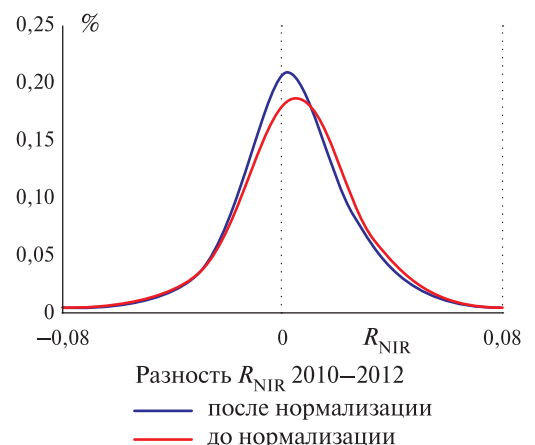
Последующая процедура радиометрической нормализации временного ряда композитных изображений (исключая опорный год) выполняется согласно выражению:

$$R_i^* = R_i k_i.$$

Описанный выше метод был применён для радиометрической нормализации временного ряда композитных изображений покрытой снегом земной поверхности, полученных по данным MODIS за период 2001–2021 гг. Для проведения радиометрической нормализации изображений в качестве опорного был выбран 2010 г.

На *рис. 7* отображены гистограммы разности исходных и радиометрически нормализованных значений КСЯ в ближнем ИК-диапазоне для территории России по данным съёмки 2010 и 2012 гг. Сравнение представленных на *рис. 7* гистограмм показывает, что процедура радиометрической нормализации композитных изображений позволяет существенно уменьшить величину систематического смещения между двумя распределениями КСЯ. При этом следует учитывать, что в рассматриваемый период на территории происходили и реальные изменения площади и характеристик лесов, также оказавшие влияние на распределение разности сравниваемых изображений.

Рис. 7. Гистограммы распределения разностей КСЯ в ближнем ИК-диапазоне по данным MODIS 2010 и 2012 гг. с использованием исходных и радиометрически нормализованных композитных изображений территории России с наличием снежного покрова на земной поверхности



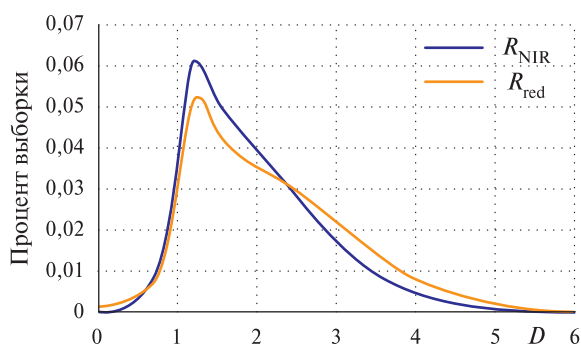


Рис. 8. Гистограммы распределения коэффициента снижения межгодовой вариабельности D композитных изображений по данным измерений КСЯ системой MODIS в красном и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах

Оценка результатов радиометрической нормализации изображений проводилась и по стабильным участкам тундры на территории России, отобранном с использованием карт растительного покрова (Барталев и др., 2016).

В каждом пикселе полученных по данным MODIS 2001–2019 гг. ежегодных композитных изображений были рассчитаны величины стандартного отклонения КСЯ в красном и ближнем ИК-диапазонах до проведения радиометрической нормализации $\sigma_R(x, y, 2001:2019)$ и после неё $\sigma_R^*(x, y, 2001:2019)$. Влияние радиометрической нормализации композитных изображений может характеризоваться коэффициентом снижения их межгодовой вариабельности, вычисляемым по соотношению величин стандартных отклонений $\sigma_R(x, y, 2001:2019)$ и $\sigma_R^*(x, y, 2001:2019)$:

$$D = \frac{\sigma_R(x, y, 2001:2019)}{\sigma_R^*(x, y, 2001:2019)}.$$

Гистограмма распределения величины D для изображений, полученных по данным измерений КСЯ в красном и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах, построенная по территории стабильных участков тундр (рис. 8), свидетельствует, что разработанный метод радиометрической нормализации позволил снизить межгодовые вариации КСЯ для подавляющего большинства (93 %) пикселей композитных изображений рассматриваемой территории, соответствующих области гистограммы, лежащей по оси абсцисс справа от порогового значения $D = 1$. Для большинства пикселей межгодовая вариабельность после нормализации снизилась примерно на 20 %. Оценка распределения величины D для покрытых лесом на протяжении всего рассматриваемого временного интервала территорий также показывает близкое снижение межгодовых вариаций КСЯ в результате радиометрической нормализации.

Заключение

Получаемые при наличии снежного покрова на земной поверхности спутниковые данные ДЗЗ в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра характеризуются высоким уровнем информативности для решения задач мониторинга лесов. Использование таких данных приводит к повышению яркостного контраста между древесной растительностью и свободной от неё земной поверхностью, а также к снижению вариабельности спектрально-отражательных характеристик последней. Предложенный в работе метод построения на основе временных рядов данных ДЗЗ безоблачных композитных изображений включает в себя выделение на первом этапе свободных от снежного покрова территорий, а также безлесных и покрытых лесом участков с наличием снега на земной поверхности. Последующий статистический анализ временных рядов данных ДЗЗ направлен на фильтрацию ошибок классификации, восстановление пропущенных измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности и формирование композитных изображений в заданном временном интервале спутниковых наблюдений. Предложенный метод продемонстрировал свою применимость к построению для территории России композитных изображений земной поверхности с наличием снежного покрова по данным систем MODIS, Proba-V и Sentinel-2. Для повышения эффективности анализа многолетних временных серий композитных спутниковых изображений разработан метод их взаимной радиометрической нормализации, обеспечивающий

компенсацию не обусловленных влиянием динамики леса межгодовых вариаций спектрально-отражательных характеристик земной поверхности. В основу метода радиометрической нормализации временных рядов композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности положено использование локализованных коэффициентов нормализующих соотношений, оцениваемых по значениям спектральной яркости свободных от лесного покрова опорных участков. Применение разработанного метода для радиометрической нормализации временного ряда композитных изображений, полученных по данным MODIS за период 2001–2021 гг. для территории России, свидетельствует о снижении межгодовых вариаций спектрально-отражательных характеристик для 93 % пикселей, соответствующих участкам земной поверхности с наличием снежного покрова.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 19-77-30015) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России, М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. Р. 263–284.
4. Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е. Интерполяционный алгоритм длинных временных рядов спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. Р. 143–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
5. Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашицкий А. В. Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
6. Bartalev S. A., Belward A., Ershov D. V., Isaev A. S. A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. No. 9. P. 1977–1982.
7. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5(1). P. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.1.
8. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // Remote Sensing of Environment. 1995. V. 54. P. 127–140.
9. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., DiGirolamo N. E., Bayr K. J. MODIS snow-cover products // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. P. 181–194.
10. Holben B. N. Characterization of maximum value composites from temporal AVHRR data // Intern. J. Remote Sensing. 1986. V. 7. P. 1417–1434.
11. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Ivanova A. A. Forest change detection based on sub-pixel tree cover estimates using Landsat-OLI and Sentinel 2 data // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. IOP Publ., 2020. V. 507. No. 1. Art. No. 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012011.
12. Pisek J., Chen J. M., Miller J. R., Freemantle J. R., Peltoniemi J. I., Simic A. Mapping forest background reflectance in a boreal region using multi-angle Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48. P. 499–510.
13. Riggs G. A., Hall D. K. MODIS Snow Products Collection 6 User Guide. National Snow and Ice Data Center, 2015. 66 p. URL: <https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/MODIS-snow-user-guide-C6.pdf>.

14. Tran H., Nguyen P., Ombadi M., Hsu K., Sorooshian S., Qing X. A cloud-free MODIS snow cover dataset for the contiguous United States from 2000 to 2017 // Scientific Data. 2019. V. 6. Art. No. 180300. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.300>.
15. Zharko V. O., Bartalev S. A., Sidorenkov V. M. Forest growing stock volume estimation using optical remote sensing over snow-covered ground: a case study for Sentinel-2 data and the Russian Southern Taiga region // Remote Sensing Letters. 2020. V. 11. Iss. 7. P. 1–2. DOI: doi.org/10.1080/2150704X.2020.1755473.

Creation and radiometric normalisation of cloud-free composite satellite images of snow-covered terrestrial surface for forest monitoring

S. A. Bartalev, I. I. Vorushilov, V. A. Egorov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

Center for Forest Ecology and Productivity, Moscow 117997, Russia

E-mails: bartalev@d902.iki.rssi.ru, ivanvorush@gmail.com, egorov@d902.iki.rssi.ru

The visible and near infrared remote sensing data collected over snow-covered terrestrial surface are highly informative for forest monitoring purposes. The use of such data leads to an increase in the brightness contrast between forested and forest-free terrestrial surface, as well as to a decrease of the background spectral-reflectance variability. The proposed method for constructing cloud-free composite images is based on time series of remote sensing data and includes at the first stage delineation of snow-free lands, as well as forest-free and forested areas with snow covered terrestrial surface. The subsequent remote sensing data time series statistical analysis is aimed at classification errors filtering, reconstructing data time series to fill in gaps and constructing composite images in a given time interval of satellite observations. The proposed method has demonstrated its applicability to the construction of composite images of snow covered terrestrial surface for the entire territory of Russia using the data collected by MODIS, Proba-V and Sentinel-2 remote sensing systems. To increase the analysis efficiency of the multi-annual time series of composite satellite images, a method for their mutual radiometric normalisation has been developed. The method suppresses interannual variations of the spectral reflectance values over the terrestrial surface that are not related to the forest dynamics. The method of radiometric normalisation of composite satellite images of the snow-covered terrestrial surface is based on the use of localised normalising ratios coefficients estimated from the surface reflectance values for forest free reference areas. The application of the radiometric normalisation method for the time series of composite images developed with MODIS data for the period 2001–2021 for the Russian territory indicates a decrease in interannual variations of spectral reflectance values for 93 % pixels corresponding to snow covered terrestrial surface.

Keywords: remote sensing, composite images, snow cover, forest monitoring

Accepted: 22.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the

- problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
4. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 143–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
5. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskii A. V., Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
6. Bartalev S. A., Belward A., Ershov D. V., Isaev A. S., A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 9, pp. 1977–1982.
7. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5(1), pp. 55–64, DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.1.
8. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, *Remote Sensing of Environment*, 1995, Vol. 54, pp. 127–140.
9. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., DiGirolamo N. E., Bayr K. J., MODIS snow-cover products, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, pp. 181–194.
10. Holben B. N., Characterization of maximum value composites from temporal AVHRR data, *Intern. J. Remote Sensing*, 1986, Vol. 7, pp. 1417–1434.
11. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Ivanova A. A., Forest change detection based on sub-pixel tree cover estimates using Landsat-OLI and Sentinel 2 data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publ., 2020, Vol. 507, No. 1, Art. No. 012011, DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012011.
12. Pisek J., Chen J. M., Miller J. R., Freemantle J. R., Peltoniemi J. I., Simic A., Mapping forest background reflectance in a boreal region using multi-angle Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, pp. 499–510.
13. Riggs G. A., Hall D. K., *MODIS Snow Products Collection 6 User Guide*, National Snow and Ice Data Center, 2015, 66 p., available at: <https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/files/MODIS-snow-user-guide-C6.pdf>.
14. Tran H., Nguyen P., Ombadi M., Hsu K., Sorooshian S., Qing X., A cloud-free MODIS snow cover dataset for the contiguous United States from 2000 to 2017, *Scientific Data*, 2019, Vol. 6, Art. No. 180300, <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.300>.
15. Zharko V. O., Bartalev S. A., Sidorenkov V. M., Forest growing stock volume estimation using optical remote sensing over snow-covered ground: a case study for Sentinel-2 data and the Russian Southern Taiga region, *Remote Sensing Letters*, 2020, Vol. 11, Issue 7, pp. 1–2, DOI: doi.org/10.1080/2150704X.2020.1755473.