

Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям

Т. С. Ховратович, С. А. Барталев, А. В. Кашницкий

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: kurat@smis.iki.rssi.ru*

Предложен метод выявления изменений лесов на основе данных оптических спутниковых систем дистанционного зондирования, обеспечивающий простоту и однозначность интерпретации получаемых результатов, применимость на различных территориях и в разные сезоны, в том числе за счёт адаптивности используемых алгоритмов к сезонным изменениям спектрально-отражательных свойств земного покрова. Метод основан на использовании разновременных спутниковых изображений и подпиксельной оценке проективного покрытия древесного полога, выполняемой путём линейного разделения спектральных смесей для определения доли площади леса и безлесных участков в составе каждого пикселя. В статье описаны основные шаги метода выявления изменений и проведена оценка влияния параметров настройки алгоритма на получаемый результат. Сделан вывод, что применение автоматической процедуры определения опорных значений коэффициента спектральной яркости леса и безлесных участков даёт более устойчивые результаты, чем их оценка на основе задаваемых экспертом эталонов. Стратификация территории по уровням проективного покрытия лесов увеличивает долю выявляемых изменений на 10–13 %. При использовании спутниковых данных летнего периода съёмки достигается наименьший уровень ошибочно детектированных изменений лесов с возможным наличием пропусков до 35–55 % площади изменённых участков. При использовании данных зимнего периода съёмки метод обеспечивает максимальную полноту выявления изменений лесов при достаточно низкой вероятности ошибок.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лесной покров, проективное покрытие, выявление изменений, вырубки, разделение спектральных смесей, подпиксельная оценка

Одобрена к печати: 17.05.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110

Введение

Детектирование происходящих в лесах изменений по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) основано на использовании различных методов сопоставления разновременных спутниковых изображений или результатов их обработки (Барталев и др., 2005). Одной из возникающих при этом общих задач является отделение изменений лесного покрова от помех, вносимых мешающими факторами, такими, например, как отличия фенологического состояния растительности в различные моменты наблюдений, наличие облачного покрова и изменчивость пропускной способности атмосферы, различия геометрических условий солнечного освещения и спутниковой съёмки (Milne, 1988). В настоящей работе предложен метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям, полученным в оптическом диапазоне спектра. Согласно существующей классификации, предложенный метод можно отнести к разностным методам, использующим модели спектральных смесей (Zhe, 2017). Модели спектральных смесей позволяют оценивать пропорции заданного множества тематических классов (компонентов) в пикселях, что обеспечивает простоту интерпретации изменений и позволяет оценивать их величину в количественных шкалах. К ограничениям подходов, основанных на использовании моделей спектральных смесей, можно отнести необходимость задания значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), соответствующим

Выбор пары разновременных спутниковых изображений

Выбираемая пара разновременных спутниковых изображений должна быть максимально свободной от влияния облачного покрова и обеспечивать охват временного периода для выявления изменений лесов при одновременном стремлении к минимизации различий спектрально-яркостных свойств земной поверхности, вызванных, прежде всего, сезонной динамикой растительного покрова в период вегетации, а также наличием снежного покрова и изменениями высоты Солнца в зимний период. Для минимизации влияния сезонных изменений растительного покрова, а так же условий освещения местности выбранные спутниковые изображения должны быть получены с максимально возможной (с учётом влияния облачного покрова) близостью по датам съёмки в различные годы. Для повышения достоверности детектирования изменений рекомендуется использовать спутниковые данные съёмки в летний и зимний сезоны как наиболее стабильные по отражательным свойствам лесного покрова. Проявляемая в наибольшей мере в весенний и осенний периоды сезонная динамика растительности может приводить к существенным межгодовым вариациям спектрально-отражательных характеристик земного покрова и, как следствие, к снижению достоверности выявляемых изменений лесов.

Оценка опорных значений КСЯ покрытых лесом и безлесных территорий

Опорные значения КСЯ покрытых лесом и безлесных территорий могут оцениваться на основе набора задаваемых экспертом типичных участков или автоматически с привлечением, например, имеющихся карт лесов. Для автоматизации процессов обработки спутниковых данных при детектировании изменений лесного покрова разработан метод оценки значений КСЯ леса и безлесных участков на основе гистограммы анализируемых изображений. Метод автоматической оценки опорных значений КСЯ леса и безлесных участков применяется независимо для каждого спутникового изображения и включает в себя следующие этапы:

- фильтрация (устранение локальных пиков) и нормирование гистограммы изображения;
- поиск максимального пика гистограммы с определением соответствующего ему значения КСЯ и установлением его принадлежности к покрытым лесом или безлесным территориям;
- поиск второго пика исходной гистограммы изображения методом последовательного вычитания симметризованных частичных гистограмм с проверкой разностного распределения на симметричность.

Определение проективного покрытия древесного полога леса

С помощью линейной модели спектрального смещения (Shimabukuro, Smith, 1991) и полученных на предыдущем этапе опорных значений КСЯ обоих компонент смесей (леса и безлесные территории) решается задача минимизации отклонений с ограничениями с определением в каждом пикселе доли площади леса и ошибки оценки:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(R^i - R_{\text{лес}}^i S_{\text{лес}} - R_{\text{бт}}^i S_{\text{бт}} \right)^2 \xrightarrow{S_{\text{лес}}, S_{\text{бт}}} \min, \quad S_{\text{лес}} + S_{\text{бт}} = 1, \quad S_{\text{лес}} \geq 0, \quad S_{\text{бт}} \geq 0,$$

где R^i — КСЯ в i -м спектральном канале; $R_{\text{лес}}^i$, $R_{\text{бт}}^i$ — опорные значения КСЯ классов в i -м канале; $S_{\text{лес}}$, $S_{\text{бт}}$ — доли площади пикселя, занимаемые классами; E — среднеквадратическая ошибка оценки доли площади рассматриваемых классов в пикселе; n — количество спектральных каналов. Возможность оценки проективного покрытия древесного полога леса с помощью линейной модели спектральных смесей с двумя компонентами обеспечивается предположением, что на анализируемом участке присутствует только один тип леса и один

тип подстилающей поверхности (Барталев и др., 2009). Данное предположение в модели не является ограничением её применимости и характеризует уровень детальности рассмотрения объекта исследования. Результаты оценки проективного покрытия древесного полога леса линейной моделью спектральных смесей могут считаться корректными при применении модели на некоторой локальной территории.

Оценка значений порогов для детектирования изменений лесов

Процедура вычисления порогов основана на предположении о нормальном распределении случайных шумов разностного изображения. При отсутствии изменений лесов гистограмма разностного изображения близка к графику плотности нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и стандартным отклонением δ_1 (гистограмма *A* на *рис. 2*). В случае наличия изменений в лесах, сопряжённых с уменьшением их проективного покрытия, например, в результате рубки, гистограмма разностного изображения имеет более тяжёлый правый хвост, включающий значения изменённых участков (гистограмма *B* на *рис. 2*). В таком случае гистограмму разностного изображения можно разделить на две части относительно среднего значения: левую B_L — без изменений и правую B_R — с изменениями. Построим гистограмму *C* (см. *рис. 2*): $C = B_L \cup B'_L$, где B'_L — гистограмма, симметричная B_L относительно среднего значения. Гистограмма *C* близка к графику плотности нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и стандартным отклонением δ_2 ($\delta_2 \leq \delta_1$). Основываясь на предположении о нормальном распределении, можно ожидать, что приблизительно 95 % выборки находится в пределах двух стандартных отклонений от среднего значения, поэтому статистический порог для отсекаания изменений выбирается как $2\delta_2$.

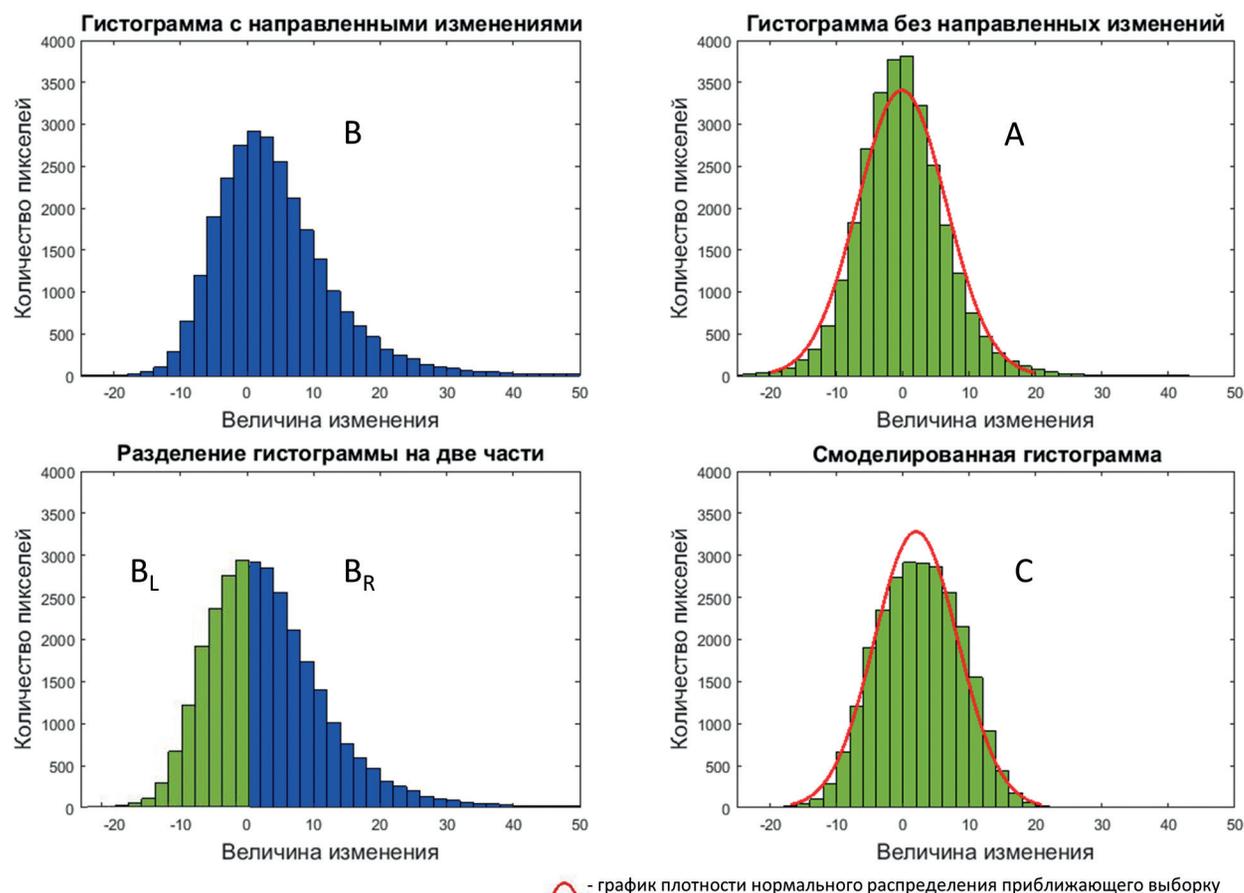


Рис. 2. Гистограммы разностного изображения: *A* — случай данных без изменений; *B* — случай данных с изменениями; *C* — смоделированная гистограмма

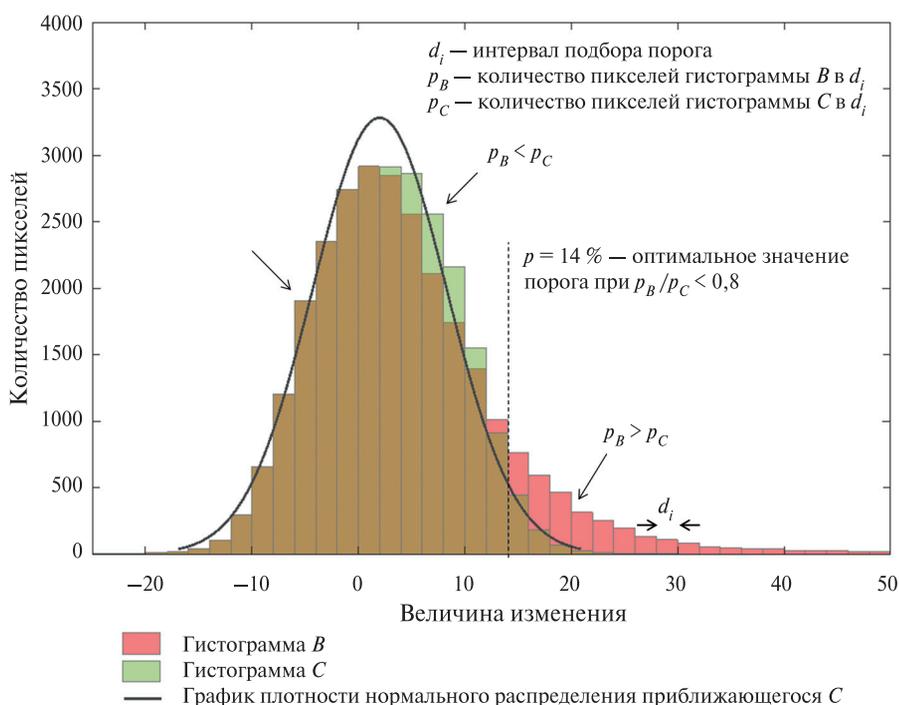


Рис. 3. Подбор порога с помощью оптимизационной процедуры

В случае анализа небольшого фрагмента, по которому нельзя построить статистически представительную выборку, или когда анализируемая гистограмма C далека от графика плотности нормального распределения, для вычисления порогов используется следующая оптимизационная процедура. Ось категорий гистограммы разбивается на интервалы с шагом d_i (рис. 3). Для каждого интервала оценивается отношение количества точек p_B и p_C гистограмм B и C , лежащих в нём. При поочерёдном рассматривании интервалов от максимального возможного значения порога до 0 в качестве значения порога выбирается левая граница первого интервала, в котором отношение количества точек $p_B/p_C < k$, где k подобрано экспериментально и равно 0,8.

Стратификация территории по степени проективного покрытия древесного полога и детектирование изменений лесов

Выбранный порог является оценкой максимального уровня шума разностного изображения, вызванного случайными факторами. В ходе экспериментов было отмечено, что величина случайного шума разностного изображения неодинакова для безлесных и покрытых лесом участков. При увеличении лесистости территории величина максимального уровня шума уменьшается. Установление данного факта обусловило целесообразность стратификации территории по степени проективного покрытия древесного полога леса для более точной настройки порогов. Проведённые эксперименты показали, что стратификация также позволяет частично учесть влияние неоднородности лесного покрова (наличие различных типов леса) на рассматриваемой территории.

Для каждого пикселя изображения вычисляется порог, зависящий от оценки максимального уровня шума величины соответствующей страты и ошибки оценки проективного покрытия древесного полога леса в пикселе:

$$p_{ij} = \max(p, E_{ij}),$$

где (i, j) — координаты пикселя; p — порог для страты, соответствующей пикселю с координатами (i, j) ; E_{ij} — средняя ошибка разложения на чистые компоненты в пикселе. На заключи-

тельном этапе обработки к изображению разности оценок проективного покрытия древесного полога леса применяется набор пороговых правил, на основе которых строится попиксельная маска изменений, содержащая информацию о координатах изменений и их величине, выраженной в изменении проективного покрытия древесного полога в пикселе.

Влияние входных данных и параметров алгоритма на результаты выявления изменений в лесах

Для оценки влияния параметров алгоритма на результаты выявления изменений лесов проведён эксперимент по детектированию рубок при использовании следующих опций:

- автоматический или экспертный выбор опорных значений КСЯ леса и безлесных участков;
- стратификация территории по степени проективного покрытия;
- статистический (2 δ) выбор порогов или выбор порогов с помощью оптимизационной процедуры.

Предложенный метод был применён для оценки изменений на тестовом участке в Приморском крае с координатами центра 46,061° с. ш., 134,853° в. д. и площадью 35,8 км². С помощью спутниковых данных, полученных в зимний период системами ДЗЗ Landsat-OLI и Sentinel-2, были выявлены рубки леса 2018 г. Представленное в *табл. 1* сравнение демонстрирует, что результаты выявления рубок леса с автоматическим выбором опорных значений КСЯ леса и безлесных участков хорошо согласуются с результатами, полученными при экспертном выборе соответствующих значений, и являются более устойчивыми. Стратификация территории по проективному покрытию древесного полога увеличивает долю подтверждённых изменений лесов на 10–13 %. Несмотря на то, что результаты детектирования изменений лесов при статистическом (2 δ) выборе порогов и подборе порогов на основе оптимизационной процедуры хорошо согласуются, применение оптимизационной процедуры порога является более консервативным. То есть около 30 % площади изменений лесов, детектируемых с помощью статистического порога, не выявляется при применении автоматического порога.

Таблица 1. Влияние параметров метода на результаты детектирования изменений лесов

Оцениваемые параметры		Каппа Коэна		Доля изменений, подтверждённых при использовании альтернативного набора параметров, %	
		Landsat-8	Sentinel-2	Landsat-8	Sentinel-2
Выбор опорных значений КСЯ	экспертный	0,83	0,87	82	82
	автоматический			88	93
Стратификация территории	без стратификации	0,86	0,9	82	85
	стратификация с шагом 10 % проективного покрытия			93	98
Метод выбора порогов	статистический (2 δ)	0,73	0,8	63	73
	оптимизационная процедура			96	96

Для исследования влияния выбора времени съёмки на результаты выявления изменений на тестовом участке в Приморском крае с координатами центра 46,326° с. ш., 134,189° в. д. и площадью 214 км² предложенным методом было обработано 18 пар сцен Landsat-OLI и 14 пар сцен Sentinel-2 для детектирования рубок леса в 2016–2018 гг. Для выявления изменений между каждой парой сцен вычислена доля подтверждённых и пропущенных изменений.

Ввиду отсутствия наземных опорных данных для вычисления доли подтверждённых изменений использовались маски изменений, построенные экспертом путём визуального анализа спутниковых данных. Полученные результаты, агрегированные по календарным месяцам, представлены в *табл. 2*.

Таблица 2. Сравнение результатов применения разносезонных спутниковых данных для выявления изменений в лесах

Период	Каппа Коэна	Доля подтверждённых изменений, %	Доля пропущенных изменений, %
Январь	0,91	97,14	13,19
Февраль	0,95	95,33	4,92
Март	0,90	93,92	11,88
Апрель	0,86	92,51	18,84
Май	0,83	95,92	22,91
Июнь	0,79	98,55	33,01
Июль	0,59	99,70	56,34
Август	0,77	99,47	34,31
Сентябрь	0,60	81,93	45,87
Октябрь	0,74	89,90	34,91
Ноябрь	0,95	91,97	1,52
Декабрь	0,94	91,12	1,78

Значения коэффициента каппа Коэна в *табл. 2* показывают, что наиболее сильные различия между эталонной картой изменений и детектируемыми разработанным методом изменениями лесов соответствуют летнему и осеннему периодам. Точность выявления изменений по данным летнего периода, согласно результатам эксперимента, наиболее высокая, но при этом возможны пропуски до 35–55 % площади изменений. В зимний период пропуск изменений минимален при достаточно высокой (90–95 %) вероятности их правильного детектирования, что подтверждает предположение, что зимний период наиболее благоприятен для детектирования вырубок предложенным методом.

Заключение

Рассмотренный метод реализован в семействе информационных сервисов спутникового мониторинга биосферы ВЕГА (Барталев и др., 2012) и позволяет детектировать изменения в лесах на основе спутниковых данных Landsat-OLI и Sentinel-2. Алгоритм выявления изменений обеспечивает высокую скорость обработки входных данных при минимальных требованиях к ним, стабильность работы при переносе на другие территории и устойчивость к проявлению сезонных изменений спектрально-отражательных свойств растительности, простоту и однозначность интерпретации получаемых результатов. Алгоритм апробирован на тестовых участках в Приморском крае, Хабаровском крае и Республике Удмуртии. Важно отметить, что точность работы алгоритма выявления изменений зависит от точности оценки проективного покрытия древесного полога леса на изображениях, для чего требуется дополнительное исследование.

В качестве преимуществ рассмотренного метода по сравнению с имеющимися аналогами можно отметить возможность детектирования изменений переходного характера, не приводящих к изменению типа покрова, например выборочных рубок леса. Это подтверждается результатами апробации данного метода в Приморском крае, где 85 % рубок леса являются выборочными. Кроме того, метод обеспечивает простоту интерпретации изменений и позволяет оценивать их величину в количественных шкалах.

Исследования проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-41152 РГО_а) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. *Барталев С. А., Курятникова Т. С., Стибиг Х. Ю.* Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2005. Вып. 2. Т. 2. С. 217–227.
2. *Барталев С. А., Ховратович Т. С., Елсаков В. В.* Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 343–351.
3. *Барталев С. А., Ершов Д. В., Лупян Е. А., Толпин В. А.* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
4. *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. С. 263–284.
5. *Milne A. K.* Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology // *Proc. IGARSS'88*. 1988. P. 541–544.
6. *Shimabukuro Y. E., Smith J. A.* The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multi spectral data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1991. V. 29. Iss. 1. P. 16–20.
7. *Zhe Z.* Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. V. 130. P. 370–384.

Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data

T. S. Khovratovich, S. A. Bartalev, A. V. Kashnitskii

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: kurat@smis.iki.rssi.ru*

A method for forest change detection based on optical remote sensing data is proposed. The method provides the simplicity of the obtained result interpretation, the applicability in different areas and seasons due to its adaptability to the phenological changes. The method is based on the use of bitemporal satellite images and sub-pixel estimation of the cover density of tree canopy, performed by using linear spectral mixture analysis for estimation of forest area and treeless areas proportion in each pixel. The paper describes the main steps of the change detection method and the influence of input settings of the algorithm on the results. It is concluded that the use of an automatic procedure for determining the reference spectral reflectance values of a forest and treeless areas gives more stable results than their assessment by experts' settings. Stratification of the territory by forest cover levels increases the area of the detected changes by 10–13 %. According to the experiments, the accuracy of change detection using summer satellite data is the highest, but with possible presence of gaps up to 35–55 % of the area. Using the satellite data of winter time period, the method ensures maximum completeness of detecting forest changes with a sufficiently low commission errors.

Keywords: remote sensing, forest cover, projective cover, closure, detection of changes, cutting, spectral mixture separation, sub-pixel analysis

Accepted: 17.05.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110

References

1. Bartalev S. A., Kuryatnikova T. S., Stibig H. J., Metody ispol'zovaniya vremennykh serii sputnikovykh izobrazhenii vysokogo prostranstvennogo razresheniya dlya otsenki masshtabov i dinamiki vyrubok taizhnykh lesov (Methods for the analysis of time-series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Issue 2, Vol. 2, pp. 217–227.
2. Bartalev S. A., Khovratovich T. S., Elsakov V. V., Ispol'zovanie sputnikovykh izobrazhenii dlya otsenki poter' ugleroda lesnymi ekosistemami v rezul'tate vyrubok (Estimation of carbon losses in a forest ecosystem caused by logging with the use of satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 2, pp. 343–351.
3. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovogo servisa VEGA dlya resheniya razlichnykh zadach monitoringa nazemnykh ekosistem (Possibilities of satellite service VEGA using for different tasks of land ecosystems monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56.
4. 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., Tsentri kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (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.
5. Milne A. K., Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology, *Proc. IGARSS'88*, 1988, pp. 541–544.
6. Shimabukuro Y. E., Smith J. A., The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multi spectral data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, Vol. 29, Issue 1, pp. 16–20.
7. Zhe Z., Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, Vol. 130, pp. 370–384.