

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ ИЗ КОСМОСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

М.Ю. Беляев^{1, 2✉}, А.М. Есаков², Х.Х. Ильясов³, В.Е. Назайкинский³

¹ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» («РКК «Энергия»), Россия, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

³ФГБООУ «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН), Россия, 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

mikhail.belyaev@rsce.ru

Рассмотрены методы применения спектральных изображений и космических фотоснимков для определения фронта горения и границ участков выгорания при мониторинге пожаров. Использованы данные спектральных систем спутников Sentinel-2 и Landsat-8, а также фотоснимки с Международной космической станции, получаемые в рамках космических экспериментов «Ураган», «Сценарий». Обработаны и исследованы данные, полученные во время пожара в 2020 г. на о. Кахоолаве, входящем в группу Гавайских островов. Показаны возможности совместного применения разнотипных данных для оценки динамики пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, спектральные данные, космические фотоснимки, фронт горения, участки выгорания, индексы вегетации

Ссылка для цитирования: Беляев М.Ю., Есаков А.М., Ильясов Х.Х., Назайкинский В.Е. Совместное использование спектральных и фотографических снимков из космоса для мониторинга пожаров // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 43–57. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-43-57

Ежегодные лесные пожары наносят огромный ущерб как растительности, так и животному миру, лишая их естественной среды обитания. Принимая во внимание весьма значительные площади выгорания и достаточно продолжительное время, требуемое на воспроизводство растений, актуальность приобретают задачи своевременного обнаружения очагов возгорания и прогнозирования распространения огня. Одним из перспективных методов в этом направлении считается наблюдение поверхности Земли из космоса [1–19], которое в современных условиях позволяет обнаруживать отдельные объекты и события площадью в несколько десятков метров. Существенным недостатком космических средств мониторинга признано малое количество космических аппаратов (КА) пригодных для обнаружения и отслеживания объектов горения с необходимым пространственным и временным разрешением. Так, например, для спутников Sentinel-2 (пространственное разрешение 10...20 м.) прохождение над одной и той же точкой земной по-

верхности происходит с интервалом в 5 сут., а для Landsat-8 — 16 сут. Как правило, если каким-либо аппаратом фиксируется начало пожара, то к следующему моменту пролета над тем же (либо близким к нему) участком Земли горение уже прекращается. Исключительными можно считать ситуации, когда время развития пожаров превышает характерные периоды полного цикла оборота спутника (группы спутников) вокруг Земли. В отдельных (достаточно редких) случаях удается обнаружить сочетание данных от разнотипных спутников, которые вследствие некратности периодов обращения отстоят один от другого на меньшие временные интервалы.

Значительное влияние на условия съемки оказывает атмосфера и положение Солнца. Поскольку спектральная аппаратура фиксирует излучение, исходящее от Земли, то для ее работы требуется соблюдение, по крайней мере, следующих условий: либо должен быть внешний облучающий источник над снимаемым участком поверхности для получения отраженного излучения, либо излучение должно непосредственно исходить от поверхности Земли. В большинстве случаев речь идет о съемке

в дневное время, что сужает временной диапазон наблюдения. При непосредственном излучении от поверхности Земли в результате горения (средний и дальний инфракрасные диапазоны) съемка может происходить и в ночное время, но она, как правило, уступает в детализации камерам видимого спектра и ближнего ИК-диапазона.

Указанные трудности в сочетании с отсутствием взаимосвязи между отдельными средствами наблюдения делают отслеживание процесса развития пожара весьма нетривиальной задачей. В настоящей статье рассматривается совместное использование данных со спутников Sentinel-2, Landsat-8 и фотоснимков с Международной космической станции (МКС) для обнаружения фронта горения и изменения во времени границы зоны выгорания.

Остров Кахоолаве (Kaho'olawe) вулканического происхождения, входит в группу Гавайских островов. Характерные размеры острова — около 18 км в длину и 11 км в ширину, максимальная высота — около 450 м. Остров располагается в подветренной дождевой тени о. Мауи (Maui) и характеризуется полусухим климатом. В результате деятельности человека природа о. Кахоолаве претерпела существенное изменение. Вероятно, еще с доисторических времен местные леса выжигались в целях расширения площадей для земледелия [20]. Последующее заселение острова чужеродными копытными млекопитающими, уже после экспедиций Кука, привело к серьезной деградации ландшафта и эрозии почвы. Как результат, к концу XIX в. — началу XX в. участки выше

200 м н. у. м. практически лишились растительности и почвы. В 1941–1994 гг. о. Кахоолаве использовался ВМС США для военных учений с боевыми стрельбами и бомбометанием. В 1965 г. в его восточной оконечности были взорваны заряды общей массой около 500 т тротила, что, возможно, привело к расколу скальных пород и попаданию части грунтовых вод в океан. В 1993 г. остров передан штату Гавайи, однако его очистка от взрывоопасных предметов не закончена и в настоящее время.

Достаточно скудная растительность острова представлена зарослями травы с отдельно стоящими или образующими небольшие группы деревьями и кустарниками. Наиболее плотные заросли деревьев наблюдаются по склонам оврагов, где, по-видимому, исторически они не подвергались серьезному воздействию со стороны человека.

Согласно данным комиссии Kaho'olawe Island Reserve Commission (KIRC) пожар на острове был обнаружен 22.02.2020 г. После нескольких суток тушения огня было принято решение о приостановке работ по причине опасности детонации неразорвавшихся боеприпасов. Пожар был потушен спустя 6 сут. благодаря начавшимся дождям и действиям пожарных расчетов.

Цель работы

Цель работы — отработка методов применения спектральных изображений со спутников и фотоснимков с борта МКС для определения фронта горения и границ участков выгорания.

Т а б л и ц а 1

Характеристики мультиспектральных систем космического аппарата Sentinel-2
Characteristics of the Sentinel-2 Multispectral Systems

Номер полосы	2A		2B		Пространственное разрешение, м
	Центральная длина волны, нм	Ширина полосы, нм	Центральная длина волны, нм	Ширина полосы, нм	
B1	442,7	21	442,3	21	60
B2	492,4	66	492,1	66	10
B3	559,8	36	559,0	36	10
B4	664,6	31	665,0	31	10
B5	704,1	15	703,8	16	20
B6	740,5	15	739,1	15	20
B7	782,8	20	779,7	20	20
B8	832,8	106	833,0	106	10
B8A	864,7	21	864,0	22	20
B9	945,1	20	943,2	21	60
B10	1373,5	31	1376,9	30	60
B11	1613,7	91	1610,4	94	20
B12	2202,4	175	2185,7	185	20

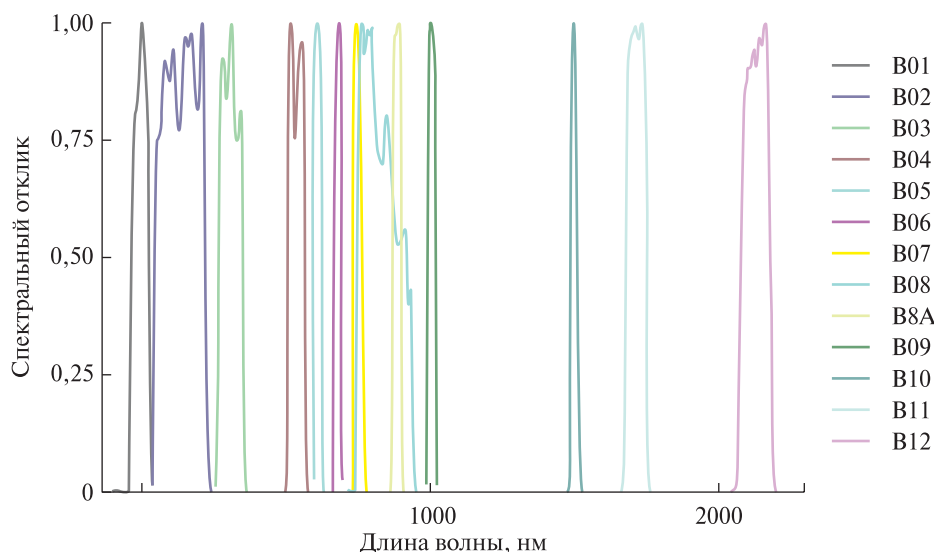


Рис. 1. Зависимость чувствительности датчиков мультиспектральных систем спутника Sentinel-2 (2A) от длины волны

Fig. 1. Sensitivity of the Sentinel-2 (2A) multispectral system sensors as a function of wavelength

Материалы и методы

Источниками данных со спутников Sentinel-2 (2A, 2B) выступают 13-полосные мультиспектральные системы MSI (Multi Spectral Instrument). Пространственное разрешение изображений зависит от диапазона частот и изменяется от 10 до 60 м, глубина оцифровки составляет 12 бит (табл. 1).

Временной интервал между съемками одних и тех же участков земной поверхности составляет 5 сут. для пары спутников (их вращение происходит в противофазе), либо 10 сут., если вследствие привязки к конкретной спектральной системе требуется сравнивать данные, получаемые одной и той же аппаратурой (рис. 1).

Как видно из рис. 1, спектральные характеристики Sentinel-2B и 2A отличаются незначительно, полосы B07 и B8A перекрываются полосой B08, при этом чувствительность в полосе B8A почти в 2 раза выше чувствительности датчиков в полосе B08 на тех же частотах. Можно предположить, что обработка спектральных изображений с использованием полосы B08 будет схожей с результатами, полученными с применением данных полосы B07.

Спектральное оборудование спутника Landsat-8 представлено двумя устройствами: OLI (Operational Land Imager) для видимого излучения и TIRS (Thermal Infrared Sensor) для инфракрасного диапазона, глубина оцифровки 12 бит (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Характеристики спектральных систем космического аппарата Landsat-8
Characteristics of the Landsat-8 Spectral Systems

Номер полосы	Диапазон частот, нм	Ширина полосы, нм	Пространственное разрешение, м
1	435...451	16	30
2	452...512	60	30
3	533...590	57	30
4	636...673	37	30
5	851...879	28	30
6	1566...1651	85	30
7	2107...2294	187	30
8	503...676	173	15
9	1363...1384	21	30
10	10 600...11 190	590	100
11	11 500...12 510	1010	100

Полосы 1–9 относятся к камере OLI, 10, 11 — к камере TIRS, обе камеры используют для работы аналого-цифровые преобразователи с 12-битной дискретизацией. Периодичность получения спектральных изображений со спутника Landsat-8 составляет 16 сут.

Для анализа состояния растительного покрова, определения участков с активным горением, выделения водных поверхностей и других процессов используются отношения вида

**Определение индексов по спектральным данным
космических аппаратов Sentinel-2 и Landsat 8**

Determination of indices based on spectral data from the Sentinel-2 and Landsat 8 spacecraft

Название индекса	Расшифровка (англ.)	Sentinel-2		Landsat 8	
		Центральная длина волны полосы 1, нм	Центральная длина волны полосы 2, нм	Центральная длина волны полосы 1, нм	Центральная длина волны полосы 2, нм
NBR	Normalized burn ratio	2202,4	832,8	–	–
NBR-A	Normalized burn ratio (narrow)	2202,4	864,7	2220	865
NBR-S	Normalized burn ratio (short-wave IR)	1613,7	864,7	1608.5	865
NDVI	Normalized difference vegetation index	664,6	832,8	655	865
GNDVI	Green normalized difference vegetation index	559,8	832,8	560	865
NDVIre1	Normalized difference vegetation index red edge 1	704,1	832,8	–	–
NDVIre2	Normalized difference vegetation index red edge 2	740,5	832,8	–	–
NDVIre3	Normalized difference vegetation index red edge 3	782,8	832,8	–	–
NDre1	Normalized difference red edge 1	704,1	740,5	–	–
NDre2	Normalized difference red edge 2	704,1	782,8	–	–

$$I = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2},$$

где $V_{1,2}$ — интенсивности излучения в двух различных спектральных полосах.

Величина I в дальнейшем будет называться общепринятым термином «индекс». Очевидно, значение индекса изменяется в диапазоне $[-1,1]$, при этом величина -1 означает полное отсутствие в заданной точке признака, описываемого индексом, а 1 — точное наличие. В тех случаях, когда $V_{1,2}$ принимают нулевые значения, индексу присваивается величина -1 (табл. 3).

Индекс NDVI использован в статьях [21–30] для оценки состояния растительного покрова, а в работах [25–28] — для оценки последствий пожаров, NBR — в работах [31, 32] для детектирования горения, NDVI и NBR совместно применялись в работах [33, 34]. Различные варианты индексов, построенных на спектральных полосах от красного до среднего ИК-диапазонов, описаны в работе [35].

Значительное влияние на индексы оказывают облака, в зависимости от их интенсивности значения индексов могут быть серьезно искажены вплоть до предоставления неверной информации.

Результаты и обсуждение

Согласно данным комиссии KIRC пожар на острове длился с 22.02.2020 по 28.02.2020. В указанный интервал попадают данные КА Sentinel-2 от 25.02.2020 и Landsat-8 от 27.02.2020. Оба сеанса съемки соответствуют активной фазе горения. Более ранние и поздние данные с указанных аппаратов получены либо до начала, либо после окончания пожара.

Состояние острова до начала (15.02.2020 и 20.02.2020), в самый активный момент (25.02.2020) и на завершающей фазе (27.02.2020) горения представлено на рис. 2. Изображения в верхнем ряду и слева внизу получены по спектральным данным Sentinel-2, внизу справа — по данным Landsat-8. Изобра-

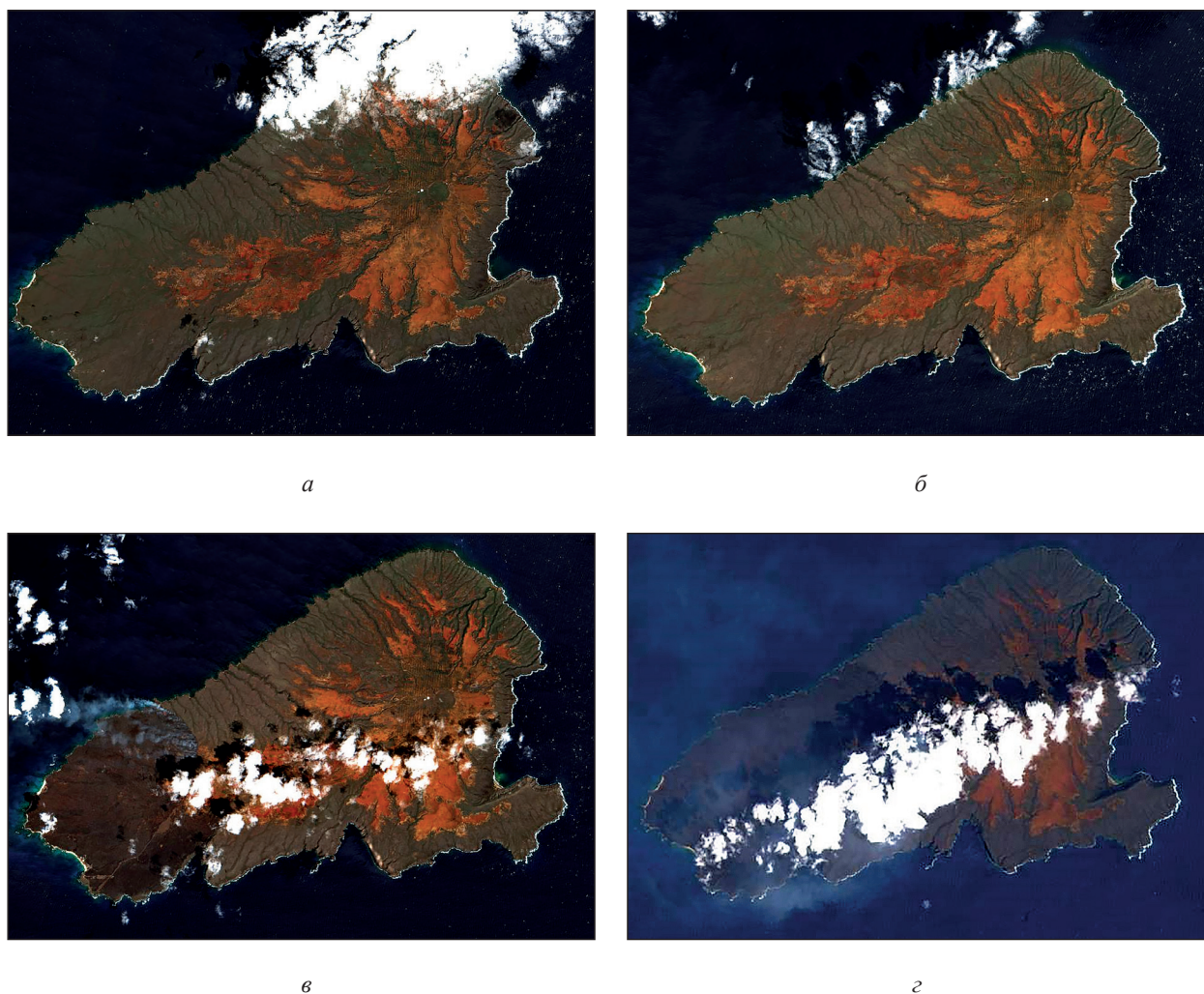


Рис. 2. Изображения о. Кахоолаве: даты съемки: а — 10.02.2020; б — 15.02.2020; в — 20.02.2020; г — 27.02.2020
Fig. 2. Images of Kahoolawe Island: dates: а — 10.02.2020; б — 15.02.2020; в — 20.02.2020; г — 27.02.2020

жение 15.02.2020 предназначено для демонстрации сложностей, возникающих при работе с индексами при существенной облачности.

Следует отметить, что спектральные данные Sentinel-2 после завершения горения 01.03.2020 и 06.03.2020 не представляют практической ценности по причине значительного покрытия облаками.

Съемка 25.02.2020 числа соответствует активной фазе горения растительного покрова, на ней отчетливо виден фронт со шлейфом дыма в верхней части острова. Нижняя часть, хотя и выгорела, но не имеет каких-либо явных признаков пожара; области, окрашенные в более светлые цвета (ближе к вершине), без существенной растительности и практически остаются неизменными. Причина подобного развития событий объясняется тем, что горение развивалось в основном за счет травы и низкорослых кустарников,

а в нижней части острова имеется достаточно крупный разлом скальных пород, который и послужил преградой для огня. На изображении от 27.02.2020 дымовые шлейфы выражены менее отчетливо, однако хорошо видна область выгоревшей растительности, частично закрытая облаками.

Ниже показаны (рис. 3) интенсивности индексов вегетации NDVI для различных моментов времени съемки, вычисляемые по формуле

$$F = \frac{MN_i}{2N},$$

где M — количество интервалов разбиения отрезка $[-1, 1]$;

N_i — количество значащих точек индекса, попавших в диапазон значений $[kh, (k+1)h]$, $h = 2/M$;

N — общее количество значащих точек в индексе.

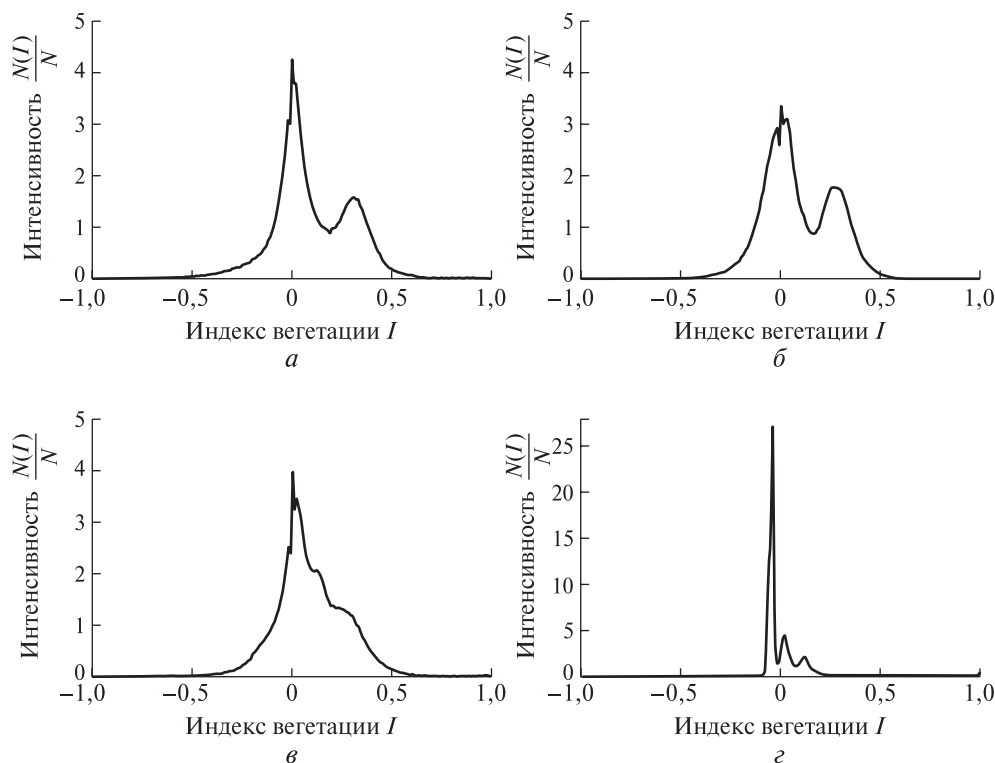


Рис. 3. Интенсивность индекса вегетации NDVI о. Кахоолаве: даты съемки: *a* — 15.02.2020; *б* — 20.02.2020; *в* — 25.02.2020; *г* — 27.02.2020

Fig. 3. NDVI vegetation index intensity of Kahoolawe Island: *dates*: *a* — 15.02.2020; *б* — 20.02.2020; *в* — 25.02.2020; *г* — 27.02.2020

Площадь под кривой, как следует из рис. 3, задаваемой указанным выражением, вычисленная по формуле прямоугольников, равна единице. На кривых, построенных по данным до начала горения, отчетливо прослеживается граница (локальный минимум на кривой вблизи значения 0,2) между значениями индекса, соответствующими участкам с интенсивным и редким растительными покровами. По мере выгорания растительности эта граница на кривых исчезает.

Визуализация рассчитанного по данным спектрометрии индекса вегетации NDVI в виде псевдоцветных изображений представлена на рис. 4. Для съемок 15, 20 и 25.02.2020 изображение получено путем преобразования значений индекса в диапазоне [0,2; 0,5] в градиентную палитру, от коричневого цвета (100, 100, 0) до зеленого (0, 255, 0) в RGB пространстве. Для съемки 27.02.2020 видимое изображение сформировано с помощью преобразования значений индекса в диапазоне [0,04; 0,5] в градиентную палитру в тех же цветах. Верхнее значение индекса при построении изображений взято равным 0,5, а не 1,0 в связи с отсутствием значащих точек в диапазоне [0,5; 1,0] (как следует из рис. 3). Уменьшение диапазона отображае-

мых значений позволяет ярче выделить цветом различия в индексе.

Из сравнения изображений о. Кахоолаве в видимом спектре и изображений индекса вегетации NDVI явно видно, что наличие облаков вносит погрешности в вычисление его значений. Так, например, на съемке 15.02.2020 верхняя часть острова как бы не имеет растительности, что явно не следует из изображения индекса вегетации от 20.02.2020. Точно так же на изображении от 27.02.2020 якобы есть интенсивная растительность в нижней части острова, но в действительности это густая облачность над этим участком в момент съемки.

Сопоставление значений индекса вегетации, полученных по данным 15.02.2020 и 20.02.2020, показывает, что в той части, где облачность была низкой, данные практически идентичны. Отсюда следует вывод: получаемая средствами мониторинга информация о вегетации достаточно стабильна в относительно небольших промежутках времени и ее можно использовать для обработки данных горения при относительно хороших условиях для съемки (при малой облачности).

На приведенных изображениях (рис. 5) имеются определенные дефекты, которые в даль-

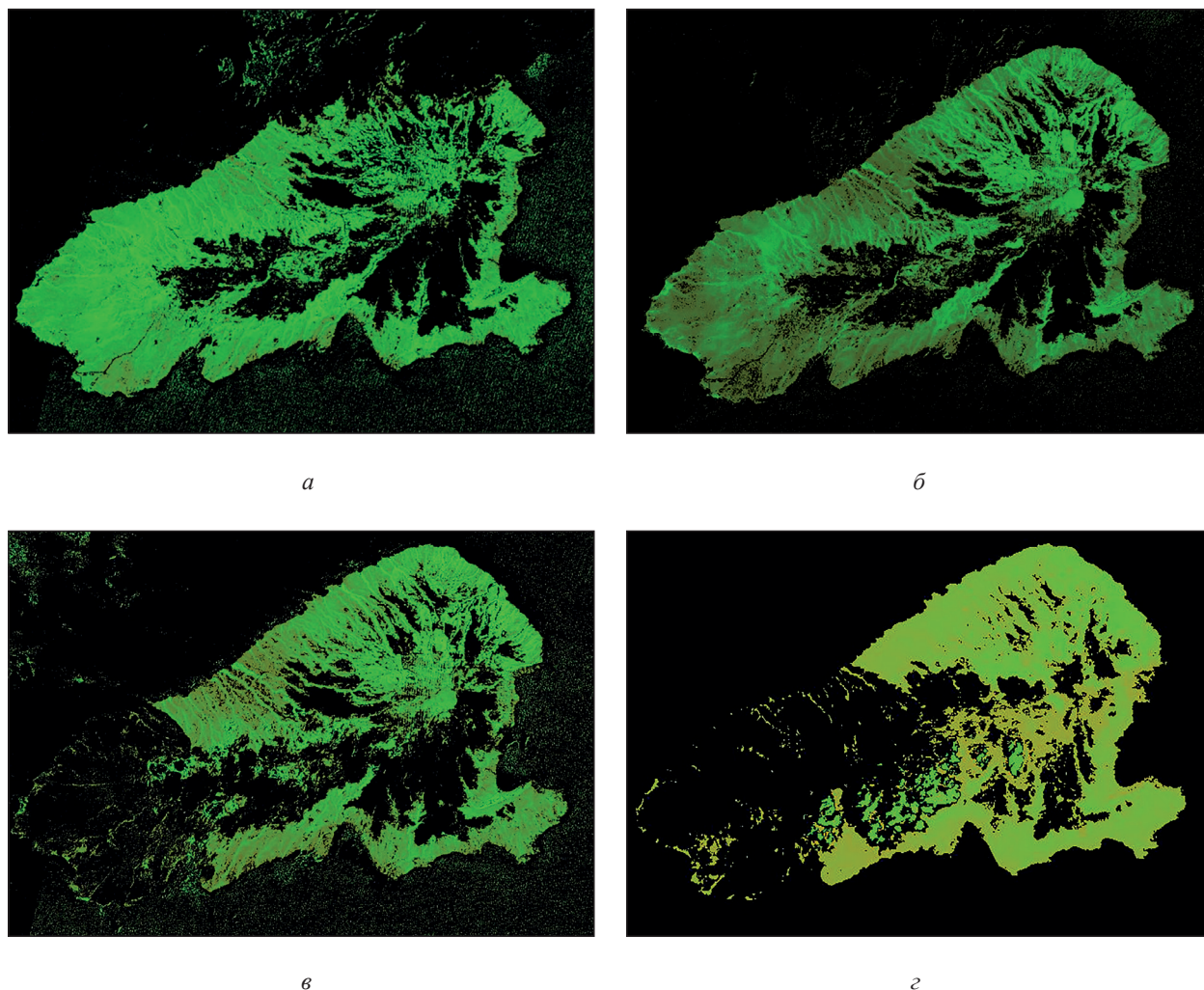


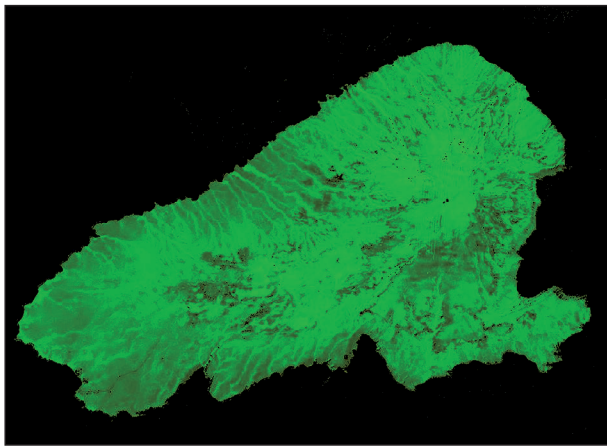
Рис. 4. Индексы вегетации NDVI по данным спектрометрии о. Кахоолаве: *даты съемки:* а — 15.02.2020; б — 20.02.2020; в — 25.02.2020; г — 27.02.2020
Fig. 4. NDVI vegetation indices based on spectrometry data for Kahoolawe Island: *dates:* а — 15.02.2020; б — 20.02.2020; в — 25.02.2020; г — 27.02.2020

нейшем следует минимизировать для получения более надежных результатов: у индекса вегетации NDVI имеются положительные значения в области, занятой водой (см. рис. 4, а, б). Для сравнения возможностей использования различных модификаций индекса вегетации (GNDVI, NDVIre1, NDVIre2, NDVIre3, NDre1 и NDre2), доступных для определения по спектрометрическим данным (съемка Sentinel-2 от 20.02.2020) представлены построенные по их значениям изображения (см. рис. 5).

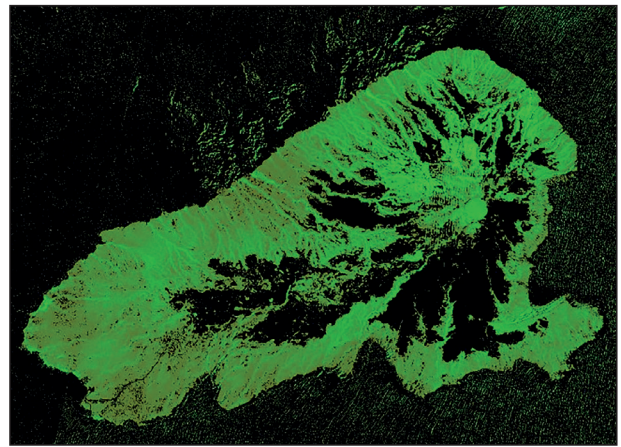
Как следует из рис. 5, индекс GNDVI в меньшей степени отражает перепады уровня растительности, однако не содержит такого количества дефектов, как индекс NDVI и не «показывает» растительность вне острова. Индекс NDVIre1 очень схож с индексом NDVI, а у индексов NDVIre2, NDVIre3 больше дефектов, нежели полезной информации. Индексы

NDre1 и NDre2 очень схожи по характеристикам с индексом NDVI и, вероятно, могут иногда использоваться как альтернатива в случае отсутствия спектральных данных ближнего ИК-диапазона.

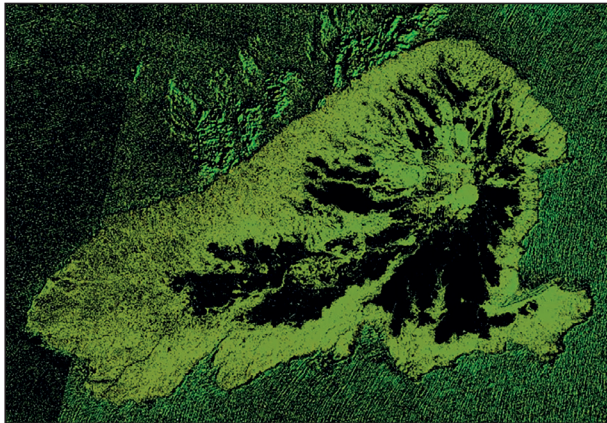
Ниже на рис. 6 приведены изображения индексов горения NBR-A и NBR-S. Индекс NBR-S представляет интерес если спектральная аппаратура не располагает средневолновым ИК-диапазоном, что актуально для научной аппаратуры МКС Гиперспектрометр [36–38]. Анализ индексов горения и вегетации показывает явную зависимость положения фронта горения от вегетации. На изображении индекса NBR-S четче прослеживается различие в плотности растительности и видно, что искривление фронта пожара приходится на участок с меньшей плотностью растительного покрова.



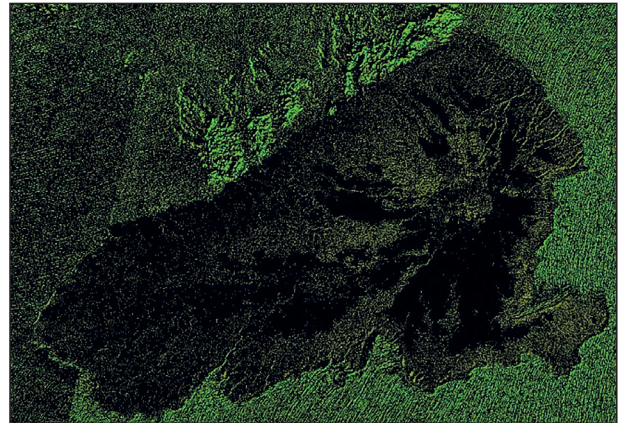
a



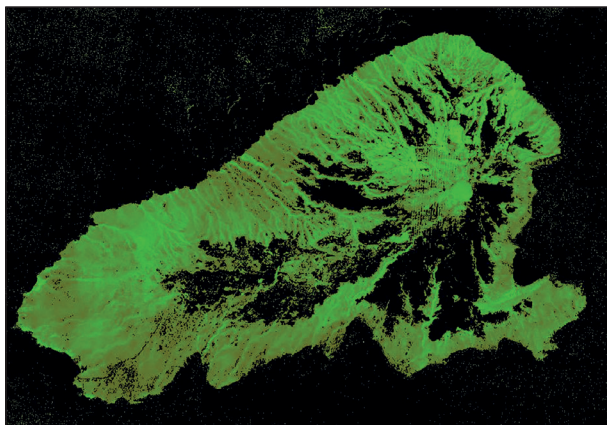
б



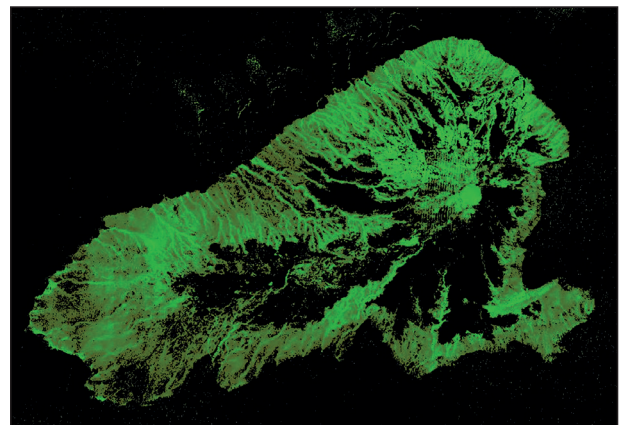
в



г



д



е

Рис. 5. Модифицированные индексы вегетации: *a* — GNDVI; *б* — NDVIre1; *в* — NDVIre2; *г* — NDVIre3; *д* — NDre1; *е* — NDre2

Fig. 5. Modified vegetation indices: *a* — GNDVI; *б* — NDVIre1; *в* — NDVIre2; *г* — NDVIre3; *д* — NDre1; *е* — NDre2

Для получения видимого изображения индекса NBR-A значения $[-1; 0,7]$ отображаются в цветах от черного (RGB 0, 0, 0) до белого

(RGB 255, 255, 255), значения в диапазоне $[0,7; 0,9]$ отображаются в оттенках красного цвета — от темного (RGB 100, 0, 0) до яркого

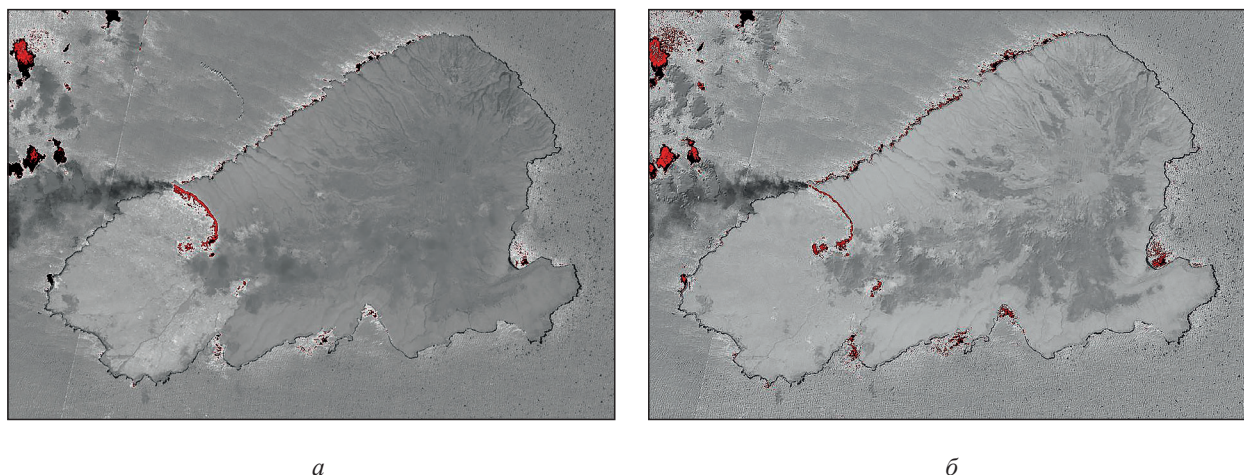


Рис. 6. Индексы горения NBR-A (а) и NBR-S (б), полученные по спектральным данным 25.02.2020

Fig. 6. NBR-A (a) and NBR-S (b) combustion indices obtained from spectral data on 25.02.2020

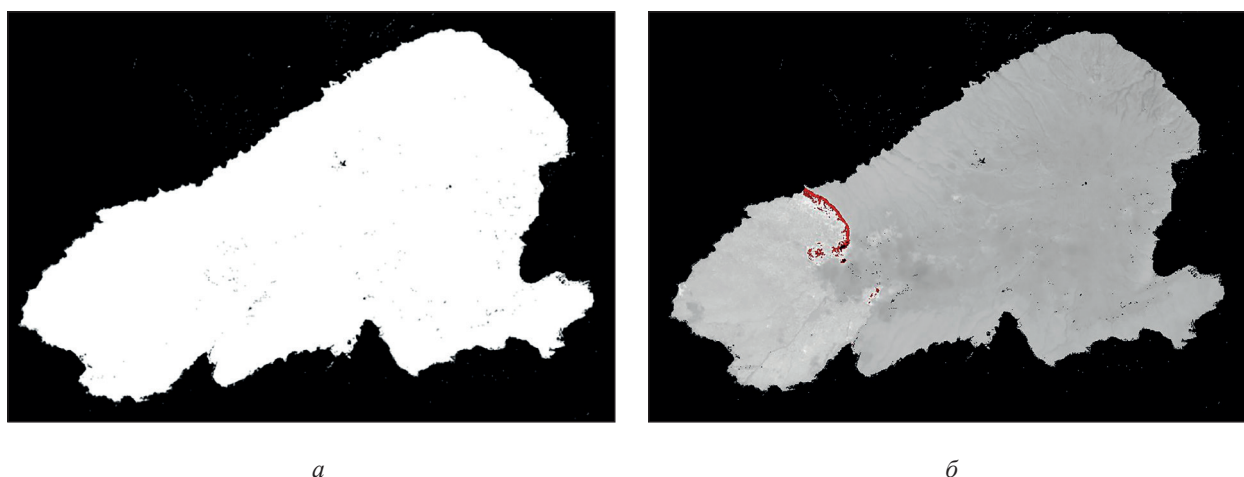


Рис. 7. Маска, построенная на основе индекса GNDVI (а); индекс NBR-A после применения маски (б)

Fig. 7. Mask constructed based on the GNDVI index (a); NBR-A index after applying the mask (b)

(RGB 255, 0, 0). Изображение для индекса NBR-S получают аналогично, только диапазон отображения изменяется на $[-1; 0,5]$ и $[0,5; 0,9]$. Как следует из рис. 6, индекс NBR-S практически не отличается от индекса NBR-A — небольшие различия есть в значении, по которому требуется проводить разделение на области горения и зоны, свободные от пожара. Оба индекса имеют один и тот же недостаток — наличие участков «ложного горения». В данном случае эти участки легко определяются, поскольку приходится на области, занятые водой. Для устранения их влияния на дальнейшую обработку данных съемок был использован метод маскирования с применением матрицы,

построенной на основе индекса GNDVI для спектральных данных от 20.02.2020. Формирование маски проводилось следующим образом: там, где значение индекса превышало 0,2, значение маски полагалось равным 1, в противном случае 0. На рис. 7 показаны изображения маски и результат ее применения к изображению индекса NBR-A.

В настоящей работе маски формировались простым отсечением по значению индекса GNDVI, что может приводить к некоторым незначительным дефектам (см. рис. 7). Для более качественного (но и более затратного в вычислительном плане) отделения водной поверхности от суши следует использовать

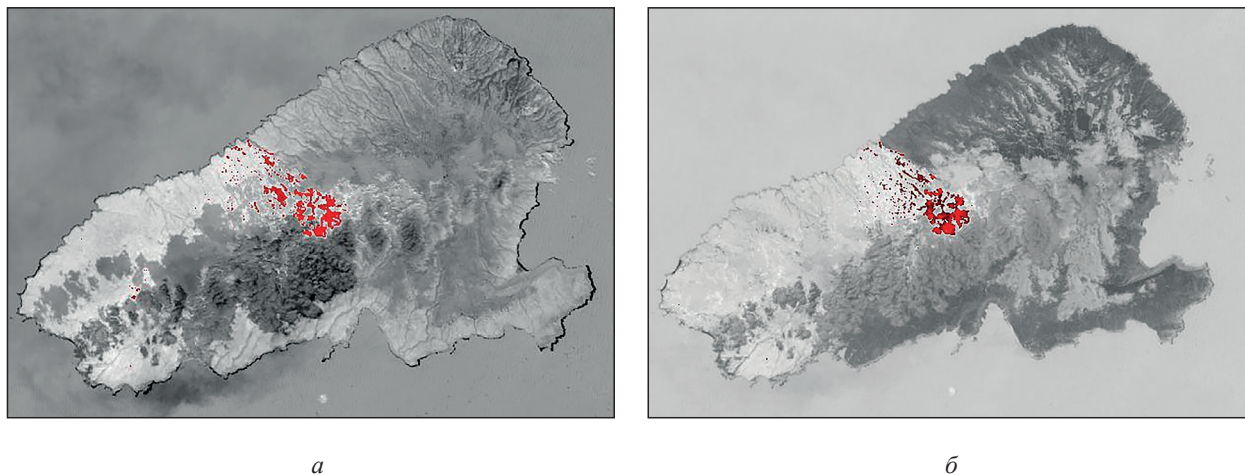


Рис. 8. Индексы горения NBR-A (а) и NBR-S (б), полученные по спектральным данным от 27.02.2020

Fig. 8. NBR-A (a) and NBR-S (б) combustion indices obtained from spectral data on 27.02.2020

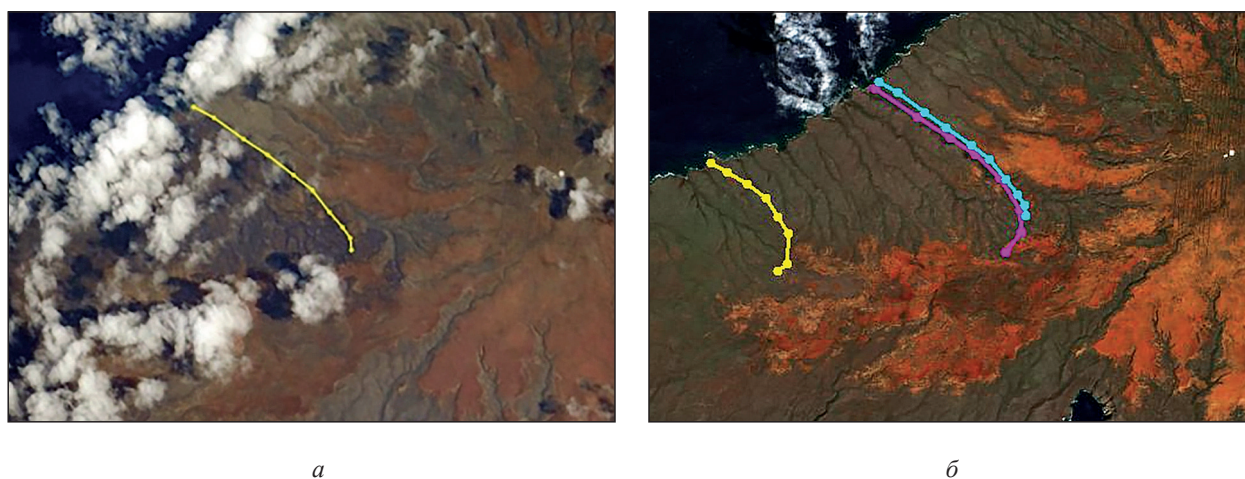


Рис. 9. Фотоснимок с борта Российского сегмента МКС от 06.03.2020, с нанесенным на нем положением границы выгоревшей растительности (а) и результаты совмещения фронтов горения и границ выгоревшей растительности (б)

Fig. 9. Photograph from the Russian segment of the ISS on 06.03.2020, with the location of the boundary of burnt vegetation marked on it (a) and the results of combining the fire fronts and the boundaries of burnt vegetation (б)

алгоритмы маскирования с дополнительным анализом пограничных значений индекса.

Изображения индексов горения NBR-A и NBR-S (рис. 8) были получены следующим образом: точки со значением индексов $[-1; 0,33]$ и $[-1; 0,2]$ соответственно окрашивались в оттенки серого в диапазоне от черного до белого, $[0,33; 1]$ и $[0,2; 1]$ соответственно — в оттенки красного от темного (RGB 100, 0, 0) до светлого (RGB 255, 0, 0).

Горение 27.02.2020 (см. рис. 8) в большей степени происходило в верхней части о. Кахоолаве (удаленной от воды) и распалось на отдельные

очаги. Сравнение индексов NBR-A, NBR-S и NDVI выявило искажения от облаков и их теней. Несмотря на это, открытое горение устойчиво детектируется в обоих индексах, позволяя высказать предположение об отсутствии значительного влияния на качество детектирования очагов пожаров от применения более коротковолновой части ИК-диапазона (1600 нм вместо 2200 нм).

Дальнейший анализ спектральных данных спутников Sentinel-2 и фотоснимков с МКС показал, что наиболее близок к дате завершения пожара 28.02.2020 и пригоден для восстановления границ выгорания снимок с МКС от 06.03.2020.

Положение фронтов горения и границ выгоревших участков демонстрируется на рис. 9. На рис. 9, *а* представлен фотоснимок с МКС от 06.03.2020 с выделенной на нем границей области выгорания, на рис. 9, *б* — изображение острова по спектральным данным Sentinel-2 от 15.02.2020, на котором показаны границы пожара: желтой линией — на 25.02.2020 (по индексу NBR-A, спектроизображение Sentinel-2), малиновой — на 27.02.2020 (по индексу NBR-A и зоне выгорания, спектроизображение Landsat-8), голубой — на 06.03.2020 (по зоне выгорания на снимке с борта Российского сегмента МКС).

Выводы

Проведенные анализ и обработка спектральных данных спутников Sentinel-2, Landsat-8 и фотоснимков с МКС позволили охарактеризовать возможности совместного применения разнотипных данных для оценки динамики пожара, в частности на о. Кахоолаве в 2020 г. Существующие космические аппараты, которые могут осуществлять мультиспектральную съемку, с их периодами обращения не дают возможность достаточно полно контролировать динамику процессов горения. Наличие значительной облачности над объектами съемки в сильной степени препятствует получению корректных количественных данных о процессах горения. Однако, несмотря на эти проблемы при использовании данных с нескольких аппаратов, наблюдения из космоса позволяют контролировать труднодоступные территории с приемлемой периодичностью и совместно с воздушными средствами мониторинга представляют собой мощнейший механизм контроля состояния природных и биологических ресурсов.

Список литературы

- [1] Garcia M.J.L., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data // *Geocarto Int.*, 1991, v. 6, no. 1, pp. 31–37.
- [2] Wind B., Justice C.O., Vadrevu K.P., Ellicott E., Schroeder W. Active fires from the Suomi NPP visible infrared imaging radiometer suite: product status and first evaluation results // *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2014, v. 119, pp. 803–816.
- [3] Мамедалиева В.М. Изменение лесных массивов северо-восточного региона Азербайджана по космическим снимкам // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2022. № 1. С. 88–97.
- [4] Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 419–429.
- [5] Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.
- [6] 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.
- [7] Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыщенко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
- [8] Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыщенко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю. Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
- [9] Барталев С.А., Стыщенко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // *Лесоведение*, 2015. № 2. С. 83–94.
- [10] 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.
- [11] Буряк Л.В., Сухинин А.И., Каленская О.П., Пономарев Е.И. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // *Сибирский экологический журнал*, 2011. Т. 18. № 3. С. 331–339.
- [12] Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Барталев С.С., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Стыщенко Ф.В. Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2015. Т. 12. № 4. С. 7–16.
- [13] Кобец Д.А., Балашов И.В., Данилов И.Д., Лупян Е.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А. Использование VI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
- [14] Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
- [15] Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
- [16] Пономарев Е.И., Харук В.И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // *Сибирский экологический журнал*, 2016. № 1. С. 38–46. DOI:10.15372/SEJ20160104

- [17] Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследование Земли из космоса, 2015. № 1. С. 84–91. DOI:10.7868/S0205961415010054
- [18] Стыщенко Ф.В., Баргалева С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
- [19] Стыщенко Ф.В., Баргалева С.А., Иванова А.А., Лупян Е.А., Сычугов И.Г. Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. Т. 13. № 6. С. 189–298. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298
- [20] Merlin M.D., Juvik J.O. Relationship among native and alien plants on pacific islands with and without significant human disturbance and feral ungulates // Alien plant invasions in native ecosystem of Hawaii. Univ. of Hawaii, 1992, pp. 597–624.
- [21] Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // Ecology, 1969, v. 50, no. 4, pp. 663–666.
- [22] Ajai, Kamat D.S., Chaturvedi G.S., Singh A.K., Sinha S.K. Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea // Photogrammetric engineering and remote sensing, 1983, v. 49, no. 12, pp. 1721–1727.
- [23] Curran P.J. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index // Philosophical Transactions, 1983, v. 309, pp. 257–270.
- [24] Baret F., Champion I., Guyot G., Podaire A. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer // Remote Sens. Environ., 1987, v. 22, no. 2, pp. 367–378.
- [25] Kasischke E.S., French H.F. Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forests using multiple-season AVHRR NDVI composite data // Remote Sens. Environ., 1995, v. 51, no. 2, pp. 263–275.
- [26] Fernandez A., Illera P., Casanova J.L. Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data // Remote Sens. Environ., 1997, v. 60, no. 2, pp. 153–162.
- [27] Pereira J.M.C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 1999, v. 37, no. 1, pp. 217–226.
- [28] Chuvieco E., Martin M.P., Palacios E.A. Assessment of different spectral indices in the red near-infrared spectral domain for burned land discrimination // Int. J. Remote Sens., 2002, v. 23, pp. 5103–5110.
- [29] Frampton W.J., Dash J., Watmough G., Milton E.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, v. 82, pp. 83–92.
- [30] Hill M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel-2 data for a North American transect // Remote Sens. Environ., 2013, v. 137, pp. 94–111.
- [31] van Wagtenonk J.W., Root R.R., Key C.H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity // Remote Sens. Environ., 2004, v. 92, no. 3, pp. 397–408.
- [32] Coker A.E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data // Int. J. Wildland Fire, 2005, v. 14, pp. 189–198.
- [33] Epting J., Verbyla D., Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ // Remote Sens. Environ., 2005, v. 96, no. 3–4, pp. 328–339.
- [34] Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images. // Int. J. Remote Sens., 2008, v. 29, no. 4, pp. 1053–1073.
- [35] Fernandez-Manso A., Fernandez-Manso O., Quintano C. Sentinel-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity // Int. J. App. Earth Obs. Geoinf., 2016, v. 50, pp. 170–175.
- [36] Беляев М.Ю., Коротков Д.М., Кузьмичев А.С., Николенко А.А., Черемисин М.В., Шибанов С.Ю., Щербаков М.В., Щербина Г.А. Дистанционное зондирование Земли с Российского сегмента МКС с использованием перспективной научной аппаратуры Гиперспектрометр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы 17-й Всерос. открытой конф. Москва, 11–15 ноября 2019 г. М.: ИКИ РАН, 2019. 508 с.
- [37] Беляев М.Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
- [38] Беляев М.Ю. Изучение Земли в эксперименте «Ураган» // Земля и Вселенная, 2024. № 2. С. 24–43.

Сведения об авторах

Беляев Михаил Юрьевич [✉] — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматического управления», ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал); науч. руководитель космического эксперимента «Ураган», ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» («РКК «Энергия»), mikhail.belyaev@rsce.ru

Есаков Алексей Михайлович — аспирант, инженер-программист Центра полезной нагрузки, ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева» («РКК «Энергия»), aleksey.esakov2@rsce.ru

Ильясов Хисам Хисамович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ФГБОУ «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН), ilyasov@ipmnet.ru

Назайкинский Владимир Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, гл. науч. сотр., ФГБОУ «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН)

Поступила в редакцию 28.04.2025.

Одобрено после рецензирования 15.09.2025.

Принята к публикации 21.01.2026.

USE OF SPECTRAL AND PHOTOGRAPHIC IMAGES FROM SPACE TO MONITOR WILDFIRES

M.Y. Belyaev^{1, 2✉}, A.M. Esakov², H.H. Il'yasov³, V.E. Nazaykinskiy³

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Rocket and Space Corporation Energia, named after S.P. Korolev, 4a, Lenin st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

³A.Y. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 101, bld. 1, Vernadsky av., 119526, Moscow, Russia

mikhail.belyaev@rsce.ru

This paper describes methods for using spectral images and satellite photographs to determine the flame front and burnt area boundaries during fire monitoring. Data from the spectral systems of the Sentinel-2 and Landsat-8 satellites, as well as photographs from the International Space Station (ISS) obtained during the Uragan and Scenario space experiments, are used. Data obtained during the 2020 fire on Kahoolawe Island, part of the Hawaiian Islands, are processed and analyzed. The possibility of combining these different types of data to assess fire dynamics is demonstrated.

Keywords: wildfires, spectral data, photographs from space, flame front, scorched areas, vegetation indexes

Suggested citation: Belyaev M.Yu., Esakov A.M., Il'yasov H.H., Nazaykinskiy V.E. *Sovmestnoe ispol'zovanie spektral'nykh i fotograficheskikh snimkov iz kosmosa dlya monitoringa pozharov* [Use of spectral and photographic images from space to monitor wildfires]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 43–57. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-43-57


References

- [1] Garcia M.J.L., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data // *Geocarto Int.*, 1991, v. 6, no. 1, pp. 31–37.
- [2] Wind B., Justice C.O., Vadrevu K.P., Ellicott E., Schroeder W. Active fires from the Suomi NPP visible infrared imaging radiometer suite: product status and first evaluation results. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2014, v. 119, pp. 803–816.
- [3] Mamedaliev V.M. *Izmenenie lesnykh massivov severo-vostochnogo regiona Azerbaydzhana po kosmicheskim snimkam* [Changes in woodlands of north-eastern region of Azerbaijan according to images from space]. *Russian Forestry J.*, 2022, no. 1, pp. 88–97.
- [4] Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotel'nikov R.V., Lupyan E.A., Shchetinskiy V.E. *Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva RF (sostoyanie i*

- perspektivy razvitiya*) [Information system for remote monitoring of forest fires of the RF Federal Forest Management Agency (current status and prospects for further development)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2008, v. 2, pp. 419–429.
- [5] Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotelnikov R.V., Lupyan E.A., Shchetinskiy V.E. *Osnovnye vozmozhnosti i struktura informatsionnoy sistemy distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva (ISDM Rosleskhoz)* [Core capabilities and architecture of the Information System for Remote Monitoring of forest fires of the Federal Forest Management Agency (ISRM Rosleskhoz)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2010, v. 7, no. 2, pp. 97–105.
- [6] Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrodimetra MODIS* [Satellite mapping of Russia's vegetation cover using data from MODIS Spectroradiometer]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2011, v. 8, no. 4, pp. 285–302.
- [7] Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. *Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+* [Estimation of surface area covered by wildfires based on integration of satellite data of different spatial resolution from MODIS and Landsat-TM/ETM+]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2012, v. 9, no. 2, pp. 9–27.
- [8] Bartalev S.A., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu. *Ekspress-kartografirovaniye povrezhdeniy lesov Rossii pozharami po sputnikovym dannym Landsat* [Instant mapping of damage to Russia's forests using satellite data from Landsat]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2014, v. 11, no. 1, pp. 9–20.
- [9] Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. *Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov* [Satellite-based estimate of loss of forests in Russia caused by wildfires]. *Lesovedenie* [Forestry], 2015, no. 2, pp. 83–94.
- [10] Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* [Satellite mapping of Russia's vegetative cover]. Moscow: IKI RAS, 2016, 208 p.
- [11] Buryak L.V., Sukhinin A.I., Kalenskaya O.P., Ponomarev E.I. *Posledstviya pozharov v lentochnykh borakh yuga Sibiri* [Fire effects in ribbon forests of Southern Siberia]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Environmental J.], 2011, v. 18, no. 3, pp. 331–339.
- [12] Kashnitskiy A.V., Lupyan E.A., Bartalev S.A., Bartalev S.S., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Stytsenko F.V. *Optimizatsiya interaktivnykh protsedur kartografirovaniya garey v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa prirodnykh pozharov* [Optimizing interactive procedures for mapping burned-out forests in information systems for remote monitoring of wildfires]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2015, v. 12, no. 4, pp. 7–16.
- [13] Kobets D.A., Balashov I.V., Danilov I.D., Lupyan E.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A. *Ispol'zovaniye VI-tekhnologiy dlya sozdaniya instrumentov dlya analiza dannykh sputnikovogo monitoring* [Use of BI-technologies to develop tools for analyzing satellite monitoring data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2015, v. 12, no. 4, pp. 17–27.
- [14] Korovin G.N., Andreev N.A. *Aviatsionnaya okhrana lesov* [Aerial forest conservation]. Moscow: Agropromizdat [Agropromizdat], 1988, 223 p.
- [15] Lupyan E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E. *Sputnikovyy servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti («VEGA»)* [Satellite service of monitoring vegetation condition («VEGA»)] *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2011, v. 8, no. 1, pp. 190–198.
- [16] Ponomarev E.I., Kharuk V.I. *Gorimost' lesov Altae-Sayanskogo regiona Sibiri v usloviyakh nablyudaemykh izmeneniy klimata* [Frequency of fire occurrence in the forests of Altai-Sayans region of Siberia under conditions of observed climate changes]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Environmental J.], 2016, no. 1, pp. 38–46. DOI:10.15372/SEJ20160104
- [17] Ponomarev E.I., Shvetsov E.G. *Sputnikovoe detektirovaniye lesnykh pozharov i geoinformatsionnye metody kalibrovki rezul'tatov* [Satellite detection of forest fires and geoinformation methods of calibrating the results]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Studies from Space], 2015, no. 1, pp. 84–91. DOI:10.7868/S0205961415010054
- [18] Chtytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Lupyan E.A. *Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharami na osnove sputnikovykh dannykh MODIS* [A method for estimating the level of fire damage to forests based on MODIS satellite data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2013, v. 10, no. 1, pp. 254–266.
- [19] Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Ivanova A.A., Lupyan E.A., Sychugov I.G. *Vozmozhnosti otsenki ploshchadey lesnykh pozharov v regionakh Rossii na osnove dannykh sputnikovogo detektirovaniya aktivnogo goreniya* [Feasibility of estimating surface area of wildfires based on data of satellite detection of active combustion]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2016, v. 13, no. 6, pp. 189–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298
- [20] Merlin M.D., Juvik J.O. Relationship among native and alien plants on pacific islands with and without significant human disturbance and feral ungulates. Alien plant invasions in native ecosystem of Hawaii. Univ. of Hawaii, 1992, pp. 597–624.
- [21] Jordan C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 1969, v. 50, no. 4, pp. 663–666.

- [22] Ajai, Kamat D.S., Chaturvedi G.S., Singh A.K., Sinha S.K. Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1983, v. 49, no. 12, pp. 1721–1727.
- [23] Curran P.J. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions*, 1983, v. 309, pp. 257–270.
- [24] Baret F., Champion I., Guyot G., Podaire A. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. *Remote Sens. Environ.*, 1987, v. 22, no. 2, pp. 367–378.
- [25] Kasischke E.S., French H.F. Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forests using multiple-season AVHRR NDVI composite data. *Remote Sens. Environ.*, 1995, v. 51, no. 2, pp. 263–275.
- [26] Fernandez A., Illera P., Casanova J.L. Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sens. Environ.*, 1997, v. 60, no. 2, pp. 153–162.
- [27] Pereira J.M.C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1999, v. 37, no. 1, pp. 217–226.
- [28] Chuvieco E., Martin M.P., Palacios E.A. Assessment of different spectral indices in the red near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *Int. J. Remote Sens.*, 2002, v. 23, pp. 5103–5110.
- [29] Frampton W.J., Dash J., Watmough G., Milton E.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, v. 82, pp. 83–92.
- [30] Hill M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel 2 data for a North American transect. *Remote Sens. Environ.*, 2013, v. 137, pp. 94–111.
- [31] van Wagtenonk J.W., Root R.R., Key C.H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sens. Environ.*, 2004, v. 92, no. 3, pp. 397–408.
- [32] Cocks A.E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data. *Int. J. Wildland Fire*, 2005, v. 14, pp. 189–198.
- [33] Epting J., Verbyla D., Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sens. Environ.*, 2005, v. 96, no. 3–4, pp. 328–339.
- [34] Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, v. 29, no. 4, pp. 1053–1073.
- [35] Fernandez-Manso A., Fernandez-Manso O., Quintano C. Sentinel-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *Int. J. App. Earth Obs. Geoinf.*, 2016, v. 50, pp. 170–175.
- [36] Belyaev M.Yu., Korotkov D.M., Kuz'michev A.S., Nikolenko A.A., Cheremisin M.V., Shibanov S.Yu., Shcherbakov M.V., Shcherbina G.A. *Distsionnoe zondirovanie Zemli s Rossiyskogo segmenta MKS s ispol'zovaniem perspektivnoy nauchnoy apparatury Giperspektrometr* [Earth remote sensing from the ISS Russian Segment using advanced scientific equipment HyperSpectrometer] *Materialy 17-y Vseros. otkrytoy konf. «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»* [Proceedings of the 17th All-Russia Open Conference «Current problems in Earth remote sensing from space»]. Moscow, November 11–15, 2019. Moscow: IKI RAN, 2019, 508 p.
- [37] Belyaev M.Yu. *Nauchnaya apparatura i metody izucheniya Zemli v kosmicheskoy eksperimente «Uragan» na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii* [Scientific equipment and methods for studying Earth in the Uragan space experiment onboard the International Space Station]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in Earth remote sensing], 2021, t. 18, no. 3, pp. 92–107.
- [38] Belyaev M.Yu. *Izuchenie Zemli v eksperimente «Uragan»* [Studying Earth in the «Uragan» experiment]. *Zemlya i Vselennaya* [Earth and Universe], 2024, no. 2, pp. 24–43.

Authors' information

Belyaev Mikhail Yur'evich  — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of Chair «Automatic Control Systems» of the BMSTU (Mytishchi branch); Research Supervisor of the Space experiment «Uragan», Rocket and Space Corporation Energia, named after S.P. Korolev, mikhail.belyaev@rsce.ru

Esakov Aleksey Mikhaylovich — pg., Software Engineer of the Payload Center of the Rocket and Space Corporation Energia, named after S.P. Korolev, aleksey.esakov2@rsce.ru

Il'yasov Hisam Hisamovich — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Institute for Problems in Mechanics of RAS, ilyasov@ipmnet.ru

Nazaykinskiy Vladimir Evgen'evich — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Corresponding member of RAS, Chief Researcher of the Institute for Problems in Mechanics of RAS

Received 28.04.2025.

Approved after review 15.09.2025.

Accepted for publication 21.01.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
 The authors declare that there is no conflict of interest