

КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ *Landsat 8* И *Sentinel 2A* ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Ле Хунг Чинь¹
В.Р. Заблоцкий²

trinhlehung@lqdtu.edu.vn
zablotskii@bmstu.ru

¹ Государственный технический университет им. Ле Куй Дон, Ханой, Вьетнам

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Температура подстилающей поверхности является важным параметром теплового излучения подстилающей поверхности и может использоваться при мониторинге лесных, угольных пожаров, теплового излучения городов и разработке климатических моделей. Наземные наблюдения дают информацию о температуре небольших площадей вокруг метеостанций и фактически не могут предоставить высокую плотность данных о температуре поверхности. Многообещающими в этом отношении являются технологии дистанционного зондирования. Однако вследствие низкого пространственного разрешения в инфракрасном канале температура поверхности, рассчитанная по изображениям со спутников *Landsat* и *Aster*, не всегда имеет требуемую детализацию, необходимую при изучении небольших территорий. Представлены результаты комбинирования (совместной цифровой обработки) изображений со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8*, выполненного в целях повышения пространственного разрешения температуры подстилающей поверхности. Сравнение экстремальных значений температуры поверхности показывает, что, несмотря на небольшое отличие экстремальных значений температуры, пространственное поле температуры в случае комбинирования изображений было более детальным и переменным. Об этом свидетельствует существенное увеличение варибельности стандартного отклонения температуры. Прямые визуальные наблюдения фрагментов изображений также подтверждают, что комбинирование изображений

Ключевые слова

Дистанционное зондирование, температура подстилающей поверхности, комбинирование изображений, *Sentinel 2A*, *Landsat 8*

со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8* повышает пространственное разрешение температуры поверхности по сравнению с изображением со спутника *Landsat 8*

Поступила 02.04.2021

Принята 12.05.2021

© Автор(ы), 2021

Введение. Температура поверхности Земли является важным параметром при изучении распределения тепловых полей городов, обнаружении лесных и подземных пожаров, изучении опустынивания территорий, прогнозирования динамики влажности почвы. Температуру поверхности можно оценить с использованием изображений со спутников *Landsat*, *Aster*, *MODIS*, *NOAA/AVHRR* на основе тепловых инфракрасных каналов. Тепловые инфракрасные изображения поверхности Земли, получаемые спутниками дистанционного зондирования, обладают преимуществами по сравнению с наземными методами контроля температуры поверхности и могут эффективно использоваться для мониторинга и оценки пространственно-временных распределений лесных пожаров и эмиссии углеродсодержащих газов и аэрозолей [1–3].

Температура поверхности Земли на основе данных спутника *MODIS* характеризуется глобальным охватом территории, высоким радиометрическим разрешением и широким динамическим диапазоном, а также высокой точностью калибровки в тепловом инфракрасном диапазоне [4]. Тепловые инфракрасные каналы изображения со спутника *MODIS* использовали для изучения «городского острова тепла» [5] и оценки температуры городского воздуха [6, 7]. Однако низкое пространственное разрешение (около 1000 м по инфракрасно-тепловым каналам *MODIS*) температуры поверхности не подходит для изучения сравнительно небольших территорий.

Тепловая инфракрасная съемка спутников *Landsat* и *Aster* с пространственным разрешением 60...120 м позволяет получить более детальную информацию о температуре поверхности по сравнению с изображениями со спутников *MODIS*, *NOAA/AVHRR*. Многие исследователи [8–12] используют тепловые инфракрасные изображения для оценки температуры поверхности больших городов. Показано существование тесной связи температуры и особенностей поверхностного покрова [13–18]. Как правило, территории с высокой плотностью городской застройки и редкой растительностью имеют более высокую температуру поверхности, чем территории, покрытые густой растительностью.

Температура поверхности, определяемая по изображениям со спутников *Landsat* и *Aster*, может использоваться для раннего обнаружения и мониторинга подземных пожаров в районах добычи угля [19–21]. Исследова-

ния показывают, что температура поверхности угольных шахт с подземными пожарами может быть значительно выше температуры окружающей территории, даже по сравнению с асфальтовыми поверхностями городских площадей. Тепловые инфракрасные каналы изображений со спутников *Landsat*, *Aster*, *MODIS* используют во многих исследованиях для оценки влажности почвы, опустынивания и развития катастрофических засушливых явлений, например, [22, 23]. Тепловые инфракрасные изображения со спутников *MODIS*, *NOAA/AVHRR* также применяют для обнаружения и раннего предупреждения лесных пожаров [24, 25].

В настоящее время для решения некоторых практических задач требуются тепловые изображения с высокой и сверхвысокой разрешающей способностью. Недостаточно высокое пространственное разрешение тепловых инфракрасных каналов изображений со спутников *Landsat*, *Aster*, *MODIS* создает трудности в их использовании. Некоторое решение проблемы заключается в использовании красного и ближнего инфракрасного каналов изображений со спутника *Landsat* для расчета излучательной способности поверхности. Это позволяет повысить пространственное разрешение изображений по температуре до 30 м. Однако даже такое пространственное разрешение не всегда подходит для решения некоторых задач на локальном уровне.

В целях повышения пространственного разрешения изображений по температуре подстилающей поверхности авторами использовано комбинирование изображений со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8*. Под термином комбинирование изображений понимается компьютерная обработка двух спутниковых изображений, полученных в разном диапазоне электромагнитных волн, с использованием определенных числовых констант, зависящих от характеристик съемочной аппаратуры для получения одного изображения, в пикселях которого содержится информация о распределении термодинамической температуры поверхности. Более подробно этот процесс описан ниже. При этом учтено, что излучательная способность поверхности является величиной, сильно изменяющейся в течение дневного времени, и комбинирование изображений можно выполнять только для полученных одновременно или почти одновременно изображений.

В работе представлены результаты определения температуры поверхности на основе объединения данных со снимков спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* для двух изучаемых территорий Вьетнама: 1) угольная шахта Хань Хоа; 2) г. Тхань Хоа.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Исходные данные. Данные дистанционного зондирования включают в себя два

снимка со спутника *Landsat 8* и два с *Sentinel 2A*. Космический аппарат *Landsat 8* — спутник программы *LANDSAT* (НАСА, США) имеет две системы съемки: 1) оптический датчик *OLI*; 2) инфракрасный термодатчик *TIRS*. Изображение со спутника *Landsat 8* содержит 11 спектральных каналов, в том числе девять многозональных, один панхроматический и два тепловых инфракрасных канала с пространственным разрешением 100 м.

Космическая система *Sentinel 2A* (программа Европейского космического агентства *Copernicus*) состоит из двух аппаратов с одинаковыми системами съемки, предоставляющими изображения в 13 спектральных каналах в видимом и инфракрасном диапазоне 0,443...190 мкм с пятидневным циклом обновления. Изображения имеют 10-метровое пространственное разрешение в видимом и ближнем инфракрасном каналах.

Для угольной шахты Хань Хоа (тестовый участок № 1, провинция Тхай Нгуен) использованы изображения со спутников *Landsat 8* (съемка 07.06.2018) и *Sentinel 2A* (08.06.2018). Для г. Тхань Хоа (тестовый участок № 2, провинция Тхань Хоа) использованы изображения со спутников *Landsat 8* (съемка 02.07.2018) и *Sentinel 2A* (съемка 03.07.2018). Изображения со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* выбраны с минимальным разрывом по времени съемки в целях уменьшения влияния варьирования излучения на результат расчета температуры поверхности.

Методы обработки данных. На первом этапе для определения температуры подстилающей поверхности использован тепловой инфракрасный канал изображения со спутника *Landsat 8* [26], на основе которого определена яркостная температура

$$T_B = \frac{K_2}{\ln(K_1 / L_\lambda + 1)},$$

где K_1, K_2 — калибровочные константы, Вт/(м² · ср · мкм), К.

Значения калибровочных констант для спектрального канала 10 спутника *Landsat 8* $K_1 = 774,89$ Вт/(м² · ср · мкм) и $K_2 = 1321,08$ К, для спектрального канала 11 $K_1 = 480,89$ Вт/(м² · ср · мкм) и $K_2 = 1201,14$ К.

Спектральная плотность мощности излучения, Вт/(м²·ср·мкм):

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L,$$

где M_L, A_L — калибровочные константы, определенные типом сенсора (величины *RADIANCE_MIUL_BAND_x* и *RADIANCE_ADD_BAND_x*); Q_{cal} — яркостное значение пикселя (целочисленная величина). Значения

калибровочных констант M_L , A_L для спектральных каналов 10 и 11 спутника *Landsat 8 TIRS* равны $3,3420 \cdot 10^{-4}$ и $0,10000$ соответственно.

На втором этапе цифровой обработки красный канал (канал 4) и ближний инфракрасный канал (канал 8) изображения со спутника *Sentinel 2A* использованы для расчета поверхностного излучения [27]:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v). \quad (1)$$

Здесь ε — спектральный коэффициент излучения; P_v — соотношение растительности и почвы для пикселя [28],

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2,$$

$NDVI_v$, $NDVI_s$ — значения индекса $NDVI$ для растительности и почвы; ε_v — спектральный коэффициент излучения растительности; ε_s — спектральный коэффициент излучения почвы. Для открытой почвы $P_v = 0$, для поверхности, полностью покрытой растениями, $P_v = 1$. Индекс $NDVI$ определен на основе спектральной отражательной способности в ближнем инфракрасном и красном каналах *Sentinel 2A* по формуле

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}},$$

где ρ_{NIR} , ρ_{RED} — коэффициенты отражения в ближней и красной инфракрасной зонах изображения со спутника *Sentinel 2A*.

На третьем этапе цифровой обработки изображений вычислена термодинамическая температура поверхности:

$$LST = \frac{T_B}{1 + (\lambda T_B / \rho) \ln \varepsilon}. \quad (2)$$

Здесь λ — среднее значение длины волны инфракрасного теплового канала; ρ — константа ($1,438 \cdot 10^{-2}$ м · К).

Этапы цифровой обработки изображений для определения температуры поверхности при комбинированном использовании многозональных изображений со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8* показаны на рис. 1.

Обсуждение полученных результатов. Тестовый участок № 1. Угольная шахта Хань Хоа находится в окрестности г. Тхай Нгуен. На шахте в 2008 г. произошел подземный пожар. Авторы работы [29] обнаружили по изображениям угольной шахты Хань Хоа со спутника *Landsat 8* участки с необычайно высокими значениями температуры поверхности. Поскольку

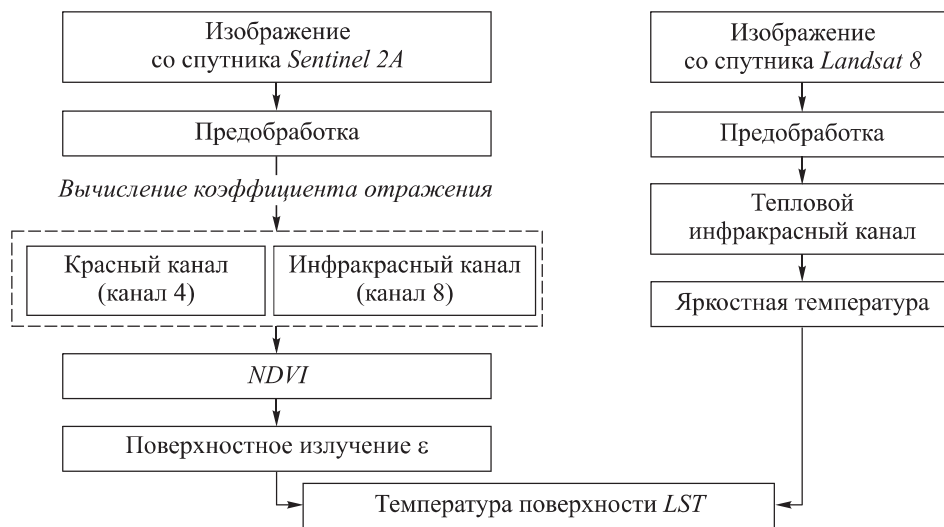


Рис. 1. Схема методики определения температуры поверхности при комбинированном использовании многозональных изображений со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8*

пространственное разрешение температуры было довольно низким, а территория угольной шахты невелика, детальные исследования и мониторинг подземного пожара на шахте не проводился.

В работе температура поверхности для тестового участка № 1 рассчитана на основе изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A*. Для этого было выбрано 50 площадок открытой почвы и растительности и на основе индекса *NDVI* вычислены значения $NDVI_v$, $NDVI_s$. Затем коэффициенты излучения открытой почвы ε_s и растительности ε_v были определены с использованием метода, предложенного в [30], по формуле

$$\varepsilon = 1,0094 + 0,047 \ln NDVI. \quad (3)$$

Полученные коэффициенты излучения изменялись в диапазоне значений 0,912–0,978. На участках, покрытых разреженной растительностью, значения коэффициентов излучения достигали 0,93, на участках с густой и плотной растительностью — 0,95. Открытая почва, строительные площадки и водная поверхность характеризуются более низкими значениями коэффициента излучения, находящимися в диапазоне значений 0,91–0,92.

Коэффициенты излучения, определенные по изображению со спутника *Sentinel 2A*, использованы для расчета температуры поверхности (2). Распределение термодинамической температуры поверхности (шкала Кельвина) на угольной шахте Хань Хоа, полученное при комбинировании изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A*, представлено на рис. 2, а.

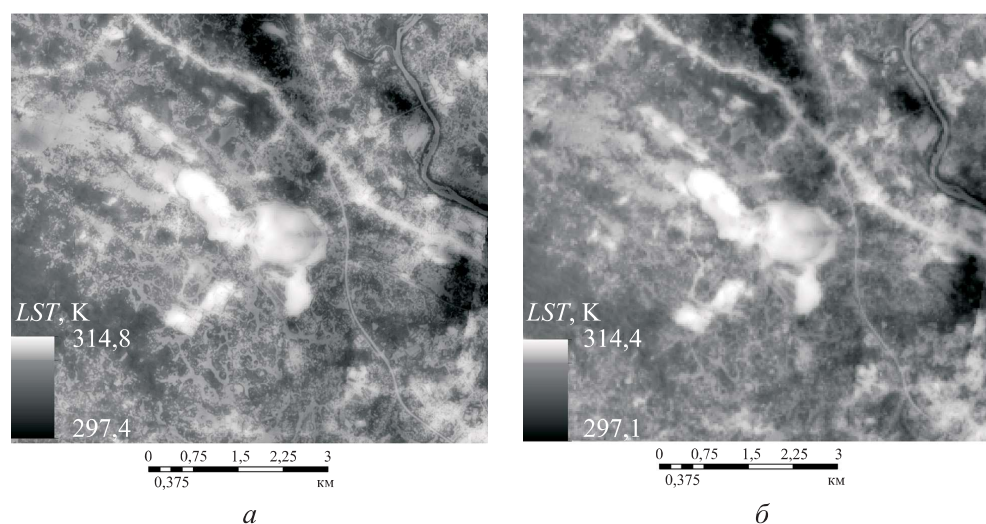


Рис. 2. Распределение температуры на тестовом участке № 1 при комбинировании изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* (а) и по данным со спутника *Landsat 8* (б)

Для сравнения также рассчитана температура поверхности с использованием только изображения со спутника *Landsat 8* (рис. 2, б). Для вычисления температуры поверхности по изображению со спутника *Landsat 8* использована аналогичная методика, но с тем различием, что для вычисления *NDVI* применен красный (канал 4) и ближний инфракрасный (канал 5) каналы изображения *Landsat 8*. Попиксельный анализ изображений показал следующие основные характеристики изображений по температуре поверхности: минимальная температура 297,1 и 297,4 К, максимальная температура 314,4 и 314,9 К, средняя температура 305,5 и 305,9 К, стандартное отклонение по температуре поверхности 2,03 и 2,17. Температура поверхности, определенная по изображению со спутника *Landsat 8* и при комбинировании изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A*, практически не отличается по минимальному и максимальному значениям, однако пространственное разрешение изображения увеличилось от 30 до 10 м.

Сравнение других статистических характеристик яркости пикселей, таких как медиана, мода, для двух вариантов расчета температуры поверхности также показывает близкие значения. Из данных следует, что рассмотренные статистические характеристики, за исключением стандартного отклонения, отличаются незначительно. Изменение стандартного отклонения составляет $(2,17 - 2,03)/2,17 = 0,065$, в то время как изменение других характеристик не превышает 0,0016. Следовательно, вариабельность стандартного отклонения увеличилась на 6,5 %, вариабельность дру-

гих параметров — не более чем на 0,16 %. Таким образом, в результате комбинирования изображений вариабельность поля температуры поверхности существенно увеличилась при сохранении средних, максимальных и минимальных значений температуры. Это косвенно подтверждает то, что пространственное разрешение комбинированного изображения по температуре возросло.

Проведено сравнение значений температуры поверхности на 10 площадках или пикселях, выбранных случайным образом на изображении, чтобы оценить достоверность определения температуры двумя описанными выше методами. Точки равномерно распределялись на изображении и выбирались в местах с густым растительным покровом и открытой почвой. Полученные результаты показали, что отсутствует значительная разность температуры поверхности при комбинировании изображений со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8* по сравнению с методом, использующим только изображения *Landsat 8* (табл. 1).

Таблица 1

Значения температуры поверхности на случайно выбранных площадках тестового участка № 1, определенные по космическим изображениям

<i>Landsat 8</i>	<i>Landsat 8 и Sentinel 2A</i>	Разность значений температуры, К
314,0	314,4	0,4
312,4	312,7	0,3
310,2	310,6	0,4
304,1	304,0	-0,1
308,5	308,8	0,3
299,9	299,9	0
305,9	306,3	0,4
303,5	303,2	-0,3
305,3	305,2	-0,1
305,0	304,8	-0,2

Полученные на тестовом участке № 1 результаты показывают, что комбинирование изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* позволяет улучшить пространственное разрешение изображений температуры поверхности территории угольной шахты.

Тестовый участок № 2. Центр провинции Тхань Хоа — г. Тхань Хоа. В настоящее время г. Тхань Хоа занимает площадь 146,77 км², население более 400 тыс. человек. Быстрое изменение структуры землепользования

привело к значительному увеличению площадей городской территории с высокими значениями температуры поверхности.

Изображения со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* территории города и его окрестностей были предварительно обработаны, выделены административные границы города. Как и в случае с тестовым участком № 1, спектральные коэффициенты отражения в красном канале (канал 4) и ближней инфракрасной области (канал 8) изображения со спутника *Sentinel 2A* использованы для расчета *NDVI* и определения коэффициента излучения поверхности по (1). Для тестового участка № 2 коэффициенты излучения открытой почвы и растительности также найдены по (3) с использованием отбора площадок и взятых *NDVI* на изображении.

Результаты определения температурного поля территории г. Тхань Хоа при объединении изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* приведены на рис. 3, а. Области с высокой термодинамической температурой по шкале Кельвина выделены яркими пикселями, низкотемпературные области — темными пикселями. Для сравнения температура поверхности на тестовом участке № 2 также рассчитана только по одному изображению *Landsat 8* (рис. 3, б).

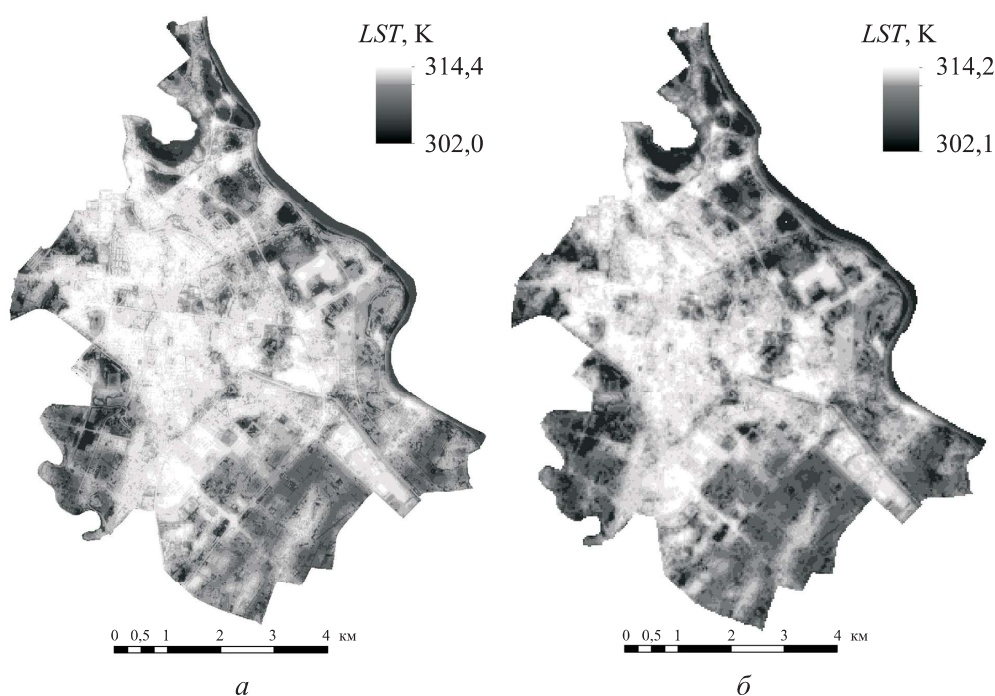


Рис. 3. Распределение температуры на тестовом участке № 2 при комбинировании изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* (а) и по данным только *Landsat 8* (б)

Минимальное и максимальное значения температуры поверхности г. Тхань Хоа, определенные по изображению со спутника *Landsat 8* и методом комбинирования изображений с *Landsat 8* и *Sentinel 2A*, также отличаются незначительно. Минимальная температура поверхности при использовании только изображений *Landsat 8* достигала 302,1 К, при использовании изображений *Landsat 8* и *Sentinel 2A* — 302,0 К. Для максимальной температуры аналогичные значения составляли 314,2 и 314,4 К. Другие статистические характеристики разности температуры поверхности, например среднее значение (309,0 и 308,8 К) медиана (309,1 и 308,6 К), мода (306,8 и 306,5 К), также подтверждают эту тенденцию. Полученные статистические характеристики, кроме стандартного отклонения (2,13 и 2,24), отличаются незначительно. Увеличение стандартного отклонения составляет $(2,24 - 2,13)/2,24 = 0,049$ или 4,9 %. Как и на тестовом участке № 1, увеличение стандартного отклонения существенно превышает увеличение других статистических характеристик температуры поверхности. Так, вариабельность медианы возросла только на 0,16 %. Таким образом, и для тестового участка № 2 в результате комбинирования изображений увеличение стандартного отклонения существенно превышает увеличение других статистических характеристик.

Дополнительно на тестовом участке № 2 были случайно выбраны 10 площадок (пикселей) для сравнения значения температуры поверхности, определенного по изображению *Landsat 8* и при комбинировании изображений *Landsat 8* и *Sentinel 2A* (табл. 2). Данные показывают, что разность значений температуры поверхности в контрольных точках невелика, максимальная разность составляет менее 0,5 К.

Таблица 2

Значения температуры поверхности на случайно выбранных площадках тестового участка № 2, определенные по космическим изображениям

<i>Landsat 8</i>	<i>Landsat 8</i> и <i>Sentinel 2A</i>	Разность значений температуры, К
310,8	311,0	0,2
304,5	304,8	0,3
307,9	308,2	0,3
307,6	307,7	0,1
309,6	309,7	0,1
311,3	311,2	-0,1
312,0	312,0	0
308,4	308,6	-0,2
310,9	310,9	0
312,0	311,9	-0,1

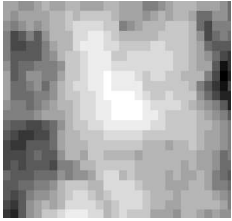


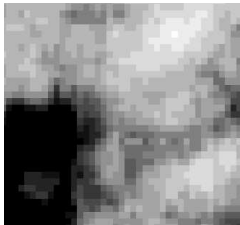
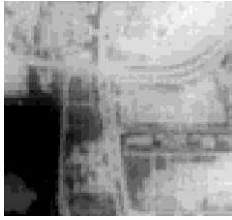

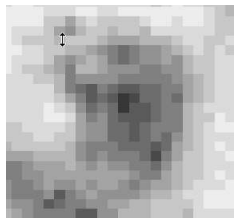
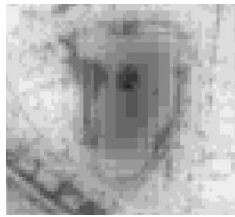

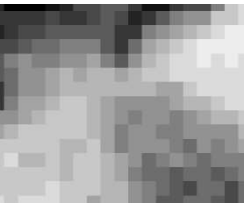
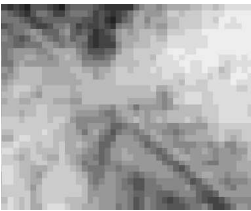
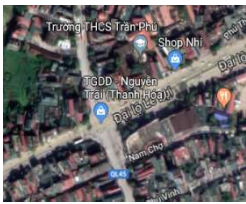

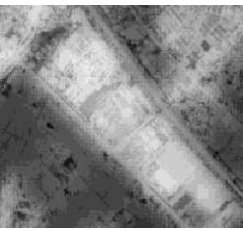

Полученные на тестовом участке № 2 результаты показывают, что комбинирование изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* позволяет улучшить пространственное разрешение изображений температуры поверхности городской территории.

Этот вывод подтверждается, если визуально сравнить изображения температуры поверхности и изображения тех же самых участков местности в видимом диапазоне (данные *GoogleMap*). Фрагменты изображений температуры городской поверхности, определенной по одиночному изображению *Landsat 8* и при комбинировании изображений *Landsat 8* и *Sentinel 2A*, представлены в табл. 3, также для сравнения приведены фрагменты изображений с высокой разрешающей способностью. Можно отметить, что комбинирование изображений со спутников *Landsat 8* и *Sentinel 2A* позволяет определять температуру поверхности с лучшим уровнем детализации, чем использование только изображений *Landsat 8*.

Таблица 3

**Пространственное разрешение температуры поверхности,
определенной по изображению со спутника *Landsat 8*
и при комбинировании изображений *Landsat 8* и *Sentinel 2A***

Варьирование температуры поверхности на изображении со спутников		Изображение местности в оптическом диапазоне (<i>GoogleMap</i>)
<i>Landsat 8</i>	<i>Landsat 8</i> и <i>Sentinel 2A</i>	
		
		
		

Варьирование температуры поверхности на изображении со спутников		Изображение местности в оптическом диапазоне (GoogleMap)
<i>Landsat 8</i>	<i>Sentinel 2A</i>	
		
		
		
		
		

Заключение. Спутники *Landsat 8* и *Sentinel 2A* характеризуются высокой частотой съемки поверхности Земли, что позволяет использовать их совместно для изучения быстропротекающих природных процессов,

включая динамику температуры подстилающей поверхности. Предложенная методика направлена на увеличение пространственного разрешения изображений в тепловом инфракрасном канале. Температура поверхности вычислена на основе комбинирования теплового инфракрасного канала изображения со спутника *Landsat 8* (канал 10), красного и ближнего инфракрасного каналов изображения *Sentinel 2A* (каналы 4 и 8). Полученные результаты показывают, что комбинирование изображений со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8* позволяет повысить пространственное разрешение температуры поверхности и тем самым увеличить точность классификации городских территорий, промышленных объектов, территорий угольных шахт.

Разности средних значений температуры поверхности и других статистических характеристик распределения температуры (максимальное, минимальное значения, медиана и мода), рассчитанные по изображению со спутника *Landsat 8* и по предложенной методике комбинирования изображений *Landsat 8* и *Sentinel 2A*, оказались незначительными. В эксперименте наблюдалось значительное увеличение стандартного отклонения, что косвенно свидетельствует об увеличении пространственного разрешения комбинированного изображения по температуре поверхности. Визуальное сравнение фрагментов изображений в тепловом инфракрасном канале также показало улучшение разрешающей способности изображений. Таким образом, комбинирование многозональных изображений со спутников *Sentinel 2A* и *Landsat 8* позволяет повысить разрешающую способность изображений по температуре и сделать их более ценными при изучении динамических процессов на небольших территориях. Поскольку разрешающая способность красного и ближнего инфракрасного каналов изображения *Sentinel 2A* составляет 10 м, а теплового инфракрасного канала изображения *Landsat 8* равна 30 м, максимальная разрешающая способность комбинированного изображения по температуре не превышает 10 м.

Изображения повышенного пространственного разрешения в тепловом инфракрасном диапазоне более удобны в цифровой обработке и могут эффективно использоваться при крупномасштабном картографировании температуры на небольших площадях, например угольных шахт, городских поселений, очагов возгорания лесных и болотных участков на ранних стадиях их возникновения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Кладов В.Л. и др. Аномальная изменчивость пространственно-временных распределений природных пожаров и эмиссий вредных примесей на территории Европы по данным космического мониторинга. *ДАН*, 2019, т. 485, № 6, с. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524856745-749>
- [2] Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга. *ДАН*, 2016, т. 466, № 4, с. 473–477. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565216040186>
- [3] Бондур В.Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России. *Исследования Земли из Космоса*, 2015, № 6, с. 21–35. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>
- [4] Wan Z., Li Z.-L. MODIS land surface temperature and emissivity. In: Ramachandran B., Justice C., Abrams M. (eds). *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Remote Sensing and Digital Image Processing*, 2010, vol. 11, New York, NY, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_25
- [5] Chaka D.S., Oda T.K. Understanding land surface temperature on rift areas to examine the spatial variation of urban heat island: the case of Hawassa, southern Ethiopia. *GeoJournal*, 2021, vol. 86, no. 2, pp. 993–1014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10110-5>
- [6] Hereher M.E. Estimation of monthly surface air temperatures from MODIS LST time series data: application to the deserts in the Sultanate of Oman. *Environ. Monit. Assess.*, 2019, vol. 191, no. 9, art. 592. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7771-y>
- [7] Huang F., Ma W., Wang B., et al. Air temperature estimation with MODIS data over the Northern Tibetan Plateau. *Adv. Atmos. Sci.*, 2017, vol. 34, no. 5, pp. 650–662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00376-016-6152-5>
- [8] Balling R.C., Brazel S.W. High resolution surface temperature patterns in a complex urban Terrain. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1988, vol. 54, no. 9, pp. 1289–1293.
- [9] Kumar S., Bhaskar P., Padmakumari K. Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using Landsat ETM + image. *IJEST*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 771–778.
- [10] Maltick J., Kant Y., Bharath D. Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+. *J. Ind. Geophys. Union*, 2008, vol. 12, no. 3, pp. 131–140.
- [11] Trinh L.H. Studies of land surface temperature using multispectral image Landsat. *Vietnam J. Earth Sci.*, 2014, vol. 36, no. 1, pp. 82–89.
- [12] Yuan F., Bauer M. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Rem. Sens. Env.*, 2007, vol. 106, iss. 3, pp. 375–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>

- [13] Anandababu D., Purushothaman B.M., Suresh B.S. Estimation of land surface temperature using Landsat 8 data. *IJARIT*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 177–186.
- [14] Boori M.S., Vozenilek V., Balzter H., et al. Land surface temperature with land cover classes in ASTER and Landsat data. *J. Geophys. Remote Sensing*, 2015, vol. 4, no. 1, art. 1000138. DOI: <https://doi.org/10.4172/2169-0049.1000138>
- [15] Guha S., Govil H., Dey A., et al. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *Eur. J. Remote. Sens.*, 2018, vol. 51, iss. 1, pp. 667–678. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- [16] Bui Q.T. Urban heat island analysis in Ha Noi: examining the relationship between land surface temperature and impervious surface. *Hội thảo Ứng dụng GIS toàn quốc*, 2015, pp. 674–677.
- [17] Nguyen N.D., Pham V.V. Application of remote sensing and GIS to study surface temperature changes of the urban districts in Hanoi during 2005–2015 periods. *VJAS*, 2016, vol. 14, no. 8, pp. 1219–1230 (in Vietnamese).
- [18] Van T.T., Lan H.T., Trung L.V. Thermal remote sensing method in study on urban surface temperature distribution. *Vietnam J. Earth Sci.*, 2009, vol. 31, no. 2, pp. 168–177 (in Vietnamese).
- [19] Prakash A., Gupta R.P. Surface fires in Jharia coalfield, India — their distribution and estimation of area and temperature from TM data. *Int. J. Rem. Sens.*, 1999, vol. 20, iss. 10, pp. 1935–1946. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311699212281>
- [20] Mishra R., Roy P., Pandey J., et al. Study of coal fire dynamics of Jharia coalfield using satellite data. *IJGAGS*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 477–484.
- [21] Чинь Ле Хунг, Заблоцкий В.Р. Применение разновременных ИК-изображений тепловой съемки Landsat для выявления подземных пожаров на угольной шахте Хань Хоа, провинция Тхай Нгуен, Вьетнам. *Исследование Земли из Космоса*, 2016, № 5, с. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0205961416050067>
- [22] Sandholt I., Rasmussen K., Anderson J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of the surface moisture status. *Rem. Sens. Env.*, 2002, vol. 79, iss. 2-3, pp. 213–224. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
- [23] Bao Y., Gama G., Gang B., et al. Monitoring of drought disaster in Xilin Guole grassland using TVDI model. CRC Press, 2013.
- [24] Leblon B. Monitoring forest fire danger with remote sensing. *Nat. Hazards*, 2005, vol. 35, no. 3, pp. 343–359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-004-1796-3>
- [25] Xiao-rui T., Mcrae D.J., Li-fu S., et al. Satellite remote sensing technologies used in forest fire management. *J. For. Res.*, 2005, vol. 16, no. 1, pp. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02856861>
- [26] Landsat 8 data users handbook. URL: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook> (дата обращения: 16.09.2021).

- [27] Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas. *Rem. Sens. Env.*, 1996, vol. 57, iss. 3, pp. 167–184. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)
- [28] Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Rem. Sens. Env.*, 1997, vol. 62, iss. 3, pp. 241–252. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- [29] Dang N.D., Dao N.L., Trinh L.H. Study on the change of land surface temperature in Thanh Hoa city in the period of 2000–2017 using Landsat thermal infrared data. *J. Geodesy and Cartography*, 2017, vol. 6, pp. 26–32 (in Vietnamese).
- [30] Van de Griend A.A., Owen M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface. *Int. J. Rem. Sens.*, 1993, vol. 14, iss. 6, pp. 1119–1131. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>

Чинь Ле Хунг — канд. техн. наук, доцент кафедры «Геодезия и картография» Государственного технического университета им. Ле Куй Дон (Вьетнам, Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, 236).

Заблоцкий Владимир Ростиславович — канд. биол. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чинь Ле Хунг, Заблоцкий В.Р. Комбинированное использование изображений *Landsat 8* и *Sentinel 2A* для улучшения пространственного разрешения температуры поверхности Земли. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 6 (99), с. 45–63. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-45-63>

COMBINED USE OF *Landsat 8* AND *Sentinel 2A* IMAGES FOR ENHANCED SPATIAL RESOLUTION OF LAND SURFACE TEMPERATURE

Le Hung Trinh¹
V.R. Zablotskii²

trinhlehung@lqdtu.edu.vn
zablotskii@bmstu.ru

¹ **Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam**

² **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

Abstract

Underlying surface temperature is an important parameter of underlying surface thermal radiation and can be used in monitoring forest fires, coal fires, urban thermal radiation and developing climate models. Ground-based

Keywords

Remote sensing, underlying surface temperature, spatial resolution, Sentinel 2A, Landsat 8

observations provide temperature information for small areas around weather stations and in fact cannot provide a high density of surface temperature data. Remote sensing technologies are promising in this respect. However, due to the low spatial resolution in the infrared channel, the surface temperature calculated from *Landsat* and *Aster* images does not always have the required detail needed when studying small areas. The results of images from *Sentinel 2A* and *Landsat 8* satellites combination (joint digital processing) made in order to increase spatial resolution of underlying surface temperature are presented. Comparison of surface temperature extreme values shows that in spite of small difference in extreme values of temperature, the spatial field of temperature in case of combined images was more detailed and variable. This is evidenced by a significant increase in the variability of the temperature standard deviation. Direct visual observations of image fragments also confirm that combining *Sentinel 2A* and *Landsat 8* images increases the spatial resolution of the surface temperature when compared to the *Landsat 8* image

Received 02.04.2021

Accepted 12.05.2021

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Bondur V.G., Tsidilina M.N., Kladov V.L., et al. Irregular variability of spatiotemporal distributions of wildfires and emissions of harmful trace gases in Europe based on satellite monitoring data. *Dokl. Earth Sc.*, 2019, vol. 485, no. 2, pp. 461–464. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X19040202>
- [2] Bondur V.G., Ginzburg A.S. Emission of carbon-bearing gases and aerosols from natural fires on the territory of Russia based on space monitoring. *Dokl. Earth Sc.*, 2016, vol. 466, no. 2, pp. 148–152. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X16020045>
- [3] Bondur V.G. Satellite monitoring of small gaseous component and aerosol emission at wildfires in Russia. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 6, pp. 21–35 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>
- [4] Wan Z., Li Z.-L. MODIS land surface temperature and emissivity. In: Ramachandran B., Justice C., Abrams M. (eds). *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Remote Sensing and Digital Image Processing*, 2010, vol. 11, New York, NY, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_25
- [5] Chaka D.S., Oda T.K. Understanding land surface temperature on rift areas to examine the spatial variation of urban heat island: the case of Hawassa, southern Ethiopia. *GeoJournal*, 2021, vol. 86, no. 2, pp. 993–1014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10110-5>

- [6] Hereher M.E. Estimation of monthly surface air temperatures from MODIS LST time series data: application to the deserts in the Sultanate of Oman. *Environ. Monit. Assess.*, 2019, vol. 191, no. 9, art. 592. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7771-y>
- [7] Huang F., Ma W., Wang B., et al. Air temperature estimation with MODIS data over the Northern Tibetan Plateau. *Adv. Atmos. Sci.*, 2017, vol. 34, no. 5, pp. 650–662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00376-016-6152-5>
- [8] Balling R.C., Brazel S.W. High resolution surface temperature patterns in a complex urban Terrain. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 1988, vol. 54, no. 9, pp. 1289–1293.
- [9] Kumar S., Bhaskar P., Padmakumari K. Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using Landsat ETM + image. *IJEST*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 771–778.
- [10] Maltick J., Kant Y., Bharath D. Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+. *J. Ind. Geophys. Union*, 2008, vol. 12, no. 3, pp. 131–140.
- [11] Trinh L.H. Studies of land surface temperature using multispectral image Landsat. *Vietnam J. Earth Sci.*, 2014, vol. 36, no. 1, pp. 82–89.
- [12] Yuan F., Bauer M. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Rem. Sens. Env.*, 2007, vol. 106, iss. 3, pp. 375–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- [13] Anandababu D., Purushothaman B.M., Suresh B.S. Estimation of land surface temperature using Landsat 8 data. *IJARIT*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 177–186.
- [14] Boori M.S., Vozenilek V., Balzter H., et al. Land surface temperature with land cover classes in ASTER and Landsat data. *J. Geophys. Remote Sensing*, 2015, vol. 4, no. 1, art. 1000138. DOI: <https://doi.org/10.4172/2169-0049.1000138>
- [15] Guha S., Govil H., Dey A., et al. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *Eur. J. Remote. Sens.*, 2018, vol. 51, no. 1, pp. 667–678. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- [16] Bui Q.T. Urban heat island analysis in Ha Noi: examining the relationship between land surface temperature and impervious surface. *Hội thảo Ứng dụng GIS toàn quốc*, 2015, pp. 674–677.
- [17] Nguyen N.D., Pham V.V. Application of remote sensing and GIS to study surface temperature changes of the urban districts in Hanoi during 2005–2015 periods. *VJAS*, 2016, vol. 14, no. 8, pp. 1219–1230 (in Vietnamese).
- [18] Van T.T., Lan H.T., Trung L.V. Thermal remote sensing method in study on urban surface temperature distribution. *Vietnam J. Earth Sci.*, 2009, vol. 31, no. 2, pp. 168–177 (in Vietnamese).
- [19] Prakash A., Gupta R.P. Surface fires in Jharia Coalfield, India — their distribution and estimation of area and temperature from TM data. *Int. J. Rem. Sens.*, 1999, vol. 20, iss. 10, pp. 1935–1946. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311699212281>
- [20] Mishra R., Roy P., Pandey J., et al. Study of coal fire dynamics of Jharia coalfield using satellite data. *IJGAGS*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 477–484.

- [21] Trinh L.H., Zablotskii V.R. The application of Landsat multi-temporal thermal infrared data to identify coal fire in the Khanh Hoa coal mine, Thai Nguyen province, Vietnam. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2017, vol. 53, no. 9, pp. 1081–1087. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433817090183>
- [22] Sandholt I., Rasmussen K., Anderson J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of the surface moisture status. *Rem. Sens. Env.*, 2002, vol. 79, iss. 2-3, pp. 213–224. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
- [23] Bao Y., Gama G., Gang B., et al. Monitoring of drought disaster in Xilin Guole grassland using TVDI model. CRC Press, 2013.
- [24] Leblon B. Monitoring forest fire danger with remote sensing. *Nat. Hazards*, 2005, vol. 35, no. 3, pp. 343–359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-004-1796-3>
- [25] Xiao-rui T., Mcrae D.J., Li-fu S., et al. Satellite remote sensing technologies used in forest fire management. *J. For. Res.*, 2005, vol. 16, no. 1, pp. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02856861>
- [26] Landsat 8 data users handbook. Available at: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook> (accessed: 16.09.2021).
- [27] Valor E., Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European African and South American areas. *Rem. Sens. Env.*, 1996, vol. 57, iss. 3, pp. 167–184. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00039-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00039-9)
- [28] Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Rem. Sens. Env.*, 1997, vol. 62, iss. 3, pp. 241–252. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- [29] Dang N.D., Dao N.L., Trinh L.H. Study on the change of land surface temperature in Thanh Hoa city in the period of 2000–2017 using Landsat thermal infrared data. *J. Geodesy and Cartography*, 2017, vol. 6, pp. 26–32 (in Vietnamese).
- [30] Van de Griend A.A., Owen M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface. *Int. J. Rem. Sens.*, 1993, vol. 14, iss. 6, pp. 1119–1131. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>

Trinh Le Hung — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Geodesy and Cartography, Le Quy Don State Technical University (Hoang Quok Viet st. 236, Hanoi, Vietnam).

Zablotskii V.R. — Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Trinh Le Hung, Zablotskii V.R. Combined use of *Landsat 8* and *Sentinel 2A* images for enhanced spatial resolution of land surface temperature. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 6 (99), pp. 45–63 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-45-63>