

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОТКРЫТАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДА РАСЩЕПЛЕННОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ LANDSAT 8

© 2021 г. Э. Э. Казаков^{a, *}, Ю. И. Борисова^{a, b}

^aГосударственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: ee.kazakov@gmail.com

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

Представлена открытая программная реализация алгоритма восстановления температуры поверхности Земли по данным спутника дистанционного зондирования Landsat 8, использующая метод расщепленного окна прозрачности, дополненный ковариационно-вариационным подходом к моделированию содержания водяного пара в атмосфере. В реализации также используются метод атмосферной коррекции SREM и алгоритм детектирования облаков и затенений FMASK. Все составляющие комплексного алгоритма полностью автоматизированы и не требуют дополнительной информации, в том числе внешних данных о состоянии атмосферы. Проведена валидация реализации алгоритма при различных настройках на основе 10 наземных станций на территории США, публикующих данные о наблюдениях за температурой поверхности с высоким временным разрешением, средняя абсолютная ошибка по ее результатам составила 1.1°C. Программный компонент разработан на языке Python и доступен в публичном репозитории https://github.com/eduard-kazakov/Landsat8_LST_PSWA, исходный код распространяется по открытой лицензии.

Ключевые слова: температура поверхности, дистанционное зондирование, Landsat 8, TIRS, SREM, FMASK, метод расщепленного окна прозрачности

DOI: 10.31857/S0205961421010073

ВВЕДЕНИЕ

Среди всего многообразия геофизических параметров, мониторинг которых осуществляется средствами дистанционного зондирования из космоса, температура поверхности Земли остается одним из наиболее важных и широко используемых в самых различных отраслях науки и народного хозяйства: от исследований энергетического баланса планеты (Кондратьев, Крапивин, 2006) до мониторинга сельскохозяйственных угодий (Son et al., 2012) и поиска полезных ископаемых (Тронин и др., 2011). В последние годы интерес к данным космического теплового мониторинга возрастает также в связи с изменениями климата и изучением динамики, генезиса и роли городских островов тепла (Горный и др., 2016).

Для изучения масштабных процессов широко используются данные публичных космических программ американского и европейского космических агентств, в частности материалы тепловых съемок с космических аппаратов (КА) Terra, Aqua, NOAA, Metop, Sentinel-3, Suomi-NPP, которые обеспечивают высокое качество материа-

лов при высокой периодичности съемки (в совокупности – субсуточной), однако имеют существенные ограничения применимости по причине низкого пространственного разрешения (от 750 м). Для исследования локальных особенностей распределения и динамики температуры поверхности (например, в городских (Keeratikasikorn, Bonafoni, 2018; Балдина, Грищенко, 2011) или сельскохозяйственных (Anderson et al., 2012) задачах) требуются более детализированные данные, среди публично доступных и активных на сегодняшний представленный всего тремя сенсорами: ASTER (КА Terra), ETM+ (КА Landsat 7) и TIRS (КА Landsat 8). Несмотря на низкую периодичность съемки, относительно высокое (от 30 м) пространственное разрешение обуславливает огромную востребованность таких данных. Их дефицит, среди прочего, приводит к разработке подходов искусственного улучшения пространственного разрешения температурных данных (Крицук и др., 2016).

При этом данные, получаемые с датчиков с относительно высоким пространственным разре-

шением, распространяются в виде исходных, непосредственно зарегистрированных спутником радиояркостных температур (brightness temperature), что затрудняет их использование, особенно непрофессионалами, а также часто вводит в заблуждение (например, из-за того, что радиояркостные температуры могут выражаться в той же размерности, что и физические температуры, например в Кельвинах). Связь между зарегистрированными радиояркостными температурами и физическими температурами (surface temperature) объектов сложна и нелинейна, она зависит от свойств материалов и состояния атмосферы в момент съемки (Li et al. 2013), а разница между ними может достигать 7 и более градусов (Oliosio et al., 2013).

Существует большое количество алгоритмов и методов пересчета радиояркостных температур в физические температуры для разных сенсоров, однако большая их часть требует наличия вспомогательной информации – о фактическом состоянии атмосферы и свойствах подстилающей поверхности, а также либо не имеют открытых программных реализаций, либо привязаны к конкретным ГИС платформам, зачастую проприетарным (Walawender et al., 2012). Это заметно усложняет получение массовым пользователем корректных материалов и приводит к широкому использованию радиояркостных температур со всеми сопутствующими проблемами и ошибками интерпретации данных.

Тем не менее, появляются подходы, упрощающие расчеты физической температуры, избавляя от необходимости привлечения дополнительных данных при сохранении приемлемого качества вычислений. Мы предлагаем развитие одного из таких подходов, описанного в работах (Du et al., 2015; Ren et al. 2015), для материалов сенсора TIRS, а также его публичную открытую программную реализацию на языке Python, которую можно использовать как для единичных расчетов, так и для встраивания в автоматизированные системы мониторинга окружающей среды.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ LANDSAT 8

Данные сенсора TIRS (KA Landsat 8) наиболее популярны и востребованы в нише публичной информации о температуре подстилающей поверхности с относительно высоким пространственным разрешением. Это самые современные и качественные данные такого рода, доступ к которым может осуществляться как вручную с помощью простых в использовании графических веб-интерфейсов, так и автоматически с помощью программных интерфейсов. Сенсор TIRS осуществляет регистрацию собственного теплового излучения поверхности Земли в двух каналах с номерами 10 и 11, которым соответствуют диа-

пазоны длин волн от 10.30 до 11.30 мкм и от 11.50 до 12.50 мкм. На основе данных TIRS проводятся многочисленные исследования природных и антропогенных систем как за рубежом, так и в России, а проблема восстановления физических температур на основе радиояркостных обсуждается с момента появления первых снимков в 2013 г.

В основе всех существующих алгоритмов лежит закон Планка, связывающий радиометрическую температуру с физической для абсолютно черного тела и идеальных условий, а дальнейшие изыскания, обобщенно, преследуют две цели – определение излучательной способности поверхности (surface emissivity), которая выражает различие в радиометрическом поведении зондируемых объектов относительно абсолютного черного тела, и учет влияния атмосферы и некоторых других факторов. Наибольшее распространение получили, в различных модификациях, методы: одноканальный (single-channel) (Cristóbal et al., 2018), расщепленного окна прозрачности (split-window, иногда в русскоязычной литературе также используется термин “метод разделенных окон”) (Rozenstein et al., 2014), основанные на уравнениях переноса излучения (radiative transfer equation-based) (Yu et al., 2014). Предлагаются и другие подходы (Алескерова и др., 2016; Станкевич и др., 2015). Определение излучательной способности, которая является входным параметром в любом вышеуказанном методе (но может быть получена независимо), также решается разными способами, в числе которых наиболее распространены основанные на вегетационных индексах и на картах классификации типов ландшафтов (Sobrino et al., 2008). Информацию о сравнении различных подходов можно найти в работах (Wang et al., 2019; García-Santos et al., 2018; Yu et al., 2014), в том числе по проблеме излучательной способности (Sekertekin, Bonafoni, 2020; Perez Hoyos, 2014).

Метод расщепленного окна прозрачности выделяется на фоне остальных алгоритмов за счет того, что использует для вычислений только один дополнительный параметр – содержание водяного пара в атмосфере в момент съемки (другие подходы зачастую требуют обширной метеорологической информации, величин восходящих и нисходящих потоков радиации и других, более труднодоступных характеристик). Он используется при обработке тепловых данных, получаемых с самых разных сенсоров дистанционного зондирования (Успенский и др., 2015). В разных работах предлагается получение информации о водяном паре из материалов других спутниковых съемок (Cristóbal et al., 2018) или на основе наземных измерений. Примечательнее, в контексте необходимости автоматизации и независимости от внешних данных, методы восстановления концентрации водяного пара на основе самих спутниковых изображений, например с использова-

нием ковариационно-вариационного подхода на основе измерений собственного теплового излучения поверхности в двух диапазонах длин волн (Ren et al., 2015).

АВТОНОМНЫЙ МЕТОД РАСЩЕПЛЕННОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ

Метод расщепленного окна прозрачности, лежащий в основе реализованного нами алгоритма, в конечном счете сводится к линейному уравнению следующего вида (Du et al. 2015):

$$LST = b_0 + \left(b_1 + b_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + b_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{10} + T_{11}}{2} + \left(b_4 + b_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + b_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{10} - T_{11}}{2} + b_7 (T_{10} - T_{11})^2,$$

где LST – искомая температура поверхности; $b_0 \dots b_7$ – коэффициенты, зависящие от концентрации водяного пара в атмосфере; ε – средняя излучательная способность поверхности для длин волн, соответствующих 10 и 11 каналам TIRS, $\Delta \varepsilon$ – разница между излучательными способностями поверхности для длин волн, соответствующих 10 и 11 каналам TIRS; T_{10}, T_{11} – радиояркие температуры в 10 и 11 каналах TIRS. Коэффициенты $b_0 \dots b_7$ рассчитаны на основе моделирования для разных диапазонов концентраций водяного пара и приведены в работе (Du et al., 2015). Значения излучательной способности ε_{10} и ε_{11} рассчитываются на основе вегетационного индекса NDVI по следующим выражениям (Yu et al., 2014):

$$\varepsilon_{10} = \begin{cases} 0.973 - 0.047\rho_R, & \text{NDVI} < 0.2 \\ 0.9863P_v + 0.9668(1 - P_v) + 0.018(1 - P_v), & 0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.5 \\ 0.9863 + 0.018(1 - P_v), & \text{NDVI} > 0.5 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{11} = \begin{cases} 0.984 - 0.0026\rho_R, & \text{NDVI} < 0.2 \\ 0.9896P_v + 0.9747(1 - P_v) + 0.0138(1 - P_v), & 0.2 \leq \text{NDVI} \leq 0.5 \\ 0.9896 + 0.0138(1 - P_v), & \text{NDVI} > 0.5, \end{cases}$$

где P_v – растительная фракция (vegetation fraction), рассчитываемая по формуле (Carlson, Ripley, 1997; Sobrino et al. 2004):

$$P_v = \left(\frac{\text{NDVI} - 0.2}{0.3} \right)^2,$$

где NDVI – нормализованный вегетационный индекс растительности (Muneni et al., 1995), основанный на отражательной способности поверхности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн. Получение отражательных способностей поверхности мы предлагаем производить по исходным данным Landsat 8 на основе алгоритма атмосферной коррекции SREM (Bilal et al., 2019), который имеет открытую программную реализацию и высокое качество для расчета вегетационных индексов (Казаков, Борисова, 2020), при том, что не требует никаких дополнительных данных о фактическом состоянии атмосферы. Именно этот подход реализован в нашем программном модуле. Также могут использоваться результаты работы любого другого алгоритма атмосферной коррекции или некорректированных отражательных способностей, использование которых, однако, приводит к снижению качества и не рекомендуется.

Содержание водяного пара, необходимое для получения значений коэффициентов $b_0 \dots b_7$, рассчитывается с использованием ковариационно-

вариационного подхода по следующей формуле (Du et al., 2015):

$$c_{wv} = c_0 + c_1 \left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}} \right) + c_2 \left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}} \right)^2,$$

где c_{wv} – содержание водяного пара в атмосферном столбе ($\text{г}/\text{см}^2$); c_0, c_1, c_2 – коэффициенты, рассчитанные в результате моделирования и равные – 9.674, 0.653 и 9.087 соответственно, τ_{10} и τ_{11} – прозрачность атмосферы на длинах волн 10 и 11 каналов Landsat 8 соответственно. Их соотношение, то есть величина $\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}}$, может быть приближенно вычислена с использованием ковариационно-вариационного подхода на основе радиометрических температур 10 и 11 каналов Landsat. Для этого выбирается скользящее окно размером $M \times M$ пикселей, с которым осуществляется полный обход снимка, и в каждом состоянии окна производится вычисление по следующей формуле:

$$\frac{\tau_{11}}{\tau_{10}} \approx \frac{\sum_{k=1}^N (T_{10,k} - \overline{T_{10}})(T_{11,k} - \overline{T_{11}})}{\sum_{k=1}^N (T_{10,k} - \overline{T_{10}})^2},$$

где N – количество пикселей в окне, то есть $M \times M$ пикселей, $T_{10,k}, T_{11,k}$ – значение текущего

перебираемого пикселя в пределах окна для радиометрической температуры в 10 и 11 каналах Landsat 8 соответственно, $\overline{T_{10}}$, $\overline{T_{11}}$ – среднее значение радиометрической температуры в пределах окна для 10 и 11 каналов Landsat 8 соответственно. Такой подход обеспечивает определение содержания водяного пара со средней квадратической ошибкой около 0.5 г/см² (Ren et al., 2015).

Технически расчет содержания водяного пара предполагает параметризацию в виде определения размера скользящего окна, в рамках которого на основе двух тепловых каналов Landsat 8 производится вычисление. Влияние этого параметра на качество определения и на потребление ресурсов приводится в разделе валидации.

Также при итеративном расчете в каждом окне должны быть проигнорированы облачные пиксели, для этого предварительно осуществляется маскирование облаков и затененных областей с использованием алгоритма FMASK (Zhu et al., 2015). Общая схема работы комплексного алгоритма такова: выбирается исходная сцена Landsat 8 уровня обработки L1C и размер скользящего окна в пикселях, производится маскирование облаков и затенений алгоритмом FMASK и атмосферная коррекция алгоритмом SREM для красного и ближнего инфракрасного каналов, по которым последовательно рассчитываются NDVI, растительная фракция и излучательные способности для каналов TIRS. Затем, на основе радиоярких температур каналов TIRS, по ковариационно-вариационному методу с заданным размером скользящего окна производится расчет концентраций водяного пара, определяющих значения коэффициентов $b_0...b_7$. Наконец, радиояркие температуры каналов TIRS, соответствующие им излучательные способности и полученные из концентраций водяного пара коэффициенты используются в формуле метода расщепленного окна прозрачности для расчета физической температуры поверхности.

На рис. 1 приведен пример расчета температуры поверхности и его сравнение с радиояркой температурой в 10 канале, а также их совместное сравнение с измерением температуры на наземной станции. Хорошо видно, что в среднем разница между температурами составляет около 4 градусов, однако распределение этой разницы нелинейно, а в отдельных местоположениях изменяется ее знак.

Все шаги алгоритма полностью автономны и не требуют дополнительной информации, помимо исходных данных Landsat и метаданных снимка, распространяемых в стандартном продукте уровня L1C, доступного для загрузки без ограничений.

ВАЛИДАЦИЯ

Для валидации алгоритма были использованы данные опорной климатической сети США (U.S. Climate Reference Network, USCRN), включающей более 140 станций, ведущих разнообразные наблюдения (<https://www.ncdc.noaa.gov/crn/overview.html>). На многих станциях ведутся, в том числе, наблюдения за температурой поверхности Земли с временной дискретностью 5 мин, что позволяет эффективно использовать их для калибровки и валидации соответствующих алгоритмов. Данные о наблюдениях (в том числе полной истории и оперативных данных с задержкой ~3.5 ч) доступны в веб-хранилище: <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/uscrn/products/subhourly01/>.

Мы использовали данные с 10 станций, расположенных на различных широтах от Флориды до Аляски, и 10 сцен Landsat 8 уровня обработки L1C, полученных на портале earthexplorer.usgs.gov. Расположение использованных станций приведено на рис. 2. использованные сцены описаны в табл. 1.

Для каждой сцены Landsat 8 была произведена серия расчетов с различным значением размера стороны скользящего окна: для 7, 9, 11, 15, 21, 27, 35, 45, 61, 81, 101 и 145 пикселей. Для каждого расчета определялась ошибка вычисления температуры по наземной станции, а также измерялось время выполнения на настольном компьютере с характеристиками: ЦП Intel Core i5-8500 3000 МГц, 16 Гб ОЗУ 2400 МГц (среда вычислений Python 3.8.2). Распределение абсолютных ошибок определения температуры поверхности и времени расчетов для всех станций при разных размерах скользящего окна приведено на рис. 3.

Размер скользящего окна не оказывает существенного влияния на производительность алгоритма, в среднем обработка одного снимка на современном настольном компьютере занимает порядка 10 мин, что достаточно даже для оперативных задач. Изначально были ожидания снижения времени расчетов при увеличении размера окна (так как уменьшалось количество итераций цикла обхода снимка). Но из-за роста вычислительной сложности ковариационно-вариационного алгоритма при увеличении числа элементов в матрице этот эффект полностью нивелировался. Распределение абсолютных ошибок также оказалось сравнимым, однако при размере окна в 7 пикселей среднее ее значение оказалось наименьшим и составило 1.1°C при разбросе от 0.2 до 2.1°C. На рис. 4 приведено распределение восстановленных значений температуры поверхности относительно валидационных для расчетов с размерами скользящего окна 7 и, для сравнения, 15.

С учетом незначительного роста времени расчетов (около 10%) можно рекомендовать исполь-

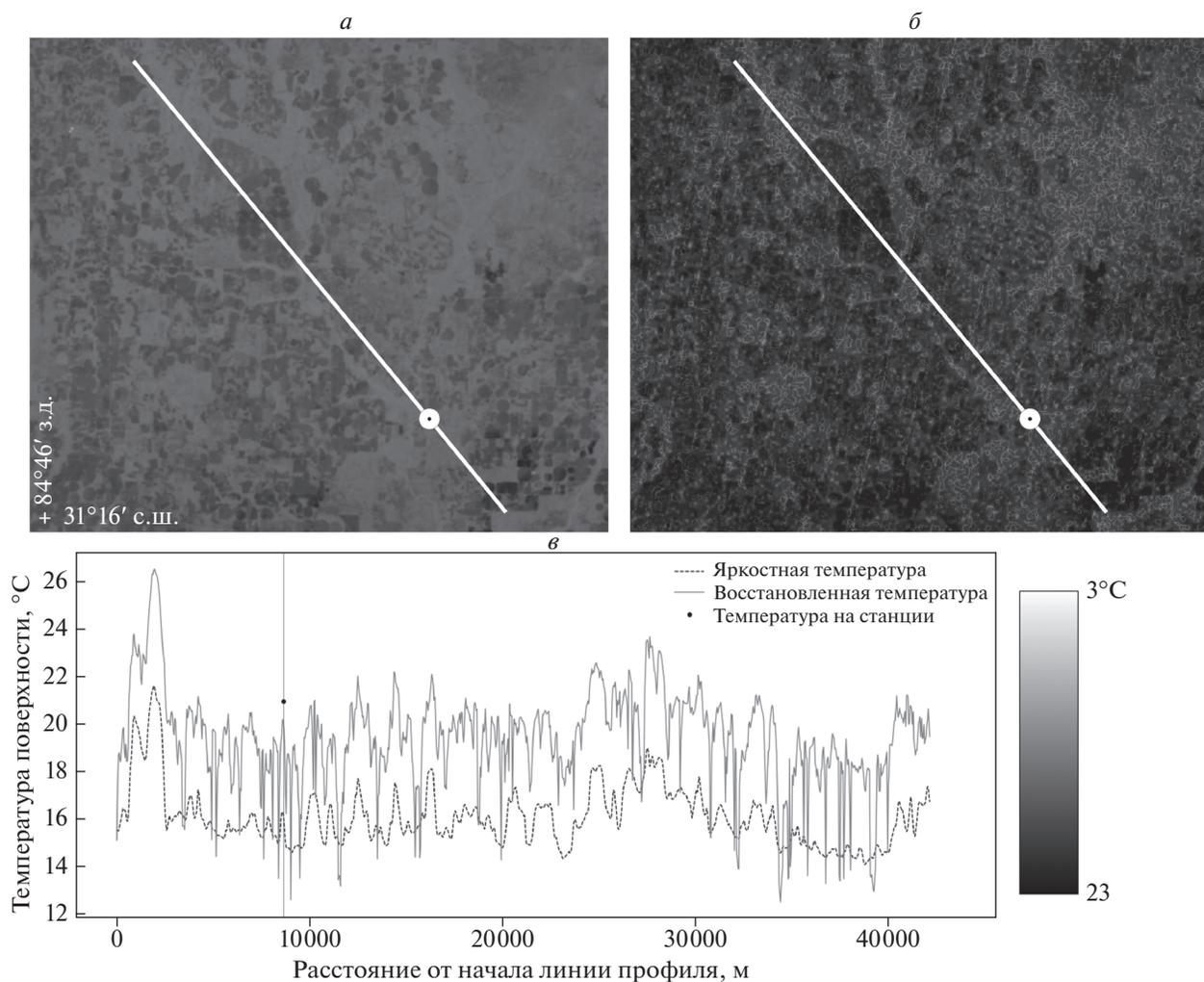


Рис. 1. *a* – радиояростная температура в 10 канале (диапазон длин волн от 10.30 до 11.30 мкм.) для фрагмента снимка Landsat 8 на территорию юго-востока США от 28 ноября 2019 г.; *б* – рассчитанная температура поверхности для того же фрагмента снимка; *в* – значения температуры вдоль профиля, обозначенного белой линией на изображениях *a* и *б*, для радиояростной и рассчитанной температур, а также значение температуры на наземной станции в момент съемки. Станция обозначена черной точкой в белом круге на изображениях *a* и *б*. Территория преимущественно представлена лесными и сельскохозяйственными землями.

зование размера скользящего окна равного 7 по умолчанию. Само значение средней абсолютной ошибки показывает, что алгоритм можно применять для большинства практических задач.

При оценке и интерпретации данных о сравнении восстановленных по спутниковым измерениям и зарегистрированных наземными методами температур необходимо помнить о пространственной неоднородности территории в пределах каждого пикселя спутникового изображения. Для данных Landsat 8, имеющих относительно высокое пространственное разрешение, этот эффект не настолько критичен, как, к примеру, для тепловых данных Sentinel-3 или Terra/Aqua с пространственным разрешением около 1 км на пиксель, однако определенное влияние он оказывает,

особенно при валидации на наземных станциях, находящихся в окружении сложного ландшафта. Также известен эффект перегрева, в теплое время года обуславливающий занижение спутниковых оценок температуры (Волкова, Успенский, 2016), что также может приводить к возрастанию регистрируемых ошибок.

ОТКРЫТАЯ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Мы предлагаем собственную программную реализацию автоматизированного метода расщепленного окна прозрачности на языке Python, распространяемом в среде ученых и специалистов, связанных с науками о Земле и об окружающей среде. Исходный код распространяется по открытой лицензии GNU GPL v.3 и доступен по адресу

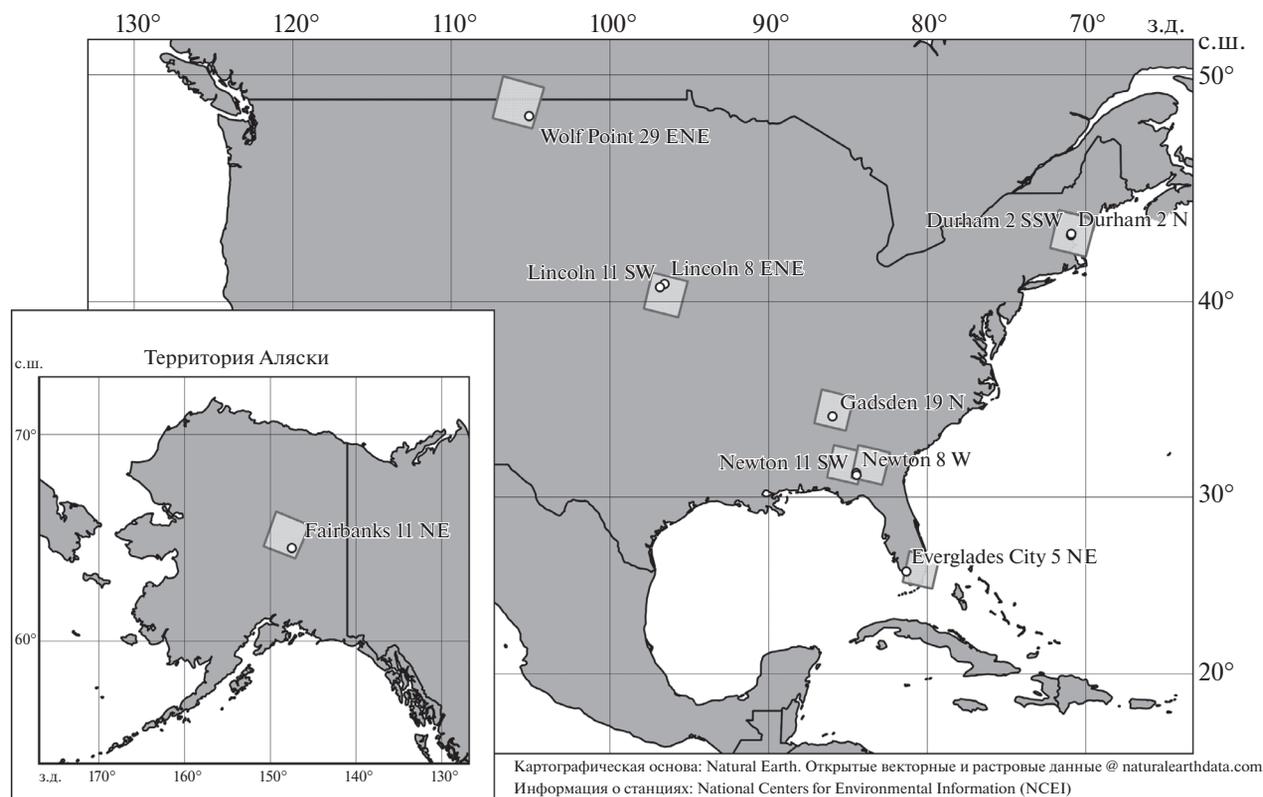


Рис. 2. Размещение станций и охваты сцен, использованных при валидации.

https://github.com/eduard-kazakov/Landsat8_LST_P-SWA. Алгоритм реализован в виде программного компонента, который можно использовать сам по себе или интегрировать в любое другое прило-

жение. Документация, содержащая руководство по установке и использованию, а также перечень зависимостей, доступна в репозитории по указанной ссылке.

Таблица 1. Использованные для валидации сцены Landsat 8 и валидирующие станции USCRN

Идентификатор сцены	Дата и время (UTC)	Наземная валидирующая станция
LC08_L1TP_036026_20190916_20190925_01_T1	2019-09-16 17:53	Wolf Point 29 ENE
LC08_L1TP_012030_20190924_20191017_01_T1	2019-09-24 15:27	Durham 2 SSW Durham 2 N
LC08_L1TP_015042_20200307_20200314_01_T1	2020-03-07 15:49	Everglades City 5 NE
LC08_L1TP_020036_20200411_20200411_01_RT	2020-04-11 16:18	Gadsden 19 N
LC08_L1TP_018038_20200413_20200413_01_RT	2020-04-13 16:06	GA Newton 8 W GA Newton 11 SW
LC08_L1TP_019038_20200404_20200410_01_T1	2020-04-04 16:12	GA Newton 8 W GA Newton 11 SW
LC08_L1TP_028032_20200215_20200225_01_T1	2020-02-15 17:06	Lincoln 8 ENE
LC08_L1TP_019038_20191128_20191216_01_T1	2019-11-28 16:13	GA Newton 8 W GA Newton 11 SW
LC08_L1TP_069014_20190603_20190618_01_T1	2019-06-03 21:12	Fairbanks 11 NE
LC08_L1TP_070014_20190626_20190705_01_T1	2019-06-26 21:19	Fairbanks 11 NE

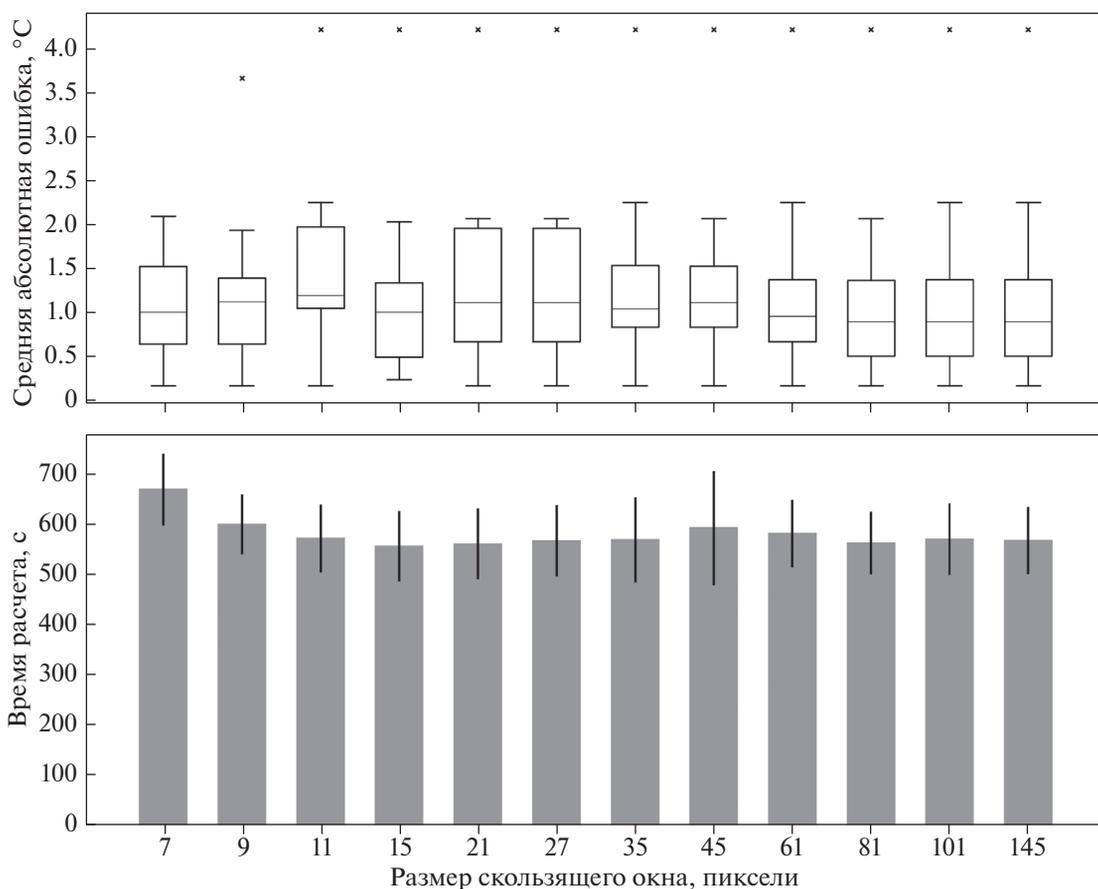


Рис. 3. Сверху – распределение ошибок определения температуры по всем валидирующим станциям в зависимости от размера скользящего окна (каждый “ящик” описывает характер распределения средних абсолютных ошибок при заданном размере скользящего окна: линия в середине “ящика” – медианное значение выборки, границы “ящика” – первый и третий квартили выборки, концы исходящих из “ящиков” линий – края статистически значимой выборки (без выбросов), крестами показаны статистически экстремальные значения выборки (выбросы)). Снизу – среднее время обработки одной сцены и его разброс (черными линиями) для разных настроек размера скользящего окна.

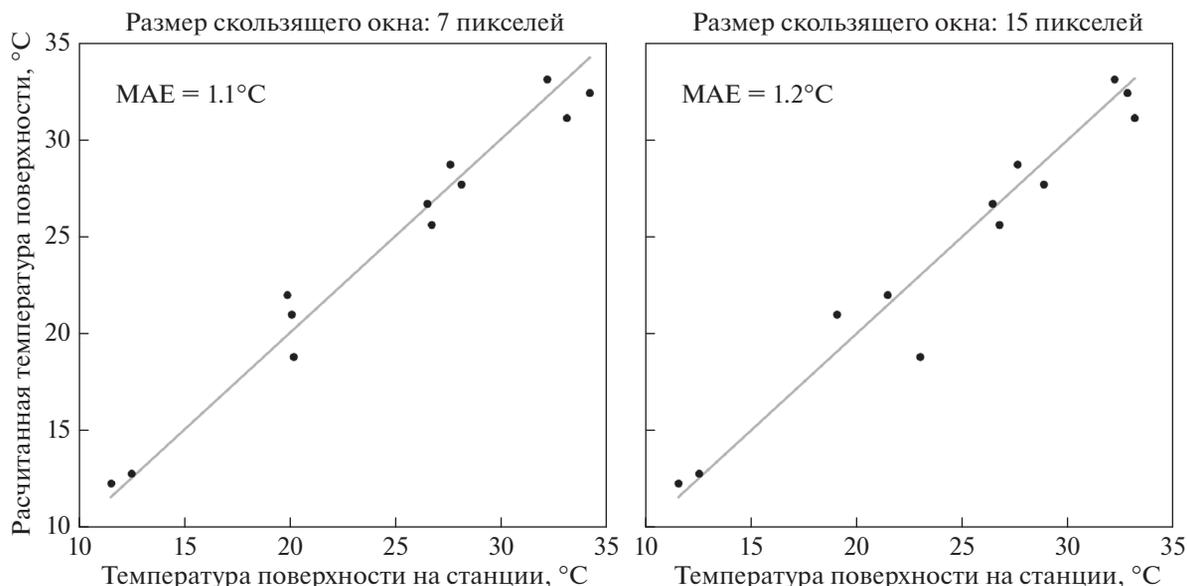


Рис. 4. Распределение ошибок по всем валидирующим станциям для расчетов с размером скользящего окна 7 (слева) и 15 (справа).

Программный модуль может осуществлять расчеты в нескольких режимах, в частности, пользователь может управлять способом получения значений излучательной способности территории. Так, доступны следующие варианты:

- Автоматический расчет по NDVI с использованием атмосферной коррекции SREM (опция по умолчанию, рекомендуемая).
- Автоматический расчет по NDVI без атмосферной коррекции (увеличивает скорость расчетов, не требует установки открытого модуля SREM, уменьшает качество).
- Получение излучательной способности по карте типов земель.
- Использование существующего набора данных по излучательной способности (применимо, если пользователь осуществил расчет в другой программе или получил качественные данные где-либо).

Также пользователь может управлять размером скользящего окна, и, при необходимости, настройками алгоритма маскирования облаков и затененных областей, в том числе его чувствительностью и размером буферизации вокруг облаков и теней. Сама процедура запуска расчетов минималистична и выполняется вызовом одной команды с указанием путей до всех необходимых источников данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате тестирования и валидации результаты показывают приемлемые метрики как средних абсолютных ошибок (1.1°C при оптимальном размере скользящего окна), так и вычислительных затрат (~10 мин на обработку одного снимка).

Авторы надеются, что публикация программного кода простого в использовании, но достаточно эффективного автономного алгоритма вычисления температуры поверхности Земли по данным публичной программы дистанционного зондирования Landsat 8 поможет исследователям и практикующим специалистам с минимальными усилиями получать более качественные данные о тепловом режиме территории относительно высокого пространственного разрешения, избегая грубых ошибок и некорректных интерпретаций. Реализованный метод не является заменой других профессиональных подходов, например ассимилирующих информацию о фактическом состоянии атмосферы, а лишь предлагает упрощенную, но качественную альтернативу им для задач, когда получение внешних данных и использование более сложных алгоритмов затруднено или невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В.* Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 57–64.
- Балдина Е.А., Грищенко М.Ю.* Исследование “теплого острова” Москвы по разносезонным снимкам LANDSAT-7/ETM+ // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 61–69.
- Волкова Е.В., Успенский С.А.* Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 291–303.
- Горный В.И., Лялько В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Бровкина О.В., Киселев А.В., Давидан Т.А., Лубский Н.С.* Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191.
- Казаков Э.Э., Борисова Ю.И.* Оценка применимости алгоритма атмосферной коррекции SREM для анализа временных рядов на примере данных Landsat и его открытая программная реализация // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 30–39.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф.* Радиационный баланс Земли как индикатор глобального экологического равновесия // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 1. С. 3–9.
- Крицук С.Г., Горный В.И., Латыпов И.Ш.* Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290.
- Станкевич С.А., Филиппович В.Е., Лубский Н.С., Крылова А.Б., Крицук С.Г., Бровкина О.В., Горный В.И., Тронин А.А.* Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съемки // Украинский журн. дистанційного зондування Землі. 2015. № 7. С. 12–21.
- Тронин А.А., Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов, И.Ш.* Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 23–36.
- Успенский А.Б., Кухарский А.В., Успенский С.А.* Валидация результатов спутникового мониторинга температуры поверхности суши // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 81–95.
- Anderson M.C., Allen R.G., Morse A., Kustas W.P.* Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources // Remote Sens. Environ. 2012. V. 122. P. 50–65.
- Bilal M., Nazeer M., Nichol J.E., Bleiweiss M.P., Qiu Z., Jäkel E., Campbell J.R., Atique L., Huang X., Lolli S.* A simplified and robust surface reflectance estimation method (SREM) for use over diverse land surfaces using multi-sensor data // Remote Sens. 2019. V. 11. № 11. P. 1344.

- Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // *Remote Sens. Environ.* 1997. V. 62. P. 241–252.
- Cristóbal J., Jiménez-Muñoz J.C., Prakash A., Mattar C., Skoković D., Sobrino J.A. An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 3. P. 431.
- Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Zhao S. A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data // *Remote Sens.* 2015. V. 7. № 1. P. 647–665.
- García-Santos V., Cuxart J., Martínez-Villagrana D., Jiménez M.A., Simó G. Comparison of three methods for estimating land surface temperature from Landsat 8-TIRS sensor data // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 9. P. 1450.
- Keeratikasikorn C., Bonafoni S. Urban heat island analysis over the land use zoning plan of Bangkok by means of Landsat 8 imagery // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 3. P. 440.
- Li Z.L., Tang B.H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // *Remote Sens. Environ.* 2013. V. 131. P. 14–37.
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995. V. 33. № 2. P. 481–486.
- Olioso A., Mira M., Courault D., Marloie O., Guillevic P. Impact of surface emissivity and atmospheric conditions on surface temperatures estimated from top of canopy brightness temperatures derived from Landsat 7 data // 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'13). 21–26 July 2013. Melbourne, Australia, 2013. P. 3033–3036.
- Perez Hoyos I.C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity // *International J. Recent Development in Engineering and Technology.* 2014. V. 2. № 2. P. 26–30.
- Ren H., Du C., Liu R., Qin Q., Yan G., Li Z.L., Meng J. Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 thermal infrared images // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120. № 5. P. 1723–1738.
- Rozenstein O., Qin Z., Derimian Y., Karnieli A. Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm // *Sensors.* 2014. V. 14. № 4. P. 5768–5780.
- Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 294.
- Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 // *Remote Sens. Environ.* 2004. V. 90. P. 434–440.
- Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008. V. 46. № 2. P. 316–327.
- Son N.T., Chen C.F., Chen C.R., Chang L.Y., Minh V.Q. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data // *Int. J. Appl. Earth Obs.* 2012. V. 18. P. 417–427.
- Walawender J.P., Hajto M.J., Iwaniuk P. A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'12). 22–27 July 2012. Munich, Germany, 2012. P. 4371–4374.
- Wang L., Lu Y., Yao Y. Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images // *Sensors.* 2019. V. 19. P. 5049.
- Yu X., Guo X., Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method // *Remote Sens.* 2014. V. 6. P. 9829–9852.
- Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 159. P. 269–277.

Open Source Software Implementation and Validation of Split-Window Method for Automated Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Data

E. E. Kazakov¹ and Yu. I. Borisova^{1,2}

¹State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

An open source software implementation of the algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat 8 remote sensing satellite data is presented. Split-window algorithm, supplemented by a covariance-variance technique for modeling the water vapor content in the atmosphere is used. The implementation also uses SREM atmospheric correction method and FMASK cloud and shadow detection algorithm. All components of the complex algorithm are fully automated and do not require additional information, such as external data on the state of the atmosphere. The algorithm implementation was validated at various settings with 10 ground stations in the United States that publish data on observations of surface temperature with high time resolution. The estimated average absolute error is about 1.1°C. The software implementation is developed in Python and available in a public repository https://github.com/eduard-kazakov/Landsat8_LST_PSWA, the source code is distributed under an open license.

Keywords: land surface temperature, remote sensing, landsat 8, tirs, srem, fmask, split-window algorithm

REFERENCES

- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Dvuhkanal'nyy metod vosstanovleniya temperatury poverhnosti chernogo morya po izmereniyam Landsat-8 [The Two-Channel Method for Reconstructing Sea Surface Temperature from Landsat-8 Measurements] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2016. № 4. P. 57–64 (In Russian).
- Anderson M.C., Allen R.G., Morse A., Kustas W.P.* Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 122. P. 50–65.
- Baldina E.A., Grishenko M.Y.* Issledovanie “teplovogo ostrova” Moskvy po raznosezonnym snimkam LANDSAT-7/ETM+ [Study of urban heat island using multiseasonal Landsat 7/ ETM+ thermal imagery: case study of Moscow] // *Geoinformatica*. 2011. № 3. P. 61–69 (In Russian).
- Bilal M., Nazeer M., Nichol J.E., Bleiweiss M.P., Qiu Z., Jäkel E., Campbell J.R., Atique L., Huang X., Lolli S.* A simplified and robust surface reflectance estimation method (SREM) for use over diverse land surfaces using multi-sensor data // *Remote Sens.* 2019. V. 11. № 11. P. 1344.
- Carlson T.N., Ripley D.A.* On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // *Remote Sens. Environ.* 1997. V. 62. P. 241–252.
- Cristóbal J., Jiménez-Muñoz J.C., Prakash A., Mattar C., Skoković D., Sobrino J.A.* An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the Landsat-8 thermal band // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 3. P. 431.
- Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Zhao S.* A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data // *Remote Sens.* 2015. V. 7. № 1. P. 647–665.
- García-Santos V., Cuxart J., Martínez-Villagrasa D., Jiménez M.A., Simó G.* Comparison of three methods for estimating land surface temperature from Landsat 8-TIRS sensor data // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 9. P. 1450.
- Gornyy V.I., Lyalko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filipovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Davidan T.A., Lubsky N.S., Krylova A.B.* Prognoz teplovoj reakcii gorodskoj srede Sankt-Peterburga i Kiev na izmenenie klimata (po materialam s'emok sputnikami EOS i Landsat) [Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery)] // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2016. V. 13. № 2. P. 176–191 (In Russian).
- Kazakov E.E., Borisova Y.I.* Ocenka primenimosti algoritma atmosfernoj korrekcii SREM dlya analiza vremennyh ryadov na primere dannyh Landsat i ego otkrytaya programnaya realizaciya [Evaluation of the SREM atmospheric correction algorithm applicability to time series analysis using Landsat data example and its open source software implementation] // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020. V. 17. № 2. P. 30–39 (In Russian).
- Keeratikasikorn C., Bonafoni S.* Urban heat island analysis over the land use zoning plan of Bangkok by means of Landsat 8 imagery // *Remote Sens.* 2018. V. 10. № 3. P. 440.
- Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F.* Radiacionnyj balans Zemli kak indikator global'nogo ekologicheskogo ravnovesiya [Earth's Radiation Budget as an Indicator of Global Ecological Equilibrium] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2006. № 1. P. 3–9 (In Russian).
- Kritsuk S.G., Gornyy V.I., Latypov I.S.* Povyshenie detal'nosti sputnikovogo kartografirovaniya teplofizicheskikh harakteristik zemnoj poverhnosti [Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermal properties of land surface] // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2016. V. 13. № 5. P. 277–290 (In Russian).
- Li Z.L., Tang B.H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A.* Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // *Remote Sens. Environ.* 2013. V. 131. P. 14–37.
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L.* The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995. V. 33. № 2. P. 481–486.
- Olioso A., Mira M., Courault D., Marloie O., Guillevic P.* Impact of surface emissivity and atmospheric conditions on surface temperatures estimated from top of canopy brightness temperatures derived from Landsat 7 data // 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'13). 21–26 July 2013. Melbourne, Australia, 2013. P. 3033–3036.
- Perez Hoyos I.C.* Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity // *International J. Recent Development in Engineering and Technology*. 2014. V. 2. № 2. P. 26–30.
- Ren H., Du C., Liu R., Qin Q., Yan G., Li Z.L., Meng J.* Atmospheric water vapor retrieval from Landsat 8 thermal infrared images // *J. Geophys. Res: Atmos.* 2015. V. 120. № 5. P. 1723–1738.
- Rozenstein O., Qin Z., Derimian Y., Karnieli A.* Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm // *Sensors*. 2014. V. 14. № 4. P. 5768–5780.
- Sekertekin A., Bonafoni S.* Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 294.
- Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 // *Remote Sens. Environ.* 2004. V. 90. P. 434–440.
- Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P.* Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008. V. 46. № 2. P. 316–327.
- Son N.T., Chen C.F., Chen C.R., Chang L.Y., Minh V.Q.* Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data // *Int. J. Appl. Earth Obs.* 2012. V. 18. P. 417–427.
- Stankevich S.A., Filipovich V.E., Lubsky N.S., Krylova A.B., Kritsuk S.G., Brovkina O.V., Gornyy V.I., Tronin A.A.* Interkalibraciya metodov vosstanovleniya termodinamicheskoy temperatury poverhnosti urbanizovannoj territorii po materialam teplovoj kosmicheskoy s'emki [Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal infrared satellite imaging] // *Ukrainian J. Remote Sensing*. 2015. № 7. P. 12–21 (In Russian).

- Tronin A.A., Gorny V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.S.* Spektral'nye metody distantsionnogo zondirovaniya v geologii. Obzor [Spectral remote sensing for mineral exploration. A review] // *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2011. V. 8. № 4. P. 23–36 (In Russian).
- Uspenskii A.B., Kukharskii A.V., Uspenskii S.A.* Validaciya rezul'tatov sputnikovogo monitoringa temperatury poverhnosti sush'i [Validation of the results of the satellite monitoring of land surface temperature] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2015. № 2. P. 81–95 (In Russian).
- Volkova E.V., Uspensky S.A.* Distantsionnoe opredelenie temperatury podstilayushchej poverhnosti, prizemnoj temperatury vozduha i effektivnoj temperatury po sputnikovym dannym dlya yuga Evropejskoj territorii Rossii [Land surface, land air and effective temperature estimation for territories of Southern European Russia based on satellite data] // *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2016. V. 13. № 5. P. 291–303 (In Russian).
- Walawender J.P., Hajto M.J., Iwaniuk P.* A new ArcGIS toolset for automated mapping of land surface temperature with the use of LANDSAT satellite data // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'12). 22–27 July 2012. Munich, Germany, 2012. P. 4371–4374.
- Wang L., Lu Y. Yao Y.* Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images // *Sensors*. 2019. V. 19. P. 5049.
- Yu X., Guo X., Wu Z.* Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method // *Remote Sens*. 2014. V. 6. P. 9829–9852.
- Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E.* Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 159. P. 269–277.