

# Валидация значений температуры земной поверхности, вычисляемых по данным радиометра TIRS/Landsat-8, и их использование для анализа температурного режима орошаемых и посторошаемых почв Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай)

Е. А. Мамаш<sup>1</sup>, И. А. Пестунов<sup>1,3</sup>, С. Я. Кудряшова<sup>2</sup>, А. С. Чумбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mails: elenamamash@gmail.com, pestunov@ict.nsc.ru

<sup>2</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mails: sya55@mail.ru, chumbaev@issa-siberia.ru

<sup>3</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН  
Новосибирск, 630090, Россия

Работа посвящена валидации значений температуры земной поверхности (*англ.* Land Surface Temperature — LST), вычисляемых с использованием различных алгоритмов восстановления LST по данным радиометра TIRS/Landsat-8, путём их сопоставления с наземными измерениями. Предложена модификация одного из существующих алгоритмов вычисления LST с применением альтернативного способа вычисления коэффициента эмиссии. Показано, что рассмотренный алгоритм обеспечивает наилучшую согласованность с наземными измерениями. С использованием предложенного алгоритма и данных Landsat выполнен анализ многолетней динамики температурного режима орошаемых и посторошаемых почв Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай). Построены картограммы распределения значений LST для территории Чуйской котловины и ключевых участков с 1989 по 2022 г. на основе разновременных снимков Landsat. Для исследуемых участков Чуйской котловины, подвергнутых воздействию оросительных систем, показано наличие значимой корреляции между LST и нормализованными индексами влажности NDMI (*англ.* Normalized Difference Moisture Index), и растительности NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index). Максимальные значения коэффициентов корреляции как с индексом влажности NDMI, так и с индексом растительности NDVI составляют 0,87 и приходится на период функционирования оросительных систем в полную мощность. Показано, что функционирование оросительных систем приводит к существенному изменению характера распределения LST как для всей территории Чуйской котловины, так и для ключевых участков, которые расположены в зонах орошения.

**Ключевые слова:** валидация, температура земной поверхности, LST, Landsat, температурный режим почв, оросительные системы, Чуйская межгорная котловина

Одобрена к печати: 21.11.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-9-25

## Введение

Температурный режим почв, объективно отражающий изменения количественных показателей температуры земной поверхности (*англ.* Land Surface Temperature — LST), является одним из наиболее значимых экологических факторов, который совместно с гидрологическим режимом характеризует общий энергетический уровень почвообразования и в целом биопродуктивность различных геосистем (Волобуев, 1974; Чичулин, 2023).

В последние годы в практике почвенно-экологических исследований для определения LST стали активно использоваться данные, получаемые с помощью различных спутниковых систем (MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)/Terra+Aqua, VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)/Suomi NPP, TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor)/Landsat и др.) (Истомина, Василенко, 2015; Anderson et al., 2012; Pérez Díaz et al., 2015; Xu et al., 2020; Xu et al., 2023). В отличие от традиционных методов, которые позволяют

определять лишь точечные значения LST, методы спутникового зондирования дают возможность получить полную пространственную информацию о температурном поле изучаемой территории.

Для исследования локальных изменений температурного режима на небольших территориях, отличающихся разнообразием биоклиматических условий, чаще всего используются данные спутников серии Landsat (Истомина, Василенко, 2015; Мамаш и др., 2022; Bogdan et al., 2022). Программа Landsat успешно предоставляет тепловую информацию о земной поверхности уже в течение более четырёх десятилетий с периодичностью в 16 сут. Однако работа с этими данными осложняется тем обстоятельством, что в настоящее время отсутствует единый общепринятый алгоритм расчёта LST. Значения LST, восстановленные по данным Landsat с помощью различных алгоритмов, могут существенно отличаться друг от друга (Ermida et al., 2020; Galve et al., 2022; Jiménez-Muñoz et al., 2014; Meng et al., 2022; Wang et al., 2023). Например, в ряде исследований (Dyba et al., 2022; Ermida et al., 2020; Galve et al., 2022; Meng et al., 2022; Wang et al., 2023) показано, что температурные данные продуктов второго уровня (*англ.* Level-2 Science Products — L2SP), предоставляемые Геологической службой США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>), могут содержать систематическую ошибку. Поэтому для анализа многолетней динамики температурного режима орошаемых и пасторощаемых почв Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) на основе спутниковых данных TIRS/Landsat в настоящей работе предварительно проводится валидация значений LST, вычисляемых с использованием различных алгоритмов путём их сопоставления с наземными измерениями.

Выбор Чуйской межгорной котловины в качестве объекта исследования не случайный. Начало современного ирригационного строительства на территории котловины связано с освоением промышленных запасов ртутных месторождений в 30-е гг. прошлого столетия. Рост численности населения, занятого в сооружении промышленных объектов, потребовал решения продовольственной проблемы, что повлекло за собой масштабное строительство оросительных систем на территории Чуйской и Курайской котловин.

Однако с вводом в эксплуатацию ирригационной сети избыточное многолетнее орошение стало причиной прогрессирующего заболачивания, проявления мерзлотных явлений и изменения микроклимата в целом. В 1985 г. было принято решение о нецелесообразности эксплуатации гидромелиоративной системы, и некогда орошаемый массив с крупнейшей коллекцией многолетних трав вновь стал пастбищным участком сухой степи. В настоящее время в Чуйской степи на площади более 2 тыс. га функционируют Тархатинская, Елангашская и Чаган-Баргузинская оросительные системы (Кречетова, Медведева, 2020).

Уникальные многовременные коллекции данных TIRS/Landsat позволяют исследовать влияние и оценить последствия воздействия ирригационных сооружений на почвенно-экологическое состояние территории Чуйской межгорной котловины.

## Алгоритмы расчёта LST по данным TIRS/Landsat

Существует ряд алгоритмов восстановления LST по данным Landsat (Ermida et al., 2020; Jiménez-Muñoz et al., 2014; Li et al., 2013a; Meng et al., 2022; Sobrino et al., 2008). Эти алгоритмы, как правило, основаны на решении уравнения радиационного переноса применительно к тепловому инфракрасному диапазону. Для расчёта LST чаще всего используются одноканальные алгоритмы (*англ.* single channel algorithms) (Jiménez-Muñoz et al., 2014; Wang et al., 2019) и алгоритмы расщеплённого окна (*англ.* split-window algorithms) (Jiménez-Muñoz et al., 2014; Meng et al., 2022). Атмосферная коррекция в большинстве случаев проводится на основе данных реанализа (например, NCAR (*англ.* National Center for Atmospheric Research) и NCEP (*англ.* National Center for Environmental Prediction) (Kalnay et al., 1996), NARR (*англ.* North American Regional Reanalysis) (McCarville et al., 2011), GAPRI (*англ.* Global Atmospheric Profiles from Reanalysis Information) (Jiménez-Muñoz et al., 2014; Meng et al., 2022)). Для вычисления коэффициента излучения (эмиссии) используются наблюдения других спутников

(например, MODIS/Terra+Aqua, ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)/Terra) (Ermida et al., 2020), либо применяются алгоритмы на основе подсчёта индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (Sobrino et al., 2008).

Доступ к данным Landsat чаще всего осуществляется через сайт USGS. В рамках программы создания продуктов L2SP служба USGS с 2022 г. начала выпуск оперативного продукта LST (Cook et al., 2014). Этот продукт также основан на решении уравнения радиационного переноса с помощью программы MODTRAN (Berk et al., 2014), а для реализации процедуры атмосферной коррекции в данном случае используются данные NARR. Расчёт коэффициента эмиссии для этого продукта основан на данных ASTER GED (*англ.* ASTER Global Emissivity Dataset) (Hulley et al., 2015).

В последние годы всё большую популярность приобретает облачная платформа GEE (*англ.* Google Earth Engine), обеспечивающая не только доступ к данным, но и обработку их больших временных серий. На основе информации USGS в GEE представлены коллекции данных Landsat уровня L1 и L2, включая яркостную температуру TOA (*англ.* Top-Of-Atmosphere). В GEE все данные тепловой съёмки Landsat имеют разрешение 30 м, что исключительно важно при исследовании небольших по площади природных и антропогенных объектов.

В работе (Ermida et al., 2020) предложен алгоритм подсчёта LST (далее его будем называть LST\_erm) по данным спутников Landsat в системе GEE. В нём значения LST вычисляются с помощью одноканального алгоритма SMW (*англ.* Statistical Mono-Window) (Duguay-Tetzlaff et al., 2015). Кроме данных Landsat для расчёта LST здесь используются также данные реанализов NCEP и NCAR, а в качестве модели радиационного переноса взята модель RTTOV (*англ.* Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder) (Saunders et al., 2018). Коэффициент эмиссии вычисляется, как и в продукте L2SP, на основе данных ASTER GED. К их недостаткам можно отнести значительные пробелы в покрытии на территории России.

Поэтому в нашей работе, наряду с продуктами L2SP и LST\_erm, рассмотрим модификацию алгоритма LST\_erm (далее эту модификацию будем называть алгоритмом LST\_sob), где коэффициент эмиссии вычисляется по формуле (Sobrino et al., 2008):

$$\varepsilon_b = \begin{cases} \varepsilon_{b,bare}, & \text{NDVI} < \text{NDVI}_{bare}, \\ \text{FVC} \cdot \varepsilon_{b,veg} + (1 - \text{FVC})\varepsilon_{b,bare}, & \text{NDVI}_{bare} < \text{NDVI} < \text{NDVI}_{veg}, \\ \varepsilon_{b,veg}, & \text{NDVI} > \text{NDVI}_{veg}. \end{cases}$$

Здесь  $\varepsilon_{b,veg}$  и  $\varepsilon_{b,bare}$  — соответственно коэффициенты излучения поверхности, полностью покрытой растительностью, и голой почвы для заданного спектрального канала  $b$ . В алгоритме LST\_erm коэффициент  $\varepsilon_{b,veg}$  считается постоянным и равным 0,99, тогда как  $\varepsilon_{b,bare}$  вычисляется по данным ASTER GED. В алгоритме LST\_sob коэффициент  $\varepsilon_{b,bare}$  также будем считать постоянным, равным 0,97. Это значение выбрано на основании результатов исследований, представленных в работах (Dash et al., 2005; Li et al., 2013a, b; Sobrino et al., 2008; Wang et al., 2015). Функция FVC (*англ.* Fractional Vegetation Cover) отражает соотношение площадей голой почвы и растительности на изучаемом участке (Ermida et al., 2020; Malakar et al., 2018) и имеет вид:

$$\text{FVC} = \left( \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{bare}}{\text{NDVI}_{veg} - \text{NDVI}_{bare}} \right)^2,$$

где  $\text{NDVI}_{bare}$  и  $\text{NDVI}_{veg}$  — пороговые значения NDVI, соответствующие голой почве и почве, полностью покрытой растительностью, соответственно. В нашем случае  $\text{NDVI}_{bare} = 0,2$ ,  $\text{NDVI}_{veg} = 0,86$ , как и в работах (Ermida et al., 2020; Jiménez-Muñoz et al., 2009).

Значения LST вычисляются на основе алгоритма SMW (Duguay-Tetzlaff et al., 2015), в котором кроме данных теплового канала Landsat и значений коэффициента эмиссии используются атмосферные данные реанализов NCEP и NCAR. В результате получаем линеаризованную модель уравнения радиационного переноса, в которой сохраняется явная зависимость от коэффициента эмиссии:

$$LST = A_i \frac{T_b}{\varepsilon} + B_i \frac{1}{\varepsilon} + C_i,$$

где  $T_b$  — яркостная температура ТОА в канале TIR (*англ.* Thermal Infrared),  $\varepsilon$  — коэффициент эмиссии, а коэффициенты  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  вычисляются на основе набора данных профилей температуры воздуха, водяного пара и озона (Ermida et al., 2020).

Следующий раздел будет посвящён валидации значений LST, полученных с помощью алгоритмов L2SP, LST\_erm, LST\_sob, с целью выбора наилучшего варианта для решения поставленной задачи.

### Валидация температурных данных Landsat на основе наземных наблюдений

За рубежом валидация температурных продуктов Landsat, получаемых с помощью различных алгоритмов, обычно проводится на основе данных сети наземных измерительных станций (например, SURFRAD (*англ.* Surface Radiation Budget), BSRN (*англ.* Baseline Surface Radiation Network), HiWATER (*англ.* Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research) и т. п.), расположенных в разных частях планеты и, к сожалению, не представленных в России. Для продукта L2SP в ряде работ также проводилась валидация для различных типов подстилающей поверхности (Galve et al., 2022; Ghasempour et al., 2023; Meng et al., 2022; Wang et al., 2023). Средний сдвиг (*англ.* Mean Bias Error — MBE) между данными L2SP и данными измерительных станций варьировался от  $\pm 0,42$  до  $\pm 1,3$  °C, а среднеквадратическая ошибка (*англ.* Root Mean Square Error — RMSE) изменялась в пределах от 2,0 до 3,42 °C.

В работе (Ermida et al., 2020) приведены оценки значений LST, вычисленные с помощью алгоритма SMW, реализованного в GEE с использованием данных сети станций SURFRAD и BSRN. Разброс RMSE для различных станций и спутников Landsat-4, -5, -7, -8 изменялся в пределах от 1,4 до 3,9 °C. Вместо среднего сдвига в этой работе вычисляется так называемая медианная ошибка (робастный аналог MBE), значения которой варьировались в пределах от  $-1,2$  до  $3,0$  °C.

Для валидации спутниковых данных как за рубежом, так и в России нередко используют автоматизированные регистраторы температуры типа Thermochron (iButton) (Варенцов и др., 2021; Воропай и др., 2011; Горный и др., 2017; Грищенко, Михайлюкова, 2022; Истомина, Василенко, 2015; Пономарева и др., 2022; Vrabyn et al., 2014; Koenig, Hall, 2010). Точность измерений этих датчиков составляет  $\pm 0,5$  °C. В работах (Варенцов и др., 2021) и (Грищенко, Михайлюкова, 2022) термодатчики устанавливались на высоте 1,5–2 м над поверхностью земли, что является спорным, так как значения температуры на поверхности земли и на уровне двух метров могут существенно отличаться.

В нашей работе для исследования многолетней динамики температурного режима орошаемых и посторошаемых почв Чуйской межгорной котловины на участках Кош-Агачского района были установлены термодатчики DS-1921 Thermochron. На этих участках тип подстилающей поверхности везде одинаковый, а именно овсянничево-полынная сухая степь, рельеф выровненный. Всего было установлено 18 термодатчиков в шести точках на поверхности почвы и шесть соответствующих термодатчиков для измерения температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью. С целью контроля качества измерений в каждой из выбранных точек использовались средние значения показаний, полученные с помощью трёх термодатчиков, расположенных рядом. Датчики программировались с учётом времени пролёта спутника. Измерения проводились в два периода: 27.07–15.10.2022 и 16.05–09.08.2023. Данные района и точек исследования приведены в *табл. 1*. На *рис. 1* (см. с. 13) показано местонахождение точек на территории Чуйской котловины.

На *рис. 2* (см. с. 13) видно, что в дневное время значения температуры на поверхности почвы могут более чем в два раза превышать температуру воздуха на высоте  $h = 2$  м, максимальное отличие составило 24,5 °C. Этот факт позволяет сделать вывод, что температурные данные, измеренные на поверхности почвы и на высоте 2 м над поверхностью, вообще



говоря, могут критически отличаться. Поэтому далее под наземными измерениями везде подразумеваются значения температуры поверхности почвы.

Таблица 1. Список точек А1–А6, район их расположения, координаты и высота над уровнем моря

Номер точки	Район	Координаты, °с. ш.; °в. д.	Высота, м над уровнем моря
А1	окр. с. Кокоря	49,90721; 88,96675	1855
А2		49,91028; 88,94050	1845
А3	окр. с. Тобелер	49,85173; 88,67678	1891
А4	окр. с. Кош-Агач	49,96667; 88,69635	1758
А5		50,02446; 88,58833	1808
А6	окр. с. Новый Бельтир	49,91297; 88,57992	1834



Рис. 1. Пространственное распределение термодатчиков на территории Чуйской котловины: точки А1–А6

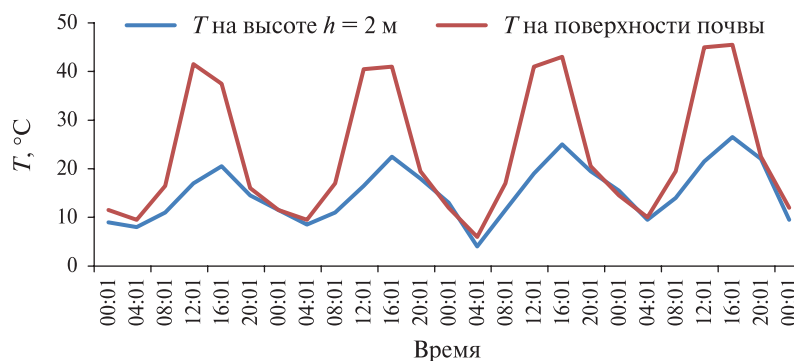


Рис. 2. Динамика температуры (Т) на поверхности почвы и на высоте 2 м в т. А1 за период с 25 по 29 июля 2022 г.

Как говорилось выше, в работах (Варенцов и др., 2021; Грищенко, Михайлюкова, 2022) при валидации значений LST авторами использовались данные измерений, полученные на высоте 2 м. На рис. 2 приведены графики температуры воздуха, измеренной на поверхности почвы и на высоте  $h = 2$  м в т. А1 за период с 25.07.2022 по 29.07.2022.

В табл. 2 приведены основные статистические характеристики сравнения наземных измерений и спутниковых данных, полученных с помощью алгоритмов L2SP, LST\_ern и LST\_sob. Также в табл. 2 представлены результаты сравнения с данными TOA. Все значения статистических характеристик приводятся после удаления выбросов с использованием

фильтра Хампеля, который считается надёжным методом обнаружения выбросов (Davies, Gather, 1993). Соответствующие диаграммы рассеяния и уравнения регрессии представлены на *рис. 3*, а на *рис. 4* приведены гистограммы распределения абсолютных значений разности (сдвига) спутниковых данных и наземных измерений. Из *табл. 2* видим, что диапазон изменения основных статистических характеристик соответствует результатам валидации, приведённым выше в работах (Ermida et al., 2020; Galve et al., 2022; Ghasempour et al., 2023; Meng et al., 2022; Wang et al., 2023), использующих сеть наземных измерительных станций. Из *табл. 2* также видно, что наименьшие значения МБЕ,  $\sigma$  и RMSE для алгоритмов с атмосферной коррекцией обеспечивает LST\_sob. Это может быть обусловлено более точным определением коэффициента эмиссии для данного региона. Коэффициент детерминации  $R^2$  является достаточно высоким ( $\geq 0,93$ ) для всех исследуемых алгоритмов, что говорит о хорошей согласованности спутниковых данных и наземных измерений. Из *рис. 4* также видим, что 65 % LST, рассчитанных на основе алгоритма LST\_sob, отличаются от данных наземных наблюдений менее чем на 2 °С. Для данных LST, вычисленных на основе алгоритма L2SP, это значение составляет 28 %, для данных LST\_erm — 41 % и для данных TOA — 55 %. На основании полученных результатов дальнейший анализ будем проводить с использованием алгоритма LST\_sob.

Таблица 2. Основные статистические характеристики (МБЕ,  $\sigma$ , RMSE,  $R^2$ ), полученные при валидации спутниковых и наземных данных ( $N$  — число измерений)

Алгоритм	$N$	МБЕ, °С	$\sigma$ , °С	RMSE, °С	$R^2$
L2SP	58	-2,42	1,81	3,57	0,93
LST_erm	59	-1,40	1,45	2,78	0,94
LST_sob	57	-0,56	1,30	2,40	0,94
TOA	65	0,25	1,33	2,32	0,94

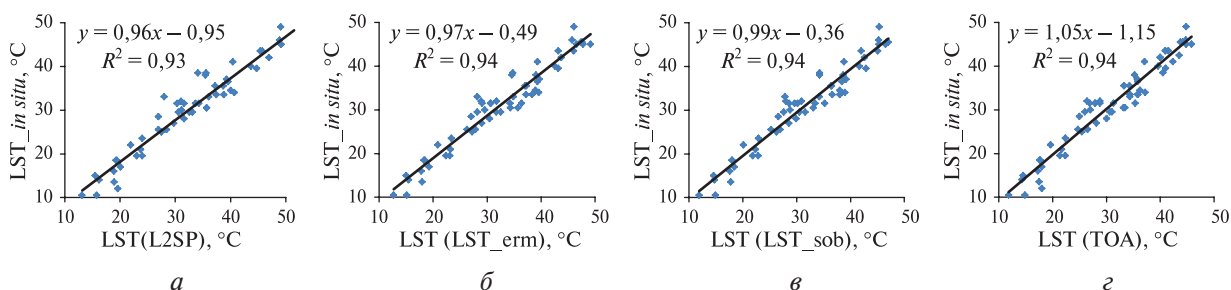


Рис. 3. Диаграммы рассеяния, уравнения регрессии и коэффициент детерминации для наземных измерений LST\_in situ и спутниковых данных LST, полученных с помощью алгоритмов: а — L2SP; б — LST\_erm; в — LST\_sob; з — TOA

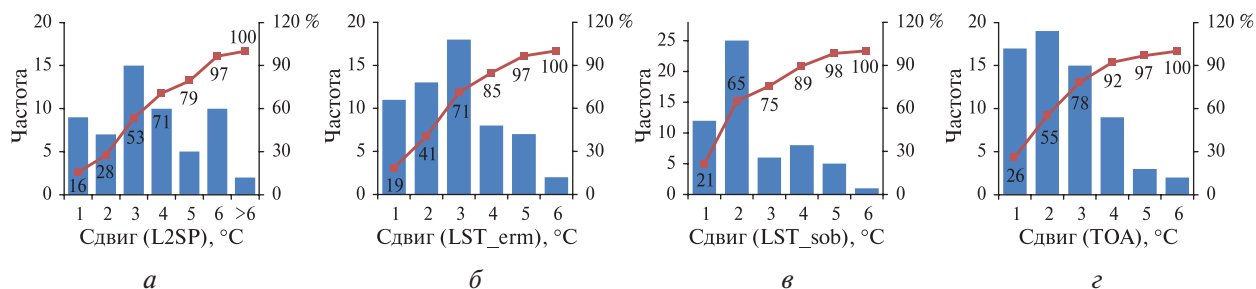


Рис. 4. Гистограммы распределения абсолютных значений сдвига между спутниковыми и наземными данными, а также их интегральная доля (в %) для различных алгоритмов вычисления LST: а — L2SP; б — LST\_erm; в — LST\_sob; з — TOA

## Анализ многолетней динамики температурного режима почв Чуйской межгорной котловины

Для анализа современного ирригационного воздействия и оценки степени влияния посторошения на формирование температурных полей почвенного покрова было выбрано четыре ключевых участка на территории Чуйской межгорной котловины Республики Алтай (рис. 5):

- 1-й участок — староорошаемый и неорошаемый массивы гидросистемы Кокоря;
- 2-й участок — староорошаемый участок Тархатинской оросительной системы;
- 3-й участок — это староорошаемый участок Елангашской оросительной системы;
- 4-й участок — тестовый участок сухой степи, расположенный вне зоны орошения.

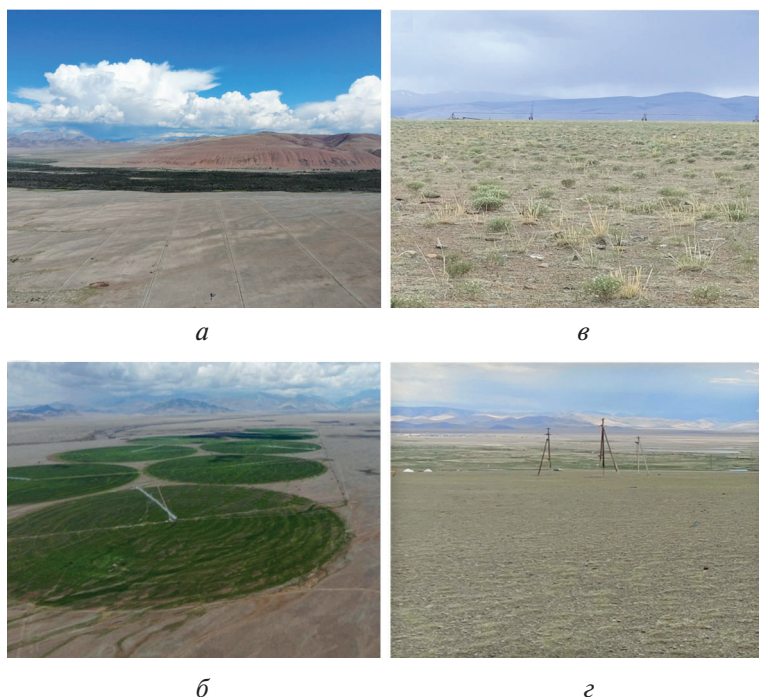


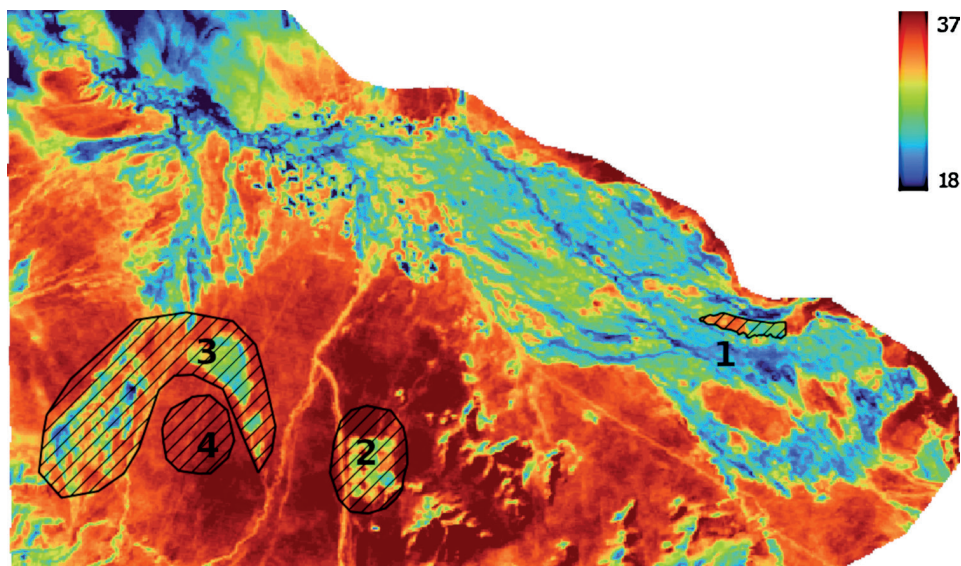
Рис. 5. Ключевые участки спутникового и наземного температурного мониторинга почв Чуйской степи: а — 1-й; б — 2-й; в — 3-й; г — 4-й

Таблица 3. Пространственная статистика распределений значений LST (в °С)

№ снимка	Дата	Спутник	Mean	Median	Min	Max	Range	$\sigma$
1	03.09.1989	Landsat-4	30,58	31,99	10,93	42,89	31,96	5,14
2	24.08.1994	Landsat-5	31,89	34,15	13,96	42,72	28,76	5,52
3	04.09.1998		27,39	27,35	12,16	37,39	25,23	3,73
4	04.09.2001	Landsat-7	28,61	29,73	10,90	41,68	30,78	4,06
5	17.08.2009	Landsat-5	28,27	28,67	12,05	39,22	27,17	4,26
6	31.08.2014	Landsat-8	35,12	36,82	16,98	45,93	28,95	4,40
7	29.08.2019		31,88	33,54	17,97	42,32	24,35	4,35
8	21.08.2022		23,75	24,28	11,58	33,47	21,89	3,01

Для проведения исследований начиная с 1989 г. были отобраны восемь спутниковых снимков с минимальной облачностью за разные годы, полученных приблизительно в один и тот же период года (конец августа – начало сентября), с интервалом 3–5 лет. В табл. 3 приведены значения LST по каждому выбранному году (среднее (Mean), минимальное (Min) и максимальное (Max); медиана (Median); размах (Range) и стандартное отклонение ( $\sigma$ )).

Первые два снимка (1989 и 1994 гг.) относятся к периоду активной эксплуатации систем орошения на исследуемой территории. Начиная с 1995 г. использование этих систем на территории Чуйской котловины заметно сократилось, что отражает динамика стандартного отклонения ( $\sigma$  уменьшилось и стало  $<4,4$  °C, в отличие от предыдущих лет, когда оно превышало 5 °C), т. е. снижение уровня влажности почвы повлекло уменьшение разброса значений LST. На *рис. 6* в качестве примера приведено распределение LST за 1989 г. на территории Чуйской котловины, а также нанесены границы четырёх ключевых участков.



*Рис. 6.* Распределение LST (в °C) в Чуйской котловине за 1989 г.; ключевые участки выделены штриховкой

Для оценки зависимости стандартного отклонения  $\sigma$  от температуры на момент съёмки были вычислены соответствующие коэффициенты корреляции  $r(\text{Mean}, \sigma) = 0,70$  и  $r(\text{Median}, \sigma) = 0,75$ . После сокращения числа ирригационных сооружений (начиная с 1998 г.) коэффициент корреляции увеличивается до 0,8. Также было установлено, что он растёт при добавлении в выборку дополнительных снимков, относящихся к периоду исследования (1989–2022), что говорит об устойчивых зависимостях в основных закономерностях распределения температуры на изучаемой территории.

Чтобы исключить влияние погодных условий, была применена процедура стандартизации и значения LST за указанные годы (см. *табл. 3*) были пересчитаны по формуле:

$$\text{LST}_{\text{st}} = \frac{\text{LST} - \text{Mean}}{\sigma}$$

На *рис. 7* (см. с. 17) приведён пример распределения значений  $\text{LST}_{\text{st}}$  на 1-м ключевом участке, где области тёмно-синего цвета на рисунках за 1989 и 1994 гг. соответствуют территориям, на которых функционировали оросительные системы. Прекращение обслуживания гидросистемы в 1995 г. резко отразилось на функционировании всей системы орошения, и характер распределения температурного поля заметно изменился (см. *рис. 7*).

На 2-м участке вследствие значительного влияния антропогенного фактора (работа систем кругового орошения то прекращалась, то возобновлялась, то менялось их число), также изменялись характер распределения LST и соответствующие значения стандартного отклонения. На 3-м участке после 1995 г. функционирование систем орошения было прекращено полностью, однако за счёт особенностей рельефа и расположения оросительных каналов вблизи р. Кок-Узек на этом участке ещё какое-то время продолжалось пассивное орошение. На 4-м участке распределение LST сходно с характером за весь исследуемый период, а  $\sigma$  варьируется незначительно (*рис. 8а*, см. с. 17).



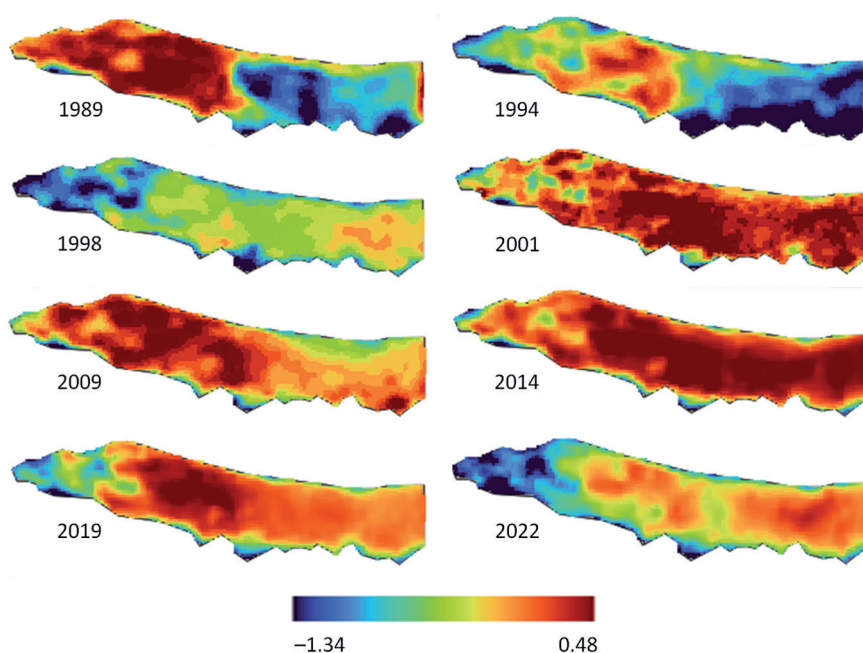


Рис. 7. Распределение LST\_st (в усл. ед.) за 1989–2022 гг. на 1-м ключевом участке

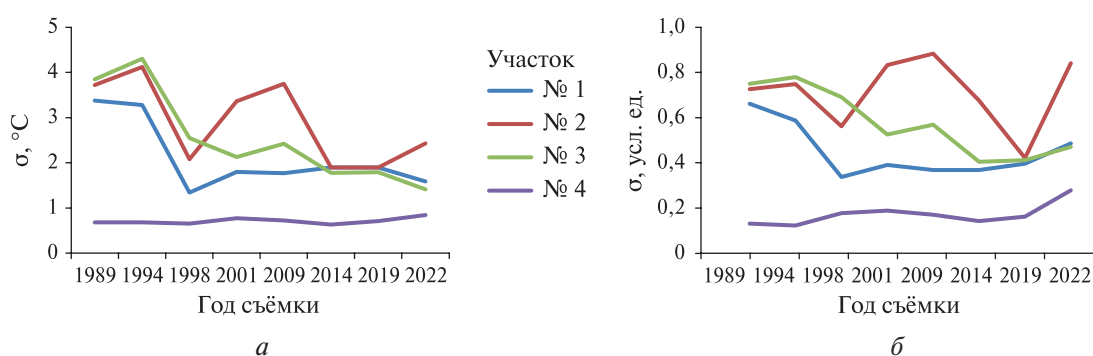


Рис. 8. Динамика средневквдратичного отклонения  $\sigma$ : а — для LST; б — для LST\_st

В отличие от графика, представленного на рис. 8а для 1-го участка, на рис. 8б видна явная тенденция к увеличению  $\sigma$ . Это можно объяснить появлением на этом участке в последние годы растительности в тех местах, где ранее была голая почва, что подтверждается ниже динамикой значений нормализованного вегетационного индекса NDVI.

При изучении теплового и водного режима территорий одной из важных задач дистанционного мониторинга является установление связи между температурой поверхности и вегетационным индексом NDVI, индексом влажности NDMI (англ. Normalized Difference Moisture Index) и водным индексом NDWI (англ. Normalized Difference Water Index) (Музылев и др., 2017; Чинь и др., 2018; Bhattacharya et al., 2021; Taloor et al., 2021), которые вычисляются по следующим формулам:

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}}}; \quad \text{NDMI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{SWIR}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{SWIR}}}; \quad \text{NDWI} = \frac{R_{\text{Green}} - R_{\text{NIR}}}{R_{\text{Green}} + R_{\text{NIR}}}.$$

Здесь  $R_{\text{NIR}}$  (англ. Near InfraRed),  $R_{\text{RED}}$ ,  $R_{\text{SWIR}}$  (англ. Short Wave InfraRed),  $R_{\text{Green}}$  — яркость в различных диапазонах спектра.

Для всей территории Чуйской котловины и отдельно для каждого из ключевых участков построены картограммы распределения значений этих индексов, а также вычислены коэффициенты корреляции между этими индексами и LST.

На рис. 9 представлен пример распределения LST и указанных индексов для территории Чуйской котловины по снимку № 7 за 29.08.2019 (см. табл. 3). На этом рисунке визуально прослеживается прямая связь между распределением значений NDVI и NDMI и значений LST и NDWI, а также обратная связь между парами распределений LST и NDMI, LST и NDVI, NDVI и NDWI. Соответствующие количественные оценки приведены в табл. 4.

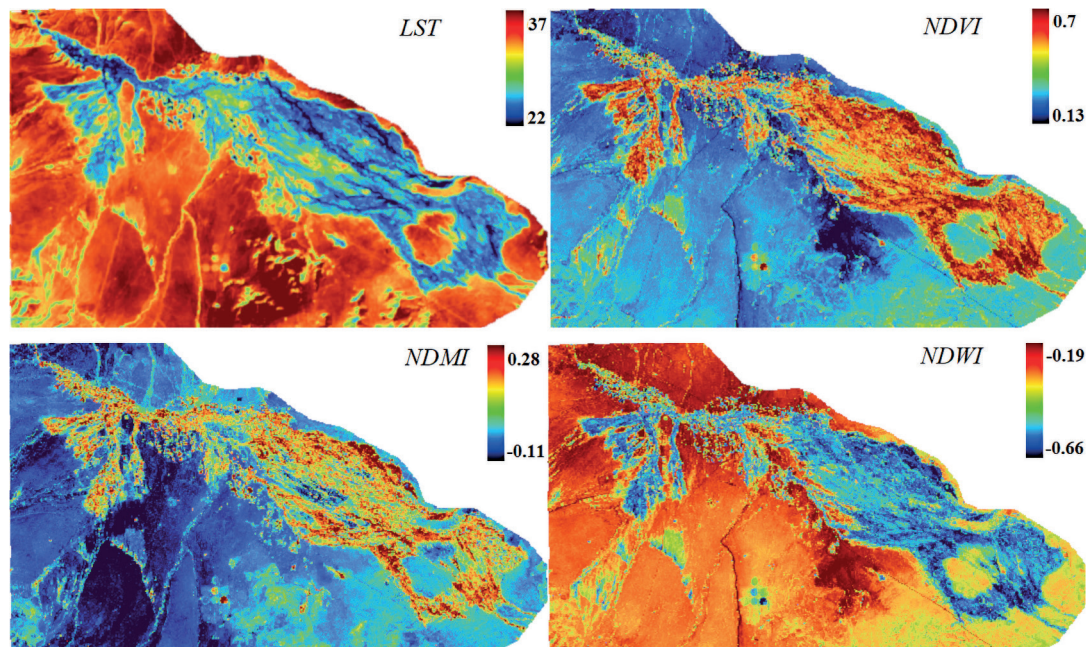


Рис. 9. Картограммы распределения LST (в °C) и индексов NDVI, NDMI и NDWI на территории Чуйской котловины за 29.08.2019

Таблица 4. Корреляционная матрица LST, NDVI, NDMI, NDWI по данным Landsat-8 за 29.08.2019

	LST	NDVI	NDMI	NDWI
LST	1			
NDVI	-0,75	1		
NDMI	-0,65	0,64	1	
NDWI	0,67	-0,97	-0,59	1

Из табл. 4 видно, что все коэффициенты корреляции значимы, самый высокий коэффициент корреляции (-0,97) указывает на наличие сильной обратной зависимости между индексами NDVI и NDWI, поэтому в дальнейшем индекс NDWI исключим из рассмотрения.

Из табл. 5 видно, что величины пространственной корреляции  $r(\text{NDMI}, \text{NDVI})$  для 1–3-го орошаемых участков достаточно высокие, значительно выше, чем в целом по Чуйской котловине. Самые высокие коэффициенты корреляции как между NDMI и NDVI, так и между значениями индексов и LST приходится на 1989 и 1994 гг., когда оросительные системы ещё функционировали в полную мощность. Начиная с 1998 г. высокие коэффициенты корреляции (>0,9) сохранялись на 2-м участке, где продолжала функционировать система поливальных машин. Также из табл. 5 видно, что зависимость между индексами NDMI и NDVI во всех случаях — прямая ( $r > 0$ ). Кроме того, в большинстве случаев коэффициенты корреляции LST с NDMI выше, чем с NDVI. На 4-м тестовом участке коэффициент корреляции стабильно низкий, что можно объяснить отсутствием антропогенного влияния и однородностью подстилающей поверхности.

Таблица 5. Результаты корреляционного анализа для ключевых участков за период 1989–2022 гг.

Год	$r(\text{NDVI}, \text{NDMI})$				$r(\text{LST}, \text{NDVI})$				$r(\text{LST}, \text{NDMI})$			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1989	0,94	0,94	0,89	0,43	-0,84	-0,82	-0,84	-0,31	-0,87	-0,87	-0,86	-0,41
1994	0,95	0,94	0,89	0,48	-0,83	-0,81	-0,87	-0,02	-0,85	-0,86	-0,85	-0,12
1998	0,85	0,78	0,83	0,49	-0,72	-0,58	-0,76	-0,26	-0,79	-0,70	-0,79	-0,38
2001	0,66	0,91	0,73	0,55	-0,62	-0,71	-0,64	0,02	-0,73	-0,86	-0,68	-0,14
2009	0,82	0,96	0,82	0,57	-0,50	-0,79	-0,64	-0,34	-0,50	-0,83	-0,73	-0,41
2014	0,84	0,94	0,66	0,38	-0,73	-0,77	-0,66	-0,16	-0,72	-0,87	-0,74	-0,55
2019	0,84	0,90	0,78	0,35	-0,70	-0,52	-0,68	0,19	-0,67	-0,70	-0,74	-0,33
2022	0,92	0,96	0,55	0,15	-0,78	-0,73	-0,46	0,23	-0,82	-0,80	-0,68	-0,48

Для анализа временных закономерностей и динамики индексов с LST и LST\_st подсчитаны средние, минимальные и максимальные значения индексов. Из *табл. 6, 7* видно, что коэффициенты корреляции между средними значениями индексов NDMI ( $\overline{\text{NDMI}}$ ) и NDVI ( $\overline{\text{NDVI}}$ ), средними значениями этих индексов и средним значением LST\_st ( $\overline{\text{LST\_st}}$ ) (см. *табл. 6*), а также их стандартными отклонениями  $\sigma_{\text{NDMI}}$ ,  $\sigma_{\text{NDVI}}$ ,  $\sigma_{\text{LST}}$ ,  $\sigma_{\text{LST\_st}}$  (см. *табл. 7*) на 1-м и 3-м участках достаточно высокие. А на 2-м и 4-м участках зависимость LST\_st от  $\overline{\text{NDMI}}$  и  $\overline{\text{NDVI}}$  является слабой ( $|r| < 0,32$ ). Для 2-го участка это может быть обусловлено тем, что количество и расположение дождевальных машин менялось на протяжении всего исследуемого периода, а для 4-го участка, как уже подчёркивалось, отсутствием ирригационных сооружений и однородностью подстилающей поверхности.

Таблица 6. Результаты корреляционного анализа для средних значений  $\overline{\text{LST\_st}}$ ,  $\overline{\text{NDVI}}$  и  $\overline{\text{NDMI}}$

№ участка	$r(\overline{\text{NDVI}}, \overline{\text{NDMI}})$	$r(\overline{\text{LST\_st}}, \overline{\text{NDVI}})$	$r(\overline{\text{LST\_st}}, \overline{\text{NDMI}})$
1	0,89	-0,58	-0,73
2	0,74	0,13	-0,05
3	0,93	-0,53	-0,62
4	0,92	-0,12	-0,32

Таблица 7. Результаты корреляционного анализа для значений  $\sigma_{\text{LST}}$ ,  $\sigma_{\text{LST\_st}}$ ,  $\sigma_{\text{NDVI}}$ ,  $\sigma_{\text{NDMI}}$

№ участка	$r(\sigma_{\text{NDVI}}, \sigma_{\text{NDMI}})$	$r(\sigma_{\text{LST}}, \sigma_{\text{NDVI}})$	$r(\sigma_{\text{LST}}, \sigma_{\text{NDMI}})$	$r(\sigma_{\text{LST\_st}}, \sigma_{\text{NDVI}})$	$r(\sigma_{\text{LST\_st}}, \sigma_{\text{NDMI}})$
1	0,99	0,87	0,88	0,95	0,94
2	0,49	0,69	0,58	0,32	0,86
3	0,99	0,97	0,99	0,88	0,91
4	0,83	0,32	0,12	0,20	0,13

## Выводы

Проведён анализ известных алгоритмов восстановления температуры земной поверхности по данным спутников серии Landsat. При нахождении температуры на основе продукта L2SP, предоставляемого USGS, а также в ряде других алгоритмов восстановления LST используются данные спектрорадиометра ASTER. Применение этих алгоритмов для отдельных регионов территории России невозможно из-за отсутствия данных ASTER GED. В работе нами

предложен одноканальный алгоритм (LST<sub>sob</sub>) вычисления температуры земной поверхности по спутниковым данным Landsat. Алгоритм LST<sub>sob</sub> представляет собой модификацию алгоритма, предложенного в работе (Ermida et al., 2020), использующую значения NDVI для подсчёта коэффициента эмиссии и не требующую данных ASTER GED.

Валидация значений LST, вычисленных с помощью алгоритмов L2SP, LST<sub>erm</sub> и предложенного нами алгоритма LST<sub>sob</sub>, была проведена на основе серии наземных измерений для участков сухой степи с открытой почвой на территории Чуйской котловины с использованием термодатчиков DS-1921 Thermochron. Она показала хорошую согласованность восстановленных значений температуры с наземными измерениями (коэффициент детерминации равен 0,93 для продукта L2SP и 0,94 для алгоритмов LST<sub>erm</sub> и LST<sub>sob</sub>). Предложенный алгоритм LST<sub>sob</sub> обеспечивает наименьшие значения среднего сдвига (MBE) и среднеквадратической ошибки (RMSE), которые равны в данном случае  $-0,56$  и  $2,4$  °C соответственно. Полученные оценки валидации позволяют предположить, что рассмотренные алгоритмы восстановления значений LST могут быть использованы для анализа температурных режимов не только участков котловины с открытой почвой, но и всей остальной территории Чуйской степи, проективное покрытие которой не превышает 50 %.

С применением предложенного алгоритма LST<sub>sob</sub> построены картограммы распределения значений LST для территории Чуйской котловины и четырёх ключевых участков с 1989 по 2022 г. на основе восьми разновременных снимков Landsat. Для 1–3-го ключевых участков, на которых функционировали оросительные системы, установлено наличие высокой корреляции между LST и индексами NDMI и NDVI (среднее значение  $r(\text{LST}, \text{NDVI})$  за весь исследуемый период времени составляет  $-0,7$ , а среднее значение  $r(\text{LST}, \text{NDMI})$  равно  $-0,77$ ). Максимальные значения этих коэффициентов корреляции, равные  $-0,87$ , приходятся на период 1989–1995 гг., когда оросительные системы работали на полную мощность.

Таким образом, в отличие от традиционных полевых методов измерения температуры почвы, которые позволяют получить лишь точечные оценки значений температуры, использование спутниковых данных даёт возможность построить пространственное распределение температуры для всей изучаемой территории. Предложенный алгоритм LST<sub>sob</sub> может быть применён для анализа температурных режимов почв, а также для исследования закономерностей и установления связей с показателями влажности и растительности на территории Чуйской котловины и других территорий со сходными природно-климатическими условиями.

## Литература

1. Варенцов М. И., Грищенко М. Ю., Константинов П. И. Сопоставление наземных и космических разномасштабных температурных данных на примере городов Российской Арктики для зимних условий // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 2. С. 64–76. DOI: 10.31857/S0205961421020093.
2. Волобуев В. Р. Введение в энергетику почвообразования. М.: Наука, 1974. 128 с.
3. Воронин Н. Н., Истомина Е. А., Василенко О. В. Исследование температурного поля земной поверхности Тункинской котловины с использованием космических снимков Landsat // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 1. С. 67–73.
4. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. и др. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съёмки Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 51–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66.
5. Грищенко М. Ю., Михайлюкова П. Г. Сопоставление наземных и космических данных для исследования пространственной дифференциации теплового поля природной территории (на примере острова Кунашир, Большая Курильская гряда) // Геодезия и картография. 2022. Т. 83. № 3. С. 35–43. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-981-3-35-43.
6. Истомина Е. А., Василенко О. В. Анализ температурного поля ландшафтов Тункинской котловины с использованием космических снимков Landsat и наземных данных // География и природные ресурсы. 2015. № 4. С. 162–170.
7. Кречетова И. М., Медведева Л. Н. Развитие мелиорации для кормопроизводства Республики Алтай // Орошаемое земледелие. 2020. № 3. С. 33–36. DOI: 10.35809/2618-8279-2020-3-6.



8. Мамаш Е. А., Пестунов И. А., Синявский Ю. Н. Анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири по данным Landsat-8 // Вычисл. технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 95–111. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.008.
9. Музылев Е. Л., Старцева З. П., Успенский А. Б. и др. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
10. Пономарева Т. В., Пономарев Е. И., Литвинцев К. Ю. и др. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычисл. технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 16–35. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.003.
11. Чинь Л. Х., Заблоцкий В. Р., Дао К. Х. Изучение многолетней динамики влажности почвы района Бак Бинь (провинция Бинь Тхуан, Вьетнам) по данным многозональной спутниковой съёмки Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 89–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-89-101.
12. Чичулин А. В. Возможности физико-теоретических методов в экологии почв (на примере моделирования структуры почвенно-климатических ареалов) // Почвы и окружающая среда. 2023. Т. 6. № 4. С. 229–248. DOI: 10.31251/pos.v6i4.229.
13. Anderson M. C., Allen R. G., Morse A., Kustas W. P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 122. P. 50–65. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.025.
14. Berk A., Conforti P., Kennett R. et al. MODTRAN6®: A major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code // Proc. 6<sup>th</sup> Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). 2014. DOI: 10.1109/WHISPERS.2014.8077573.
15. Bhattacharya S., Halder S., Nag S. et al. Assessment of drought using multi-parameter indices // Advances in Water Resources Management for Sustainable Use. Singapore: Springer, 2021. P. 243–255. DOI: 10.1007/978-981-33-6412-7\_18.
16. Bogdan E., Kamalova R., Suleymanov A. et al. Changing climatic indicators and mapping of soil temperature using Landsat data in the Yangan-Tau UNESCO global geopark // SOCAR Proc. 2022. P. 32–41. DOI: 10.5510/OGP2022SI200768.
17. Brabyn L., Zawar-Reza P., Stichbury G. et al. Accuracy assessment of land surface temperature retrievals from Landsat 7 ETM+ in the Dry Valleys of Antarctica using iButton temperature loggers and weather station data // Environmental Monitoring and Assessment. 2014. V. 186. P. 2619–2628. DOI: 10.1007/s10661-013-3565-9.
18. Cook M., Schott J. R., Mandel J., Raqueno N. Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a land surface temperature (LST) product from the archive // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 11. P. 11244–11266. DOI: 10.3390/rs6111244.
19. Dash P., Götsche F., Olesen F., Fischer H. Separating surface emissivity and temperature using two-channel spectral indices and emissivity composites and comparison with a vegetation fraction method // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 96. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.rse.2004.12.023.
20. Davies P., Gather U. The identification of multiple outliers // J. American Statistical Association. 1993. V. 88. No. 423. P. 782–792. <https://doi.org/10.2307/2290763>.
21. Duguay-Tetzlaff A., Bento V. A., Götsche F. M. et al. Meteosat land surface temperature climate data record: achievable accuracy and potential uncertainties // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 10. P. 13139–13156. DOI: 10.3390/rs71013139.
22. Dyba K., Ermida S., Ptak M. et al. Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8 // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 15. Article 3839. 21 p. DOI: 10.3390/rs14153839.
23. Ermida S., Soares P., Mantas V. et al. Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 9. Article 1471. 21 p. DOI: 10.3390/rs12091471.
24. Galve J. M., Sánchez J. M., García-Santos V. et al. Assessment of land surface temperature estimates from Landsat 8-TIRS in a high-contrast semiarid agroecosystem: Algorithms intercomparison // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 8. Article 1843. 22 p. DOI: 10.3390/rs14081843.
25. Ghasempour F., Sekertekin A., Kutoglu H. How Landsat 9 is superior to Landsat 8: comparative assessment of land use land cover classification and land surface temperature // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023. V. X-4/W1-2022. P. 221–227. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-221-2023.
26. Hulley G., Hook S., Abbott E. et al. The ASTER Global Emissivity Database (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 meter spatial resolution // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 7966–7976. DOI: 10.1002/2015GL065564.

27. *Jiménez-Muñoz J., Sobrino J., Plaza A. et al.* Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area // *Sensors*. 2009. V. 9. P. 768–793. DOI: 10.3390/s90200768.
28. *Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Skoković D. et al.* Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor data // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. V. 11. No. 10. P. 1840–1843. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2312032.
29. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. American Meteorological Soc. (BAMS)*. 1996. V. 77. Iss. 3. P. 437–471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
30. *Koenig L., Hall D.* Comparison of satellite, thermochron and air temperatures at Summit, Greenland, during the winter of 2008/09 // *J. Glaciology*. 2010. V. 56. Iss. 198. P. 735–741. DOI: 10.3189/002214310793146269.
31. *Li Z.-L., Tang B.-H., Wu H. et al.* (2013a) Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives // *Remote Sensing of Environment*. V. 131. P. 14–37. DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
32. *Li Z.-L., Wu H., Wang N. et al.* (2013b) Land surface emissivity retrieval from satellite data // *Intern. J. Remote Sensing*. 2013. V. 34. P. 3084–3127. DOI: 10.1080/01431161.2012.716540.
33. *Malakar N., Hulley G., Hook S. et al.* An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: methodology and validation // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. No. 10. P. 5717–5735. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2824828.
34. *McCarville D., Buenemann M., Bleiweiss M., Barsi J.* Atmospheric correction of Landsat thermal infrared data: A calculator based on North American Regional Reanalysis (NARR) data // *American Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing Annu. Conf.* 2011. P. 319–330.
35. *Meng X., Cheng J., Guo H. et al.* Accuracy evaluation of the Landsat 9 land surface temperature product // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2022. V. 15. P. 8694–8703. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3212736.
36. *Pérez Díaz C. L., Lakhankar T., Romanov P. et al.* Evaluation of VIIRS land surface temperature using CREST-SAFE air, snow surface, and soil temperature data // *Geosciences*. 2015. V. 5. P. 334–360. DOI: 10.3390/geosciences5040334.
37. *Saunders R., Hocking J., Turner E. et al.* An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) // *Geoscientific Model Development*. 2018. V. 11. Iss. 7. P. 2717–2737. DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.
38. *Sobrino J., Jimenez-Munoz J., Soria G. et al.* Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 2. P. 316–327. DOI: 10.1109/TGRS.2007.904834.
39. *Taloor A. K., Mandas D. S., Kothiyari G. C.* Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data // *Applied Computing and Geosciences*. 2021. V. 9. Article 100051. 11 p. DOI: 10.1016/j.acags.2020.100051.
40. *Wang F., Qin Z., Song C. et al.* An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor data // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. No. 4. P. 4268–4289. DOI: 10.3390/rs70404268.
41. *Wang M., Zhang Z., Hu T., Liu X.* A practical single-channel algorithm for land surface temperature retrieval: Application to Landsat series data // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. V. 124. P. 299–316. DOI: 10.1029/2018JD029330.
42. *Wang M., He C., Zhang Z. et al.* Evaluation of three land surface temperature products from Landsat series using in situ measurements // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2023. V. 61. Article 5000119. 19 p. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3232624.
43. *Xu C., Qu J. J., Hao X. et al.* Surface soil temperature seasonal variation estimation in a forested area using combined satellite observations and in-situ measurements // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. V. 91. Article 102156. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102156.
44. *Xu C., Liao S., Huang L., Xia J.* Soil temperature estimation at different depths over the central Tibetan Plateau integrating multiple Digital Earth observations and geo-computing // *Intern. J. Digital Earth*. 2023. V. 16. P. 4023–4043. DOI: 10.1080/17538947.2023.2264267.

## Validation of land surface temperature values calculated from TIRS/Landsat-8 radiometer data and their use for temperature regime analysis of irrigated and post-irrigated soils of Chui intermountain basin (Altai Republic)

E. A. Mamash<sup>1</sup>, I. A. Pestunov<sup>1,3</sup>, S. Ya. Kudryashova<sup>2</sup>, A. S. Chumbaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center for Information and Computational Technologies  
Novosibirsk 630090, Russia

E-mails: elenamamash@gmail.com, pestunov@ict.nsc.ru

<sup>2</sup> Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia  
E-mails: sya55@mail.ru, chumbaev@issa-siberia.ru

<sup>3</sup> Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia

This work is devoted to the validation of land surface temperature (LST) values calculated using various LST restoring algorithms based on the TIRS/Landsat-8 radiometer data by comparing them with the ground-based measurements. A modification of an existing LST calculation algorithm is proposed with the help of an alternative method of emission coefficient calculation. It is shown that the proposed algorithm provides the best agreement with the ground-based measurements. Analysis of the long-term dynamics of the temperature regime has been performed for irrigated and post-irrigated soils of the Chui intermountain basin (Altai Republic) using the Landsat data and the proposed modification of the algorithm. Cartograms of the LST values distribution have been developed for key areas of the Chui basin using the multi-temporal Landsat images since 1989 till 2022. A significant correlation has been revealed between the LST values and the values of the normalized difference moisture index (NDMI), and the normalized difference vegetation index (NDVI) for the studied irrigated areas of the Chui basin. The maximum values of the correlation coefficients are 0.87 for the NDMI moisture index, as well as for the NDVI vegetation index, and fall in the period when the irrigation systems operate at full capacity. It is revealed that if the irrigation systems operate, this leads to a significant change in distribution of the LST values both for the entire basin of Chui and for the key areas of the irrigation zone.

**Keywords:** validation, land surface temperature, LST, Landsat, soil temperature regime, irrigation systems, Chui intermountain basin

Accepted: 21.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-9-25

### References

1. Varentsov M. I., Grischenko M. Yu., Konstantinov P. I., Comparison between in situ and satellite multiscale temperature data for Russian Arctic cities for winter season, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No. 2, pp. 64–76 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961421020093.
2. Volobuev V. R., *Vvedenie v energetiku pochvoobrazovaniya* (Introduction to the energetics of soil formation), Moscow: Nauka, 1974, 128 p. (in Russian).
3. Voropai N. N., Istomina E. A., Vasilenko O. V., Investigation of temperature field of land surface of Tunkinskaya bolson using Landsat space images, *Optika Atmosfery i Okeana*, 2011, V. 24, No. 1, pp. 67–73 (in Russian).
4. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. et al., Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 3, pp. 51–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66.
5. Grischchenko M. Yu., Mikhaylyukova P. G., Comparing ground-based and satellite data to study the spatial variability of the natural area's thermal field (case of Kunashir island, Great Kuril ridge, Sakhalin oblast, RF), *Geodesy and Cartography*, 2022, V. 83, No. 3, pp. 35–43 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2022-981-3-35-43.
6. Istomina E. A., Vasilenko O. V., Analysis of the temperature field of landscapes of the Tunka Basin using Landsat satellite images and ground data, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2015, No. 4, pp. 162–170 (in Russian).

7. Krechetova I. M., Medvedeva L. N., Development of land reclamation for forage production in the Altai Republic, *Oroshaemoe zemledelie*, 2020, No. 3, pp. 33–36 (in Russian), DOI: 10.35809/2618-8279-2020-3-6.
8. Mamash E. A., Pestunov I. A., Sinyavskiy Yu. N., Analysis of patterns in the distribution of the temperature fields for large industrial cities of Siberia according to Landsat-8 data, *Computational Technologies*, 2022, V. 27, No. 3, pp. 95–111 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.008.
9. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspensky A. B. et al., Using remote sensing data in modeling water and thermal regimes of rural areas, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 108–136 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
10. Ponomareva T. V., Ponomarev E. I., Litvintsev K. Y. et al., Thermal state of disturbed soils in the permafrost zone of Siberia according the remote data and numerical simulation, *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2022, V. 14, No. 3, pp. 16–35 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.003.
11. Trinh L. H., Zablotskii V. R., Dao K. H., A study of the long-term dynamics of soil moisture in the Bac Binh district (Binh Thuan province, Vietnam) using Landsat multispectral images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 7, pp. 89–101 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-89-101.
12. Chichulin A. V., The possibility of physico-theoretical methods in soil ecology (the case of modeling soil-climatic areas structure), *The J. Soils and Environment*, 2023, V. 6, No. 4, pp. 229–248 (in Russian), DOI: 10.31251/pos.v6i4.229.
13. Anderson M. C., Allen R. G., Morse A., Kustas W. P., Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources, *Remote Sensing of Environment*, 2012, V. 122, pp. 50–65, DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.025.
14. Berk A., Conforti P., Kennett R. et al., MODTRAN6®: A major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code, *Proc. 6<sup>th</sup> Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, 2014, DOI: 10.1109/WHISPERS.2014.8077573.
15. Bhattacharya S., Halder S., Nag S. et al., Assessment of drought using multi-parameter indices, In: *Advances in Water Resources Management for Sustainable Use*, Singapore: Springer, 2021, pp. 243–255, DOI: 10.1007/978-981-33-6412-7\_18.
16. Bogdan E., Kamalova R., Suleymanov A. et al., Changing climatic indicators and mapping of soil temperature using Landsat data in the Yangan-Tau UNESCO global geopark, *SOCAR Proc.*, 2022, pp. 32–41, DOI: 10.5510/OGP2022SI200768.
17. Brabyn L., Zavar-Reza P., Stichbury G. et al., Accuracy assessment of land surface temperature retrievals from Landsat 7 ETM+ in the Dry Valleys of Antarctica using iButton temperature loggers and weather station data, *Environmental Monitoring Assessment*, 2014, V. 186, pp. 2619–2628, DOI: 10.1007/s10661-013-3565-9.
18. Cook M., Schott J. R., Mandel J., Raqueno N., Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a Land Surface Temperature (LST) product from the archive, *Remote Sensing*, 2014, V. 6, No. 11, pp. 11244–11266, DOI: 10.3390/rs6111244.
19. Dash P., Götsche F., Olesen F., Fischer H., Separating surface emissivity and temperature using two-channel spectral indices and emissivity composites and comparison with a vegetation fraction method, *Remote Sensing of Environment*, 2005, V. 96, pp. 1–17, DOI: 10.1016/j.rse.2004.12.023.
20. Davies P., Gather U., The identification of multiple outliers, *J. American Statistical Association*, 1993, V. 88, No. 423, pp. 782–792, <https://doi.org/10.2307/2290763>.
21. Duguay-Tetzlaff A., Bento V. A., Götsche F. M. et al., Meteosat land surface temperature climate data record: achievable accuracy and potential uncertainties, *Remote Sensing*, 2015, V. 7, No. 10, pp. 13139–13156, DOI: 10.3390/rs71013139.
22. Dyba K., Ermida S., Ptak M. et al., Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 15, Article 3839, 21 p., DOI: 10.3390/rs14153839.
23. Ermida S., Soares P., Mantas V. et al., Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 9, Article 1471, 21 p., DOI: 10.3390/rs12091471.
24. Galve J. M., Sánchez J. M., García-Santos V. et al., Assessment of land surface temperature estimates from Landsat 8-TIRS in a high-contrast semiarid agroecosystem: Algorithms intercomparison, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 8, Article 1843, 22 p., DOI: 10.3390/rs14081843.
25. Ghasempour F., Sekertekin A., Kutoglu H., How Landsat 9 is superior to Landsat 8: comparative assessment of land use land cover classification and land surface temperature, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, V. X-4/W1-2022, pp. 221–227, DOI: 10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-221-2023.
26. Hulley G., Hook S., Abbott E. et al., The ASTER Global Emissivity Database (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 meter spatial resolution, *Geophysical Research Letters*, 2015, V. 42, pp. 7966–7976, DOI: 10.1002/2015GL065564.



27. Jiménez-Muñoz J., Sobrino J., Plaza A. et al., Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area, *Sensors*, 2009, V. 9, pp. 768–793, DOI: org/10.3390/s90200768.
28. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Skoković D. et al., Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, V. 11, No. 10, pp. 1840–1843, DOI: 10.1109/LGRS.2014.2312032.
29. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. American Meteorological Soc. (BAMS)*, 1996, V. 77, Iss. 3, pp. 437–471, DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
30. Koenig L., Hall D., Comparison of satellite, thermochron and air temperatures at Summit, Greenland, during the winter of 2008/09, *J. Glaciology*, 2010, V. 56, Iss. 198, pp. 735–741, DOI: org/10.3189/002214310793146269.
31. Li Z.-L., Tang B.-H., Wu H. et al. (2013a), Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 2013, V. 13, pp. 14–37, DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
32. Li Z.-L., Wu H., Wang N. et al. (2013b), Land surface emissivity retrieval from satellite data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2013, V. 34, pp. 3084–3127, DOI: org/10.1080/01431161.2012.716540.
33. Malakar N., Hulley G., Hook S. et al., An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: methodology and validation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2018, V. 56, No. 10, pp. 5717–5735, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2824828.
34. McCarville D., Buenemann M., Bleiweiss M., Barsi J., Atmospheric correction of Landsat thermal infrared data: A calculator based on North American Regional Reanalysis (NARR) data, *American Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing Annu. Conf.*, 2011, pp. 319–330.
35. Meng X., Cheng J., Guo H. et al., Accuracy evaluation of the Landsat 9 land surface temperature product, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, V. 15, pp. 8694–8703, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3212736.
36. Pérez Díaz C. L., Lakhankar T., Romanov P. et al., Evaluation of VIIRS land surface temperature using CREST-SAFE air, snow surface, and soil temperature data, *Geosciences*, 2015, V. 5, pp. 334–360, DOI: 10.3390/geosciences5040334.
37. Saunders R., Hocking J., Turner E. et al., An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12), *Geoscientific Model Development*, 2018, V. 11, Iss. 7, pp. 2717–2737, DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.
38. Sobrino J., Jimenez-Munoz J., Soria G. et al., Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, V. 46, No. 2, pp. 316–327, DOI: 10.1109/TGRS.2007.904834.
39. Taloor A. K., Mandas D. S., Kothiyari G. C., Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data, *Applied Computing and Geosciences*, 2021, V. 9, Article 100051, 11 p., DOI: 10.1016/j.acags.2020.100051.
40. Wang F., Qin Z., Song C. et al., An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor data, *Remote Sensing*, 2015, V. 7, No. 4, pp. 4268–4289, DOI: 10.3390/rs70404268.
41. Wang M., Zhang Z., Hu T., Liu X., A practical single-channel algorithm for land surface temperature retrieval: Application to Landsat series data, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, V. 12, pp. 299–316, DOI: 10.1029/2018JD029330.
42. Wang M., He C., Zhang Z. et al., Evaluation of three land surface temperature products from Landsat series using in situ measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2023, V. 61, Article 5000119, 19 p., DOI: 10.1109/TGRS.2022.3232624.
43. Xu C., Qu J. J., Hao X. et al., Surface soil temperature seasonal variation estimation in a forested area using combined satellite observations and in-situ measurements, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, V. 91, Article 102156, DOI: 10.1016/j.jag.2020.102156.
44. Xu C., Liao S., Huang L., Xia J., Soil temperature estimation at different depths over the central Tibetan Plateau integrating multiple Digital Earth observations and geo-computing, *Intern. J. Digital Earth*, 2023, V. 16, pp. 4023–4043, DOI: 10.1080/17538947.2023.2264267.