

УДК 912.43

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЩЕПЛЁННОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ  
ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ  
МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ****<sup>1</sup>Зареи С.А., <sup>2</sup>Насири А.М., <sup>1</sup>Щербаков В.М., <sup>3</sup>Широкова В.А.**<sup>1</sup>СПбГУ «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург,  
*e-mail: zareie\_sajad@yahoo.com, vs1670@yandex.ru;*<sup>2</sup>ГУЗ «Государственный университет по землеустройству», Москва, *e-mail: abuzarnasiri@gmail.com;*<sup>3</sup>Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва,  
*e-mail: shirocova@gmail.com*

С помощью теплового дистанционного зондирования может быть выполнено картографирование распределения температуры земной поверхности (ТЗП). Вычисление значений ТЗП с использованием методов дистанционного зондирования является важным вопросом в метеорологических и климатологических исследованиях. В данной статье рассмотрен вопрос применения данных тепловой съёмки Landsat-8 для расчёта ТЗП на аридных территориях с использованием алгоритма расщеплённого окна прозрачности. В качестве тестовой территории использован полигон, расположенный в провинции Хузестан (Иран, в пределах сцены p165 r38). В качестве вспомогательных данных использованы нормализованный разностный вегетационный индекс, фракционный коэффициент растительного покрова. Результаты расчётов ТЗП были оценены с использованием температурных данных, измеренных на метеорологических станциях, расположенных на исследуемой территории. В результате проведённых оценок средняя квадратическая ошибка в контрольных точках не превысила 2 °С. Результаты исследования показали, что алгоритм расщеплённого окна прозрачности может быть использован при решении ряда научных и производственных задач на аридных территориях.

**Ключевые слова:** Landsat-8, тепловая съёмка, алгоритм расщепленного окна прозрачности**SPLIT WINDOW ALGORITHM APPLIED TO LAND SURFACE TEMPERATURE  
(LST) COMPUTATION BASING ON THERMAL SATELLITE IMAGERY****<sup>1</sup>Zareie S.A., <sup>2</sup>Nasiri A.M., <sup>1</sup>Scherbakov V.M., <sup>3</sup>Shirokova V.A.**<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, *e-mail: zareie\_sajad@yahoo.com, vs1670@yandex.ru;*<sup>2</sup>State University of Land Use Planning, Moscow, *e-mail: abuzarnasiri@gmail.com;*<sup>3</sup>S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, *e-mail: shirocova@gmail.com*

Using thermal remote sensing can perform mapping of spatial distribution of the land surface temperature (LST). Estimation of the LST on the basis of remote sensing data is an important issue in meteorological and climatological studies. This article describes application of Landsat-8 thermal imagery to LST estimation in arid areas using split window algorithm. Khuzestan province (Iran, within the scene p165 r38) was selected as ground test area. Normalized Difference Vegetation Index and Fractional Vegetation Cover were used as algorithm supporting datasets. The results of LST estimation were assessed using temperature data measured at meteorological stations located in the study area. In the result of accuracy assessment, root mean square error at the control points did not exceed 2 °C. Study results show that the split window algorithm can be used to solve of scientific and industrial tasks in arid areas.

**Keywords:** Landsat-8, thermal remote sensing, split window algorithm

С использованием теплового инфракрасного излучения, отражаемого и излучаемого земной поверхностью, можно оценить температуру земной поверхности (ТЗП), которая является важным параметром при оценке биологических, химических и физических процессов. Данные о температуре поверхности используются в моделировании глобальных изменений климата, городском землепользовании, гидрологических, метеорологических, биогеохимических, экологических, сельскохозяйственных исследованиях и др. [1]. Важность изучения ТЗП состоит в том, что многие изменения

в географической оболочке обусловлены изменениями температуры.

Тепловое дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет производить расчётную оценку температуры поверхности, для чего может быть использован ряд методов, различающихся в том числе по точности оценки. Вместе с тем тепловое ДЗЗ обеспечивает уникальную возможность получения данных о ТЗП в региональном и глобальном масштабах с достаточно высоким временным и пространственным разрешением, в том числе данных о временной и пространственной динамике поверхности [2].

Аппарат Landsat-8 оснащён двумя сканирующими радиометрами (OLI и TIRS), первый из которых собирает данные с пространственным разрешением 15 (панхроматический канал) и 30 метров в девяти спектральных каналах в видимой, ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной областях электромагнитного спектра, а второй – данные в двух каналах теплового инфракрасного диапазона (канал 10, 10,6–11,2 мкм и канал 11, 11,5–12,5 мкм). Наличие двух тепловых каналов, регистрируемых с пространственным разрешением 100 м, позволяет реализовать один из алгоритмов оценки ТЗП, называемый алгоритм расщепленного окна прозрачности, который характеризуется в публикациях как сравнительно высокоточный [5].

### Материалы и методы исследования

Восточная часть провинции Хузестан на юго-западе Ирана (30°40'54"–32°47'25" с.ш., 48°08'03"–50°32'47" в.д.), выбранная в качестве тестового полигона для проведения исследования, относится к аридным регионам. Территория характеризуется высокими суточными и сезонными изменениями температуры и высокими значениями температуры весной и летом, которые являются ключевым фактором формирования растительного покрова в регионе [3]. Район исследования перекрывается сценой p165 r38 съёмки Landsat-8 (рис. 1).

Реализация алгоритма расщепленного окна прозрачности подразумевает выполнение радиометрической и атмосферной коррекции, которые были выполнены в пакете ENVI 5.1, и выполнение подготовительных

процедур, таких как расчет радиационной температуры на основе тепловых каналов и расчёт излучательной способности земной поверхности для тепловых каналов на основе красного и ближнего инфракрасного спектральных каналов (рис. 2).

Поскольку, как и в других подобных алгоритмах, радиационная температура вычисляется с использованием идеальной модели (абсолютно черного тела), необходима коррекция полученных значений с учётом характера изучаемой поверхности. В соответствии с алгоритмом расщепленного окна прозрачности, ТЗП вычисляется с использованием уравнения, связывающего значения радиационных температур  $BT$ , вычисленных по данным двух соседних тепловых каналов и значений излучательной способности земной поверхности, вычисленной для этих каналов [5]:

$$TЗП = BT_{10} + C_1(BT_{10} - BT_{11}) + C_2(BT_{10} - BT_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4W) \times (1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6W)\Delta\varepsilon, \quad (1)$$

где  $W$  – содержание водяного пара в атмосфере  $0,053 \text{ г} \times \text{см}^{-2}$  (содержание водяного пара в атмосфере рассчитано с использованием модели атмосферы MODTRAN),  $\varepsilon = (\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11})/2$ ,  $\varepsilon_{10}$  и  $\varepsilon_{11}$  – растры излучательной способности земной поверхности, полученные по каналам 10 и 11,  $BT_{10}$  и  $BT_{11}$  – радиационные температуры каналов 10 и 11, измеряемые в кельвинах,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{11}$ . Коэффициенты уравнения:  $C_0 = -0,268$ ,  $C_1 = 1,378$ ,  $C_2 = 0,183$ ,  $C_3 = 54,300$ ,  $C_4 = -2,238$ ,  $C_5 = -129,200$ ,  $C_6 = 16,400$ .

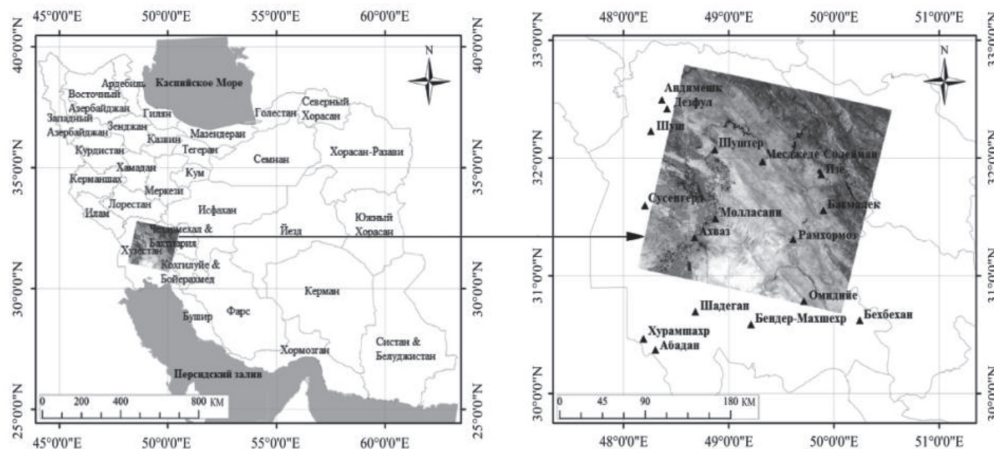


Рис. 1. Географическое положение исследуемой территории

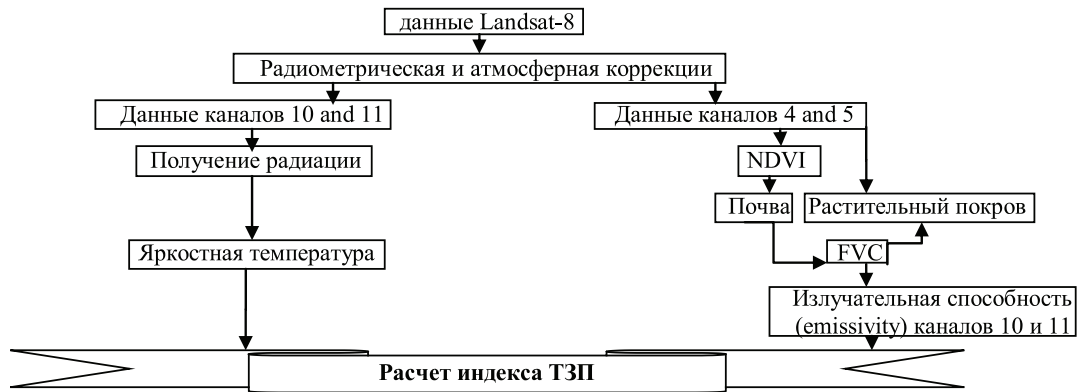


Рис. 2. Алгоритм расчета ТЗП

Данное уравнение (1) основано на математических построениях [5] и применяется при обработке данных, получаемых с различных сенсоров. Его можно использовать для исследований, в том числе аридных территорий. Коэффициенты уравнения вычисляются статистическими методами, используемыми при моделировании базы данных. При моделировании учитываются характеристики атмосферы в момент зондирования (применяются модельные расчёты MODTRAN).

Значения радиационной температуры (температуры абсолютно черного тела) вычисляются на основе значений спектральной яркости [7]:

$$BT = \frac{K_2}{\ln[(K_1 / L_\lambda) + 1]}, \quad (2)$$

где  $K_1$  (774,89 для канала 10 и 480,89 для канала 11) и  $K_2$  (1321,08 для канала 10 и 1201,14 для канала 11) – калибровочные коэффициенты, обычно указываемые в метаданных снимков,  $L_\lambda$  – спектральная яркость измеряемая в Вт/(м<sup>2</sup>×ср×мкм).

Спектральная яркость – это значение суммарной энергии, регистрируемой спутниковым датчиком. Преобразование целочисленных значений каналов снимка в значения спектральной яркости для Landsat-8 выполняется следующим образом [7]:

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L, \quad (3)$$

где  $M_L$  (0,000342 для 10 и 11 каналов) и  $A_L$  (0,1 для 10 и 11 каналов) – калибровочные коэффициенты, обычно указываемые в метаданных снимков,  $Q_{cal}$  – целочисленные значения каналов снимка.

Излучательная способность земной поверхности (Land Surface Emissivity) – это коэффициент, показывающий отношение (спектральной) яркости земной поверхно-

сти к (спектральной) яркости абсолютно чёрного тела. Основными методами расчета излучательной способности являются: метод на основе классификации [4], метод на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI [6] и метод на основе независимых спектральных индексов дневной и ночной температуры [8].

Почвенный и растительный покров различаются по излучательной способности, в том числе в зависимости от пропорционального отношения площадей открытой почвы и сомкнутой растительности. Излучательная способность земной поверхности может быть оценена на основе номинальных значений излучательной способности растительности и почвы, и фракционного коэффициента растительного покрова FVC (Fractional Vegetation Cover), по следующей формуле [7]:

$$\varepsilon = \varepsilon_s * (1 - FVC) + \varepsilon_v * FVC, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_s$  (0,971 для канала 10 и 0,977 для канала 11) и  $\varepsilon_v$  (0,987 для канала 10 и 0,989 для канала 11) – излучательные способности растительности и почвы соответственно, FVC – фракционный коэффициент растительного покрова.

FVC показывает пропорциональное соотношение площадей различных типов растительного покрова в каждой ячейке снимка, в данном случае, соотношение площадей оголённого почвенного покрова и растительного покрова. Оценка выполняется с учётом значений NDVI для оголённой почвы и плотного растительного покрова по следующей формуле [7]:

$$FVC = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s), \quad (5)$$

где  $NDVI_s$  – NDVI оголённой почвы (0,2) и  $NDVI_v$  – NDVI плотной растительности (0,8).

Методы на основе классификации и независимых спектральных индексов дневной и ночной температуры ограничены рядом дополнительных требований, в связи с чем в данном исследовании использован метод на основе *NDVI*. Индекс вычислялся на основе значений спектральной яркости красного (*RED*) и ближнего инфракрасного (*NIR*) каналов снимка, к которым была применена атмосферная коррекция, по стандартной формуле [7]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED). \quad (6)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Вычисление ТЗП и построение карт ТЗП (рис. 3) с использованием снимков Landsat-8 были автоматизированы в ArcGIS. В табл. 2 показаны температуры поверхности, рассчитанные в контрольных точках.

Оценка точности полученных результатов выполнена с использованием данных о приземной температуре воздуха, собранных на метеорологических станциях, расположенных на исследуемой территории. Данные получены из метеорологического бюро провинции Хузестан. В табл. 1 представлены координаты использованных станций (рис. 1).

В качестве параметров оценки точности использованы средние квадратические ошибки (СКО) и коэффициенты детерминации ( $R^2$ ), рассчитанные для результатов оценки ТЗП по данным Landsat-8 (табл. 2).

Использованные в работе снимки подобраны с учётом доступности наземных метеорологических данных. Использованы среднесуточные значения приземной температуры воздуха, зафиксированные на метеорологических станциях. При определении значений температуры по данным Landsat-8 использовались значения ТЗП, зафиксированные в пикселях снимка, соответствующих с положением метеостанций. Интерполяция по соседним пикселям не применялась.

Результаты оценки точности, представленные в табл. 2 демонстрируют значения СКО в пределах  $2^\circ\text{C}$  и значения  $R^2$  не ниже 0,841. Другими словами, значения ТЗП, определённые по спутниковым данным, имеют хорошую сходимость с фактическими значениями среднесуточной приземной температуры воздуха, определёнными в результате наземных измерений. Полученные расхождения между фактическими и расчетными температурами являются приемлемыми для многих предметных областей.

Таблица 1

Координаты метеорологических станций на исследуемой территории

Метеостанция	Широта	Долгота
Ахваз	$31^\circ 20' 40,48''$ с.ш.	$48^\circ 44' 38,14''$ в.д.
Шуштер	$32^\circ 04' 16,79''$ с.ш.	$48^\circ 52' 05,27''$ в.д.
Месджеде-Солейман	$31^\circ 58' 15,28''$ с.ш.	$49^\circ 19' 16,14''$ в.д.
Изе	$31^\circ 51' 40,46''$ с.ш.	$49^\circ 52' 46,38''$ в.д.
Молласани	$31^\circ 29' 08,38''$ с.ш.	$48^\circ 52' 26,36''$ в.д.
Рамхормоз	$31^\circ 18' 38,52''$ с.ш.	$49^\circ 36' 47,63''$ в.д.
Багмалек	$31^\circ 33' 24,55''$ с.ш.	$49^\circ 53' 57,55''$ в.д.

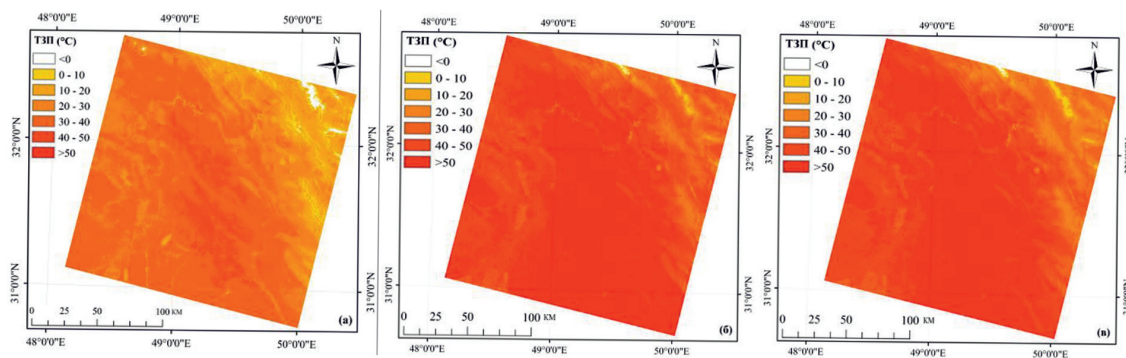


Рис. 3. Карты температуры земной поверхности за (а) 18.05.2013, (б) 21.05.2014 и (в) 24.05.2015



**Таблица 2**

Температуры (°C), вычисленные на основе данных Landsat-8 и полученные в результате наблюдений на метеорологических станциях

Ключевые точки	Ахваз	Шуштер	Межде-Сoleyман	Изе	Молласани	Рамхормоз	Багмалек	СКО	R <sup>2</sup>
Радиационная температура канала 10 (BT <sub>10</sub> ) 18.05.2013	31,96	37,02	34,81	26,92	25,84	38,73	30,45	–	–
Радиационная температура канала 11 (BT <sub>11</sub> ) 18.05.2013	32,13	37,19	34,97	27,23	26,11	38,89	3,64	–	–
Температура по данным Landsat-8 18.05.2013	31,13	36,63	34,10	26,47	25,45	38,12	29,95	1,86	0,841
Температура по данным метеостанций 18.05.2013	33,00	34,50	34,00	26,50	29,00	36,50	29,00	–	–
Радиационная температура канала 10 (BT <sub>10</sub> ) 21.05.2014	35,73	38,39	47,13	39,65	34,21	48,79	45,53	–	–
Радиационная температура канала 11 (BT <sub>11</sub> ) 21.05.2014	35,90	38,61	47,29	39,79	34,37	48,93	45,71	–	–
Температура по данным Landsat-8 21.05.2014	35,27	37,94	46,82	39,17	33,82	48,48	45,15	1,61	0,978
Температура по данным метеостанций 21.05.2014	34,00	36,50	43,50	38,50	33,00	47,50	44,00	–	–
Радиационная температура канала 10 (BT <sub>10</sub> ) 24.05.2015	34,84	42,73	42,42	36,80	38,28	46,43	39,24	–	–
Радиационная температура канала 11 (BT <sub>11</sub> ) 24.05.2015	34,98	42,89	42,67	37,05	38,46	46,65	39,40	–	–
Температура по данным Landsat-8 24.05.2015	34,59	42,39	42,18	36,57	37,98	46,09	38,91	1,39	0,991
Температура по данным метеостанций 24.05.2015	33,00	33,00	40,50	35,50	36,00	45,50	37,50	–	–

В соответствии с построенными картами ТЗП, температуры ниже 0°C фиксируются только для снежного покрова в горах Загрос. В остальных случаях, для водных массивов, растительного покрова и открытых грунтовых поверхностей температуры положительны, что характерно для данного региона.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность проведения оценки температуры земной поверхности (либо приземной температуры воздуха, если требуется её приближенная оценка) в аридных районах с достаточно высокой точностью. Вместе с тем, учёт различий излучательной способности большего числа типов земной поверхности, таких как водные объекты, ледники, различные типы растительности и почвы, вероятно, мог бы усовершенствовать применённый метод.

### Заключение

В рамках данного исследования выполнены расчет ТЗП и построение карт ТЗП на

основе данных тепловой съёмки Landsat-8 с использованием алгоритма расщепленного окна прозрачности, а также оценка точности полученных результатов с использованием данных наземных наблюдений на метеорологических станциях. Для повышения точности оценки ТЗП по материалам спутниковой тепловой съёмки в использованном алгоритме применено вычисление значений излучательной способности земной поверхности для двух характерных для исследуемого региона типов покрова, растительности и оголённых почв. Результаты исследования показывают достаточно высокую сходимость оценок ТЗП по данным спутниковой съёмки с данными наземных измерений приземной температуры воздуха, зафиксированными на метеорологических станциях.

Таким образом, рассмотренные в работе алгоритм и данные могут быть в дальнейшем использованы для проведения оценки и мониторинга ТЗП на исследуемой территории (юго-запад Ирана, восточная часть

провинции Хузестан). Вероятно, точность применённого алгоритма может быть повышена за счёт более диверсифицированной оценки излучательной способности различных типов земной поверхности, и включения других типов поверхности помимо растительного покрова и открытых грунтов. Аналогичная диверсификация, вероятно, необходима в случае применения алгоритма для изучения ландшафтов других типов, так как исследованные в работе аридные ландшафты, в целом характеризуются достаточно высокой однородностью покрова. Будущие исследования должны быть направлены в том числе на дальнейшее повышение точности оценок ТЗП.

#### Список литературы

1. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data // *Journal of Sensors*. – 2016. – Vol. 2016. Article ID 1480307. 8 p. doi:10.1155/2016/1480307.
2. Dash P., Gottsche F.M., Olesen F.S., Fischer H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends // *International Journal of Remote Sensing*. – 2002. – Vol. 23. – № 13. – P. 2563–2594.
3. Dehghan A.A. Status and potentials of renewable energies in Yazd Province-Iran // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15. – Issue 3. – P. 1491–1496.
4. Gillespie A., Rokugawa S., Matsunaga T., Cothren J.S., Hook S., Kahle A.B. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1998. – Vol. 36. Issue 4. – P. 1113–1126.
5. Jmenez-Munoz J.C., Sobrino J.A., Skokovic D., Matarr C., Cristobal J. Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data // *IEEE geosciences and remote sensing letters*. – 2014. – Vol. 11. – Issue 10. – P. 1840–1843.
6. Momeni M., Saradjian M. Evaluating NDVI-based emissivities of MODIS bands 31 and 32 using emissivities derived by day/night LST algorithm // *Remote Sensing of Environment*. – 2007. – Vol. 106. – Issue 2. – P. 190–198.
7. Rajeshwari A., Mani N.D. Estimation of Land Surface Temperature of Dindigul District Using Landsat 8 Data // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. – 2014. – Vol. 3. – Issue 5. – P. 122–126.
8. 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 Sensing*. – 2014. – Vol. 6. – P. 9829–9852.