

УДК 912.4:004.4

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКА И ОКРЕСТНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ LANDSAT-8

Матушко А.К., Якубайлик О.Э.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru, oleg@icm.krasn.ru

Настоящая работа посвящена анализу температурных аномалий в городе Красноярске и его окрестностях («городские острова тепла»), которые оценивались по спутниковым данным Landsat-8 теплового инфракрасного диапазона и наземным данным с автоматизированных постов наблюдения за атмосферой. Актуальность исследования обусловлена крайне неблагоприятной экологической обстановкой в городе, сложностью оценки метеорологических характеристик территории из-за значительной неравномерности рельефа, температурным режимом разрезающей город пополам реки Енисей, который обусловлен расположенной в 40 км от города Красноярской ГЭС. Задача состояла в выявлении характерных температурных неоднородностей в городе, их пространственного местоположения и количественной оценке. Всего было рассмотрено 10 безоблачных сцен Landsat-8 на территорию Красноярска и окрестностей, в бесснежный период с 2013 по 2016 гг. Вычисления проводились на основе данных радиометра TIRS (10-й канал – ИК-диапазон 10,3–11,3 мкм). Данные каналов видимого диапазона 4-3-2 (красный-зеленый-синий), регистрируемые радиометром OLI Landsat-8, использовались для классификации изображений, определения типа подстилающей поверхности. Была выполнена обработка спутниковых данных, в том числе – классификация изображения, определение коэффициентов эмиссии для различных участков городской территории, вычисление температуры поверхности. Также был проведен сравнительный анализ полученных данных с измерениями на метеостанциях. Было обнаружено, что температура, измеренная разными способами, имеет сопоставимые значения. По результатам исследования были сформированы сезонные тепловые аномалии городской территории для трех сезонов – лета, весны и осени. Было выделено несколько сезонных тепловых аномальных зон разного типа – природные возвышенности, территории около нескольких крупных торгово-развлекательных центров, промышленные зоны ряда предприятий, участки теплового загрязнения сточными водами.

Ключевые слова: городской остров тепла, тепловые космические снимки, Landsat, температурные аномалии, температура поверхности Земли

MONITORING OF LAND SURFACE TEMPERATURE IN KRASNOYARSK AND ITS SUBURBAN AREA BASED ON LANDSAT-8 SATELLITE DATA

Matuzko A.K., Yakubaylik O.E.

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru, oleg@icm.krasn.ru

The subject of the analysis in this paper were temperature anomalies in the city of Krasnoyarsk and its surroundings («Urban Heat Islands»), which were estimated from satellite data Landsat-8 thermal infrared and ground data from automated observation posts for the atmosphere. The relevance of the study is due to the extremely unfavorable environmental situation in the city. The task was to identify characteristic temperature inhomogeneities in the city, their spatial location and quantitative assessment. In total, 10 cloudless Landsat-8 scenes were examined on the territory of Krasnoyarsk and its environs during the snowless period from 2013 to 2016. The calculations were based on the data of the TIRS radiometer (10th channel – IR range of 10.3–11.3 μm). The data of the channels of the visible range 4-3-2 (red-green-blue), registered by the OLI Landsat-8 radiometer, were used to classify the images, to determine the type of underlying surface. Satellite data processing was performed. Also, a comparative analysis of the data obtained with measurements at weather stations was carried out. It was found that the temperature measured in different ways has comparable values. According to the results of the study were formed seasonal thermal anomalies of the urban area. Several seasonal thermal anomalous zones of different types such as natural elevations, territories of about several large shopping and entertainment centers, industrial zones of a number of enterprises, sites of thermal pollution by sewage were singled out.

Keywords: urban heat island, thermal infrared imagery, Landsat, temperature anomalies, land surface temperature

Температура – один из ключевых показателей окружающей природной среды – может быть измерена наземными методами или на основе спутниковых данных. Методы дистанционного зондирования обеспечивают получение данных о температуре на регулярной сетке с высоким пространственным разрешением, с несопоставимо большей детальностью по сравнению с данными нескольких нерегулярно расположен-

ных в городе метеостанций официальных служб.

Первые изображения Земли из космоса в тепловом инфракрасном диапазоне были получены американскими метеорологическими спутниками в 1960-е гг. Несмотря на то, что эти спутниковые данные имели низкое пространственное разрешение и практическое применение, они показали принципиальную возможность решения целого

ряда задач в области исследований окружающей среды методами дистанционного зондирования [1].

В настоящее время одним из наиболее интересных спутников, который ведет регулярную съемку поверхности Земли в тепловом инфракрасном (ИК) диапазоне, является Landsat-8. Регистрируемые данные ИК-диапазона имеют высокое пространственное разрешение 100 метров на пиксел, а повторяемость съемки составляет 16 дней. Это означает, что для заданной исследуемой территории, за вычетом снимков с высоким процентом облачности, можно рассчитывать не менее чем на десяток «безоблачных» снимков в год.

В статье представлена методика мониторинга температуры поверхности Земли по данным 10-го канала Landsat-8. На основе этих спутниковых данных ниже будут рассмотрены методы оценки температуры поверхности Земли, проведен анализ полученных температурных аномалий в г. Красноярске и его окрестностях. Красноярск – город с населением более миллиона человек и крайне неблагоприятной экологической обстановкой, входящий в число самых загрязненных городов России. Анализ и моделирование загрязнения атмосферного воздуха осложняется рядом факторов – значительной неравномерностью рельефа в пределах города, температурным режимом разрезающей город пополам реки Енисей, который обусловлен расположенной в 40 км от города Красноярской ГЭС. Вода в Енисее не замерзает зимой даже при предельно низких зимних температурах -40°C и в то же время очень холодная в жаркие летние месяцы. В этом контексте методы дистанционного зондирования на основе данных ИК-диапазона приобретают особый интерес.

Обзор решения проблемы на мировом уровне

Оценка температуры земной поверхности по спутниковым данным выполняется с 1960-х гг. Для этого используются данные дистанционного зондирования теплового инфракрасного (ИК) диапазона, на основе которых вычисляется температура поверхности Земли. В частности, с 1970 г. функционируют спутники серии NOAA (США), на которых устанавливается сканирующий радиометр высокого разрешения AVHRR, измеряющий отражательную способность Земли в 5 спектральных диапазонах, в том числе в инфракрасном тепловом. Основное

назначение – мониторинг облачного покрова и измерение исходящего теплового излучения Земли [2].

Широко используются данные спектрорадиометра MODIS, установленного на американских спутниках Terra и Aqua. Он осуществляет ежедневную съемку с пространственным разрешением 1000 м в 36 спектральных каналах, среди которых – каналы теплового ИК-диапазона [3]. Температура поверхности Земли (LST – Land Surface Temperature) – один из стандартных информационных продуктов MODIS.

Американская программа Landsat начала свое существование в 1972 г., с этого времени было запущено восемь спутников. С момента запуска в 1982 г. Landsat-4 спутники этой программы осуществляют съемку в тепловом инфракрасном диапазоне [4].

Данные дистанционного зондирования теплового ИК-диапазона в настоящее время широко используются для изучения природных и антропогенных объектов и процессов, мониторинга неблагоприятных природных явлений, оценки состояния геосистем [5, 6].

Материалы и методы исследования

Температура поверхности Земли характеризует взаимодействие между атмосферой и поверхностью. Знание температуры поверхности Земли требуется для разнообразных научных исследований, включая климатологию, гидрологию и экологию. В частности, данные о температуре необходимы при решении таких задач, как оценка влажности почвы, обнаружение и прогноз заморозков, мониторинг состояния зерновых культур. Температура поверхности Земли является также одним из индикаторов антропогенного влияния на природные ресурсы [7]. Регулярный мониторинг температуры позволяет проанализировать температуру поверхности и оценить ее изменчивость.

Дистанционное зондирование – единственное средство получения долговременных однородных рядов данных о температуре регионального и глобального покрытия. Необходимость получения регулярных спутниковых данных о температуре земной поверхности диктуется тем, что сеть наземных наблюдений достаточно редкая.

По значениям тепловых каналов можно определить радиационную температуру поверхности. Теоретически точность оценки температуры около $0,5^{\circ}\text{C}$, однако дымка в атмосфере занижает значения на не-

сколько градусов. Исходными данными для определения температуры служат значения интенсивности излучения, пришедшего на сенсор спутника и зарегистрированного соответствующим тепловым каналом. На основе значений тепловых каналов вычисляется значение температуры поверхности Земли, используя формулу [2]:

$$T = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \frac{T_B}{c_2} \right) \ln(e)}, \quad (*)$$

T_B – температура спектральной яркости излучения (К); λ – длина волны света, $\lambda = 10,8 \text{ }\mu\text{m}$ для 10-го канала Landsat-8; $c_2 = h*c/s = 1,4388*10^{-2} \text{ m K}$; $c_2 = 14388 \text{ }\mu\text{m K}$; e – коэффициент эмиссии.

Значения коэффициентов e представлены в табл. 1, и они зависят от типа поверхности Земли (используемые значения являются ориентировочными, поскольку коэффициент излучения каждого материала должен быть получен из полевого обследования).

Термальный инфракрасный диапазон особенно полезен для определения разности температур между городом и прилегаю-

щими к нему сельскими районами и для изучения феномена городского острова тепла. Исходными данными для определения температуры земной поверхности Земли является архив спутниковых снимков Landsat-8. Программное обеспечение: QGIS 2.18.1 с плагином Semi-Automatic Classification Plugin (SACP) [8].

Результаты исследования и их обсуждение

Температура поверхности Земли вычисляется по формуле (*). Переводим полученные значения температуры в градусы Цельсия и на основе полученных значений, составляем температурную карту поверхности Земли в окрестностях города Красноярска (рис. 1).

Изображение показывает, что температура реки значительно ниже, чем температура поверхности земных территорий, хотя весной в естественной среде температура воды в реке обычно выше, чем температура воздуха. Строительство гидроэлектростанции возле Красноярска оказало большое влияние на распределение сезонных температур [9].

Таблица 1

Соответствие поверхности Земли и значение коэффициента эмиссии

Тип поверхности	Открытая почва	Трава/растительность	Строения	Вода
Значение e	0,928	0,982	0,942	0,98

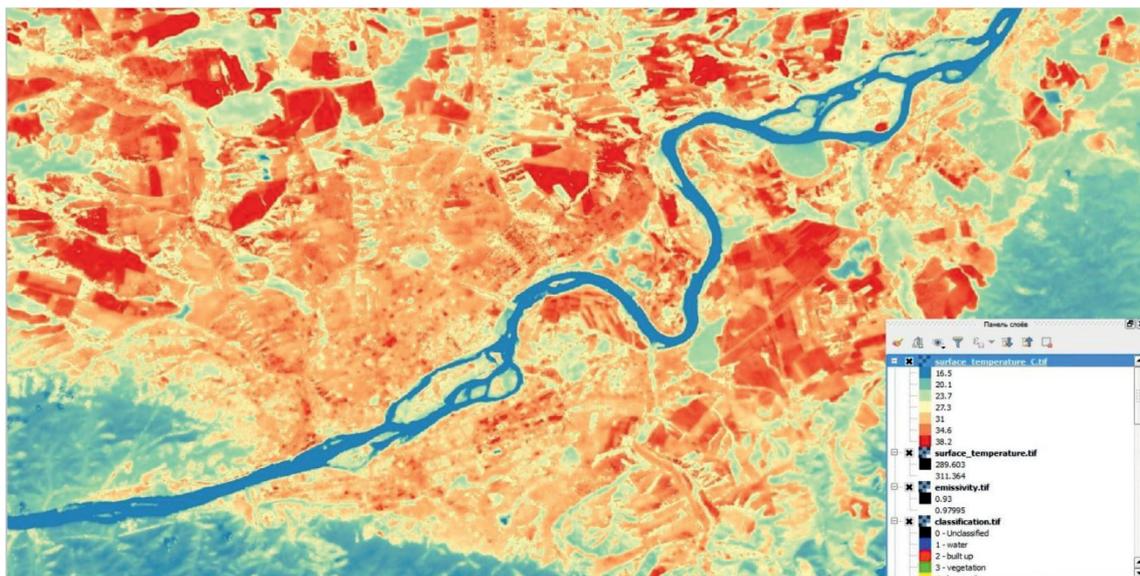


Рис. 1. Температура поверхности земли в г. Красноярске

Изменения теплового режима реки в результате строительства гидротехнических сооружений по сравнению с природными условиями влияют на работу не только самой гидроэлектростанции, но и объектов управления водными ресурсами, водного транспорта, а также качества воды и климата. Таким образом, ниже по течению от гидроэлектростанции, независимо от периода годового цикла, характерные изменения температуры воды происходят ниже по течению. А именно, температура воды в Енисее в районе города летом на 8–10 °С ниже, чем до регуляции реки, и, наоборот, увеличивается на 4–5 °С в осенние месяцы, что создало определенные трудности в развитии прилегающей территории и оказало значительное влияние на климат Красноярска [10].

Целью работы является сравнение результатов, полученных по спутниковым данным с наземными данными автоматических метеостанций (АМС). По описанной выше методике было обработано 10 спутниковых снимков, полученных в летне-осенний период за временной интервал с 2013 по 2016 гг. На основе данных, на спутниковых изображениях и от АМС составим сводную таблицу по трем контрольным точкам в городе. АМС на Дудинской, Минусинской и в Роевом Ручье.

По данным, представленным в табл. 2, составим диаграммы для каждой из исследуемых территорий отдельно. На диаграммах видно, что температура, полученная на основании космических снимков, чаще незначительно выше значений, которые были получены на АМС, чем ниже (рис. 2).

Таблица 2

Сравнение спутниковых данных и данных АМС

Дата	По данным АМС в 12 часов, °С			На снимке, °С		
	Дудинская 4	Минусинская 14	Роев Ручей	Дудинская 4	Минусинская 14	Роев Ручей
07.10.2016	5,4	3	0,4	7	3	2
05.09.2016	16,3	15	17,6	22	19	19
10.06.2016	25	23,4	26,1	33	25	28
23.04.2016	15,1	12,2	15,4	22	19	18
17.07.2015	24,6	23	26	34	24	29
01.07.2015	30,4	28	30,9	34	29	29
08.06.2015	24	22,6	24,9	30	25	27
14.05.2015	19,8	18,5	21,7	25	24	27
07.07.2014	29,1	27,3	30,3	32	27	31
18.06.2013	29,9	27	21,1	33	34	21

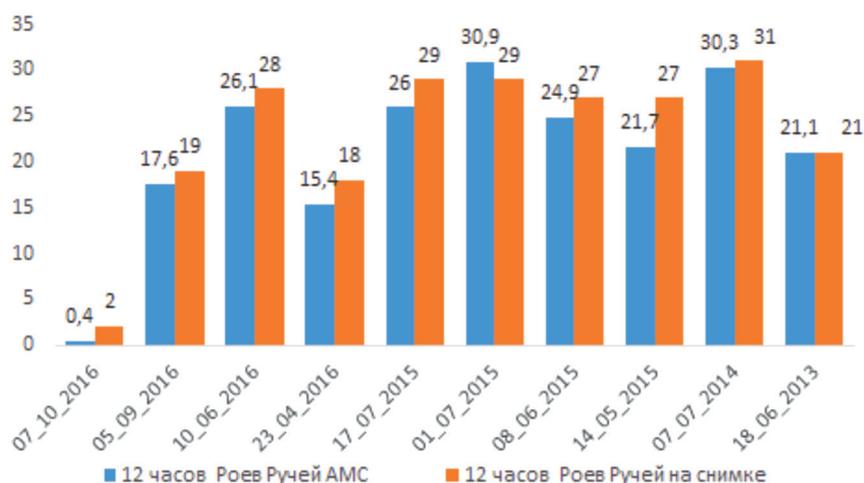


Рис. 2. Диаграммы сравнения температур по АМС и по ДЗЗ

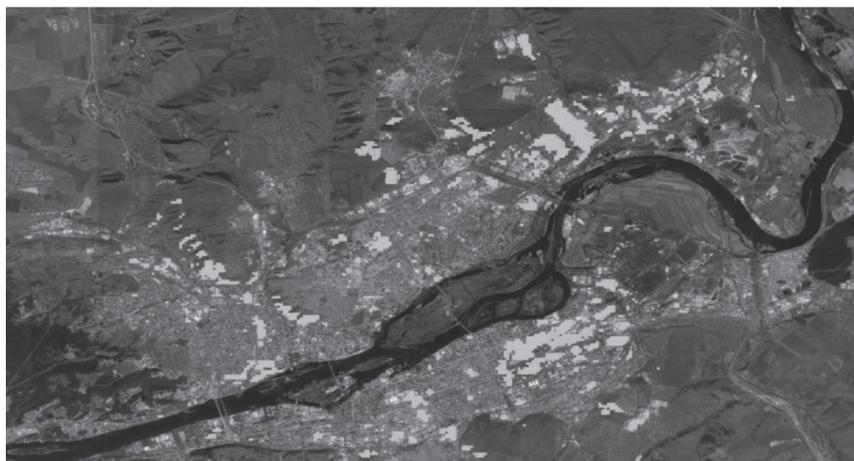


Рис. 3. Летнее распределение максимальных температурных значений

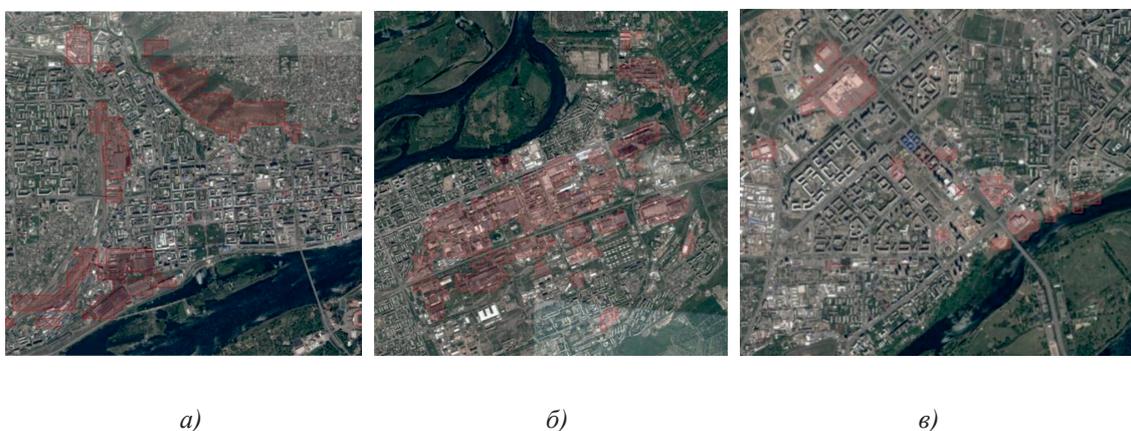


Рис. 4. Фрагменты карты г. Красноярск с тепловыми аномалиями: а) Железнодорожный район; б) промышленная зона; в) торгово-развлекательные центры

Для отсека артефактов на поверхности Земли, которые точечно могут влиять на результаты вычислений, усредним значения полученных температурных значений до 100*100 м (рис. 3). Получив температурную карту г. Красноярск, на рис. 2 видим самые теплые участки в городе. Сравним местонахождение этих участков по десяти снимкам, рассмотренным ранее.

Для нахождения максимальных температурных значений в пределах города, все снимки были распределены по сезонам: лето, весна и осень. Для отслеживания максимальных температурных значений рассматривались шесть летних снимков.

По результатам анализа летних тепловых многовременных космических снимков на территории города Красноярск было выделено несколько тепловых зон разной природы. Так, на летних снимках

максимальную температуру поверхности имеют такие зоны, как природные возвышенности, торговые центры, промышленные кварталы.

На фрагментах карты отмечены распределения максимальных температур по анализу шести космических снимков Landsat-8. Так, в Железнодорожном районе г. Красноярск наибольшую температуру поверхности имеет Покровская гора, за счет открытых от растительности склонов и негустого покрытия ландшафта травой (рис. 4, а).

На рис. 4, б, видно, что самые максимальные температуры, наблюдаемые на коллекции летних снимков, находятся на правом берегу г. Красноярск, где преобладает промышленная зона города.

В Советском районе города, расположенном на левом берегу, также максимальные температуры преобладают в промыш-

ленной зоне города, но также и в местах скопления торгово-развлекательных центров. На рис. 4, в, видно, что форма тепловых пятен соответствует форме торговых центров: ТРЦ «Планета», «Лента», «Июнь», «Автосалоны», ТЦ «Авиатор».

Заключение

Проведенные исследования показали, что разница между температурой воздуха по данным метеостанций и температурой поверхности Земли, вычисленной на основе спутниковых данных, может достигать нескольких градусов. Следует отметить, что иногда эта разница может быть значительной, поскольку мы сравниваем две разные температуры в разных местах (метеостанции находятся на высоте около 2 м от поверхности Земли). Но несмотря на разницу в измерениях, данная методика открывает неограниченные возможности для исследования территорий, которые не оснащены метеостанциями, но находятся в зоне покрытия Landsat-8.

Список литературы

1. Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval from EOS-MODIS Images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11, No. 8. P. 1380–1384.
2. Stathopoulou M., Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation // Remote Sensing of Environment, 2009, Vol. 113, P. 2592–2605.
3. Merlin O., Duchemin B., Hagolle O., Jacob F., Coudert B., Chehbouni G., Dedieu G., Garatuza J., Kerr Y. Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using a time series of Formosat-2 images. Remote Sens. Environ. 2010, 114, 2500–2512.
4. Лурье И.К. Теория и практика цифровой обработки изображений / И.К. Лурье, А.Г. Косиков. – М.: Научный мир, 2003. – 166 с.
5. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, 2004, 89, 467–483.
6. Frey C.M., Parlow E. Flux measurements in Cairo. Part 2: On the determination of the spatial radiation and energy balance using aster satellite data. Remote Sens. 2012, 4, 2635–2660.
7. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации / В.В. Асмус [и др.] // Труды НИЦ «Планета». – 2005. – Вып. 1 (46). – С. 3–21.
8. Luca Congedo Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. URL: <https://fromgistors.blogspot.com/p/semi-automatic-classification-plugin.html> (дата обращения: 25.06.2018).
9. Hrebtov M., Hanjalic K. Numerical study of winter diurnal convection over the city of Krasnoyarsk: Effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils // Boundary Layer Meteorology. 2017, Vol. 163, Is. 3, P. 469–495.
10. Матузко А.К. Определение температуры поверхности воды по данным дистанционного зондирования Земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы IV международной научной конференции. Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – 2017. – С. 271–274.

References

1. Niclos R., Valiente J.A., Barbera M.J., Caselles V. Land Surface Air Temperature Retrieval from EOS-MODIS Images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11, No. 8. pp. 1380–1384.
2. Stathopoulou M., Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation // Remote Sensing of Environment, 2009, Vol. 113, pp. 2592–2605.
3. Merlin O., Duchemin B., Hagolle O., Jacob F., Coudert B., Chehbouni G., Dedieu G., Garatuza J., Kerr Y. Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using a time series of Formosat-2 images. Remote Sens. Environ. 2010, 114, 2500–2512.
4. Лурье И.К. Теория и практика цифровой обработки изображений / И.К. Лурье, А.Г. Косиков. – М.: Научный мир, 2003. – 166 p.
5. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, 2004, 89, 467–483.
6. Frey C.M., Parlow E. Flux measurements in Cairo. Part 2: On the determination of the spatial radiation and energy balance using aster satellite data. Remote Sens. 2012, 4, 2635–2660.
7. Nazemny'j kompleks priema, obrabotki, arxivacii i rasprostraneniya sputnikovoj informacii / V.V. Asmus [i dr.] // Trudy' NICz «Planeta». – 2005. – Vy'p. 1 (46). – pp. 3–21.
8. Luca Congedo Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. URL: <https://fromgistors.blogspot.com/p/semi-automatic-classification-plugin.html> (data obrashheniya: 25.06.2018).
9. Hrebtov M., Hanjalic K. Numerical study of winter diurnal convection over the city of Krasnoyarsk: Effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils // Boundary Layer Meteorology. 2017, Vol. 163, Is. 3, pp. 469–495.
10. Matuzko A.K. Opredelenie temperatury' poverxnosti vody' po danny'm distancionnogo zondirovaniya Zemli // Regional'ny'e problemy' distancionnogo zondirovaniya Zemli: materialy' IV mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Sibirskij federal'ny'j universitet, Institut kosmicheskix i informacionny'x texnologij. – 2017. – pp. 271–274.