

7. Neteler M., Mitasova H. Open Source GIS: A GRASS GIS Approach: Third edition. New York: Springer, 2008. 420 p.

8. Petrasova A., Harmon B., Petras V., Mitasova H. Tangible Modeling with Open Source GIS. Springer International Publishing, 2015. 135 p.

УДК 528.852, 551.584.4

М.Ю. Грищенко¹, К.К. Чернулич²

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ОСТРОВА ВРАНГЕЛЯ

***Резюме.** В современных условиях в нашей стране многие отдалённые районы характеризуются малой плотностью метеорологических станций, что снижает точность синоптических прогнозов на территории, удалённые от метеостанций. В этой связи использование тепловых космических снимков для моделирования некоторых климатических параметров рассматривается авторами как перспективное направление науки. В статье представлены результаты сопоставления рассчитанных по тепловым космическим снимкам со спутников серии Landsat значений температуры земной поверхности и измеренных с помощью метеоприборов значений температуры приземного слоя атмосферного воздуха. Для рассмотренных сезонов показатели характеризуются выраженной линейной связью с высоким коэффициентом корреляции.*

***Ключевые слова:** Тепловые космические снимки, температура земной поверхности, температура атмосферного воздуха, остров Врангеля.*

Введение. Современный способ составления синоптических карт основывается на проведении климатического моделирования и интерполяции данных сети метеостанций. Минусами данного способа являются крайняя трудоёмкость и разная точность получаемых результатов: для областей, расположенных вблизи метеостанций, точность достаточно высокая, но при удалении от станций она снижается.

Таким образом, получение дистанционных и пространственно непрерывных данных о температуре воздуха было бы полезно для нашей страны, учитывая её географические особенности. Такую возможность даёт использование космических снимков в совокупности с разработкой метеорологических моделей.

Тепловые космические снимки имеют огромный потенциал для использования в географической науке, в том числе, в климатологии. На настоящий момент при применении к ним специальных методов обработки возможно получение значений температуры земной поверхности. Между температурой земной поверхности и температурой приземного слоя атмосферного воздуха существует сложная связь, суть которой ещё до конца не изучена, однако она может быть выражена математически с использованием эмпирических коэффициентов. Поиск таких зависимостей является в настоящее время актуальной задачей аэрокосмических методов географических исследований.

Целью работы является определение связи между температурой земной поверхности, рассчитанной по тепловым космическим снимкам, и температурой приземного слоя атмосферного воздуха, полученной по результатам наземных измерений.

Материалы и методы исследования. На территорию исследуемых островов имеется ряд наземных данных о температуре приземного слоя воздуха. На острове Врангеля распо-

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru.

² МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет; e-mail: chernulich.kk@gmail.com.

ложено 18 пунктов измерений, работавших с 2005 по 2015 год (в том числе государственная метеорологическая станция в бывшем пос. Ушаковское – ГМС). Все данные получены с приборов и станций, приведенных в таблице (табл. 1).

В соответствии с наземными измерениями подобраны космические снимки. В связи с основными требованиями к ним – высокое пространственное разрешение снимков в тепловом диапазоне и частая повторяемость съемки – наиболее подходящими являются снимки со спутников серии Landsat. Всего подобрано 11 снимков на остров Врангеля.

Таблица 1

Погрешности приборов в соответствии с типом датчиков и станций

Тип прибора	Точность прибора, °С
Термографы iButton DS1922L-F50	±1
термогигрографы ibutton DS1923-F5	±1
ГМС	± 0,2

Первый этап расчета значений температуры земной поверхности заключается в проведении радиометрической коррекции с целью перехода от собственного теплового излучения объектов, то есть «сырых» значений яркости, к спектральной плотности энергии излучения. Для этого используется стандартная формула для снимков серии Landsat, составленная разработчиками программы [Converting..., 2010; Science..., 2016; Srinivasan et al., 2013; U.S. Department... 2016; Лялько и др., 2014]:

$$CV_{R1} = DN * M_L + A_L \quad (1)$$

где CV_{R1} – спектральная плотность излучения на сенсоре, DN – «сырые» данные сенсора теплового инфракрасного диапазона, M_L – основной коэффициент пересчета (калибровочный коэффициент), A_L – дополнительный коэффициент пересчета (калибровочная константа, являющаяся значением яркости при минимальном DN). Коэффициенты M_L и A_L записаны в метаданных снимков.

Вторым этапом является проведение атмосферной коррекции снимков с целью компенсации влияния оптической плотности атмосферы. Коррекция для снимков теплового диапазона выполняется разными методами. Наиболее подходящей для данной работы является алгоритм, описанный в работах [Лялько и др., 2014; Converting..., 2010; Yang et al., 2011], где для пересчета используется следующая формула:

$$CV_{R2} = \frac{CV_{R1} - L\uparrow}{\varepsilon\tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L\downarrow \quad (2)$$

где $L\uparrow$ – спектральная плотность энергетической яркости восходящего излучения атмосферы в направлении сенсора, $L\downarrow$ – спектральная плотность энергетической яркости нисходящего излучения атмосферы в направлении поверхности Земли, τ – зональный коэффициент пропускания атмосферы, ε – излучательная способность земной поверхности.

Значения $L\uparrow$, $L\downarrow$ и τ для каждого снимка были получены с помощью Калькулятора параметров атмосферной коррекции НАСА [Atmospheric..., 2016]. В качестве исходных параметров использованы следующие данные: год, месяц, день; часы и минуты (по Гринвичу); широта и долгота центральной точки острова с указанием метода интерполяции профиля атмосферы в зависимости от координат; стандартная модель атмосферы; номера тепловых каналов спутников серии Landsat.

Для выбора стандартной модели атмосферы для изучаемой территории использована таблица, созданная для аналогичного определения подходящей модели при использовании модуля FLAASH в программном продукте ENVI [Atmospheric..., 2009]. Данный модуль является реализацией системы MODTRAN, встроенной в программу ENVI для проведения атмосферной коррекции.

Для острова Врангеля использованы снимки с июля по сентябрь, широта острова Врангеля равна 71°14' с.ш., таким образом, для данной территории подходит модель Mid-Latitude Winter. С помощью калькулятора параметров атмосферной коррекции НАСА получены значения $L\uparrow$, $L\downarrow$ и τ для каждого снимка, которые затем использовались при расчетах.

Излучательная способность ϵ для разных поверхностей известна из научных работ [Грищенко, 2015; Лялько и др., 2014]. Для выявления распределения объектов с разной излучательной способностью проведена контролируемая классификация снимков (рис. 1).

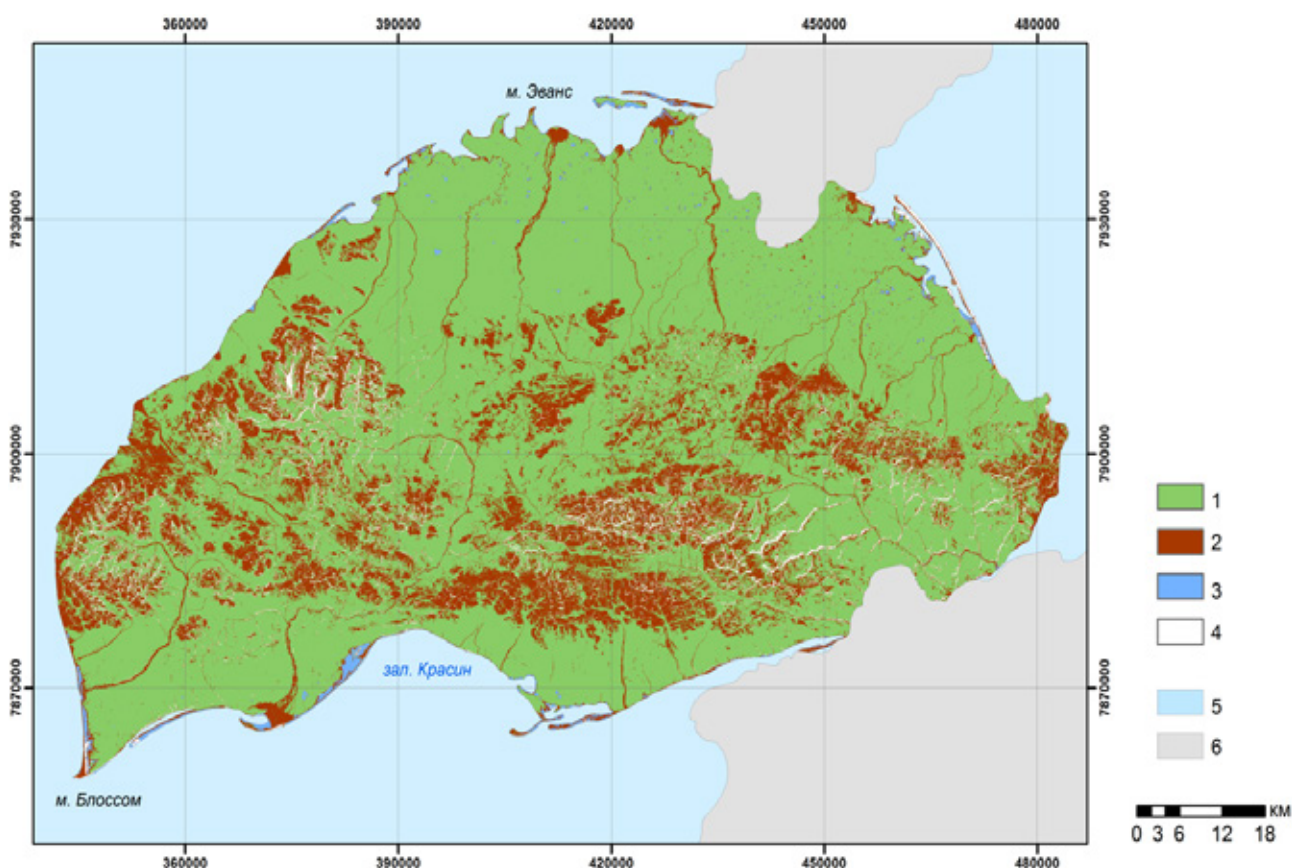


Рис. 1. Схема дешифрирования территории о. Врангеля по космическому снимку системы OLI за 07.08.2014. Типы поверхности: 1. Тундровая растительность; 2. Открытый грунт; 3. Поверхностные водоёмы; 4. Снежники. Маскированные участки: 5. Морские и океанические акватории; 6. Облачность

Третий этап расчёта температуры земной поверхности представляет собой переход от скорректированной спектральной плотности излучения непосредственно к значениям температуры поверхности. Для этого используется формула, полученная путём выражения температуры из формулы спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела Планка и адаптированная для съёмочных систем спутника Landsat 8 [Лялько и др., 2014; Converting..., 2010]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{CV_{R2}} + 1\right)} \quad (3)$$

где T – температура исследуемой поверхности (К); CV_{R2} – спектральная плотность излучения на сенсоре, рассчитанная с учетом влияния атмосферы; K_1, K_2 – калибровочные коэффициенты преобразования излучения в температуру. Коэффициенты рассчитываются отдельно для каждого сенсора и хранятся в метаданных снимков.

В итоге вышеописанных расчетов получены 15 полей распределения значений температуры земной поверхности, которые оказались репрезентативными как при оценке в региональном масштабе, так и при исследовании локальных участков.

Результаты. Расчёт значений температуры приземного слоя воздуха. Рассчитанные значения температуры земной поверхности и измеренные измерения температуры приземного слоя воздуха для рассматриваемой территории и сезонов имеют достаточно высокие коэффициенты корреляции: для раннелетнего и летнего периода этот показатель составляет 0,77 и 0,83 соответственно.

Так как исследуемые явления имеют выраженную линейную зависимость, построены две линии регрессии и получены их уравнения. Так как уравнения регрессии представляют собой среднеквадратическую точечную аппроксимацию значений, по ним полученные значения температуры земной поверхности пересчитаны в значения температуры воздуха. Пример одного из полученных графиков приведен ниже (рис. 2). Итоговые уравнения, используемые для пересчета, имеют следующий вид:

$$SAT = 0,8782 * T - 4,1923, \quad (4)$$

$$SAT = 0,929 * T + 0,0708, \quad (5)$$

где SAT – температура приземного слоя атмосферного воздуха, T – рассчитанная температура поверхности Земли. Уравнения приведены для раннелетнего (4) и летнего (5) периодов.

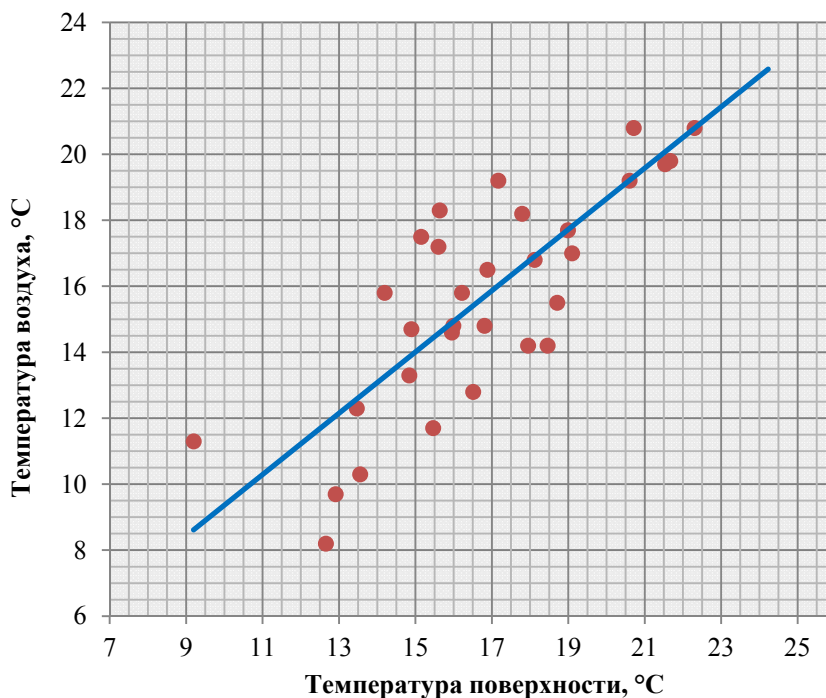


Рис. 2. Линия регрессии и исследуемые показатели для летнего периода на территорию острова Врангеля

В результате получено 15 полей распределения температуры приземного слоя воздуха, которые оформлены в виде карт. Пример одной из карт приведен на рисунке (рис. 3).

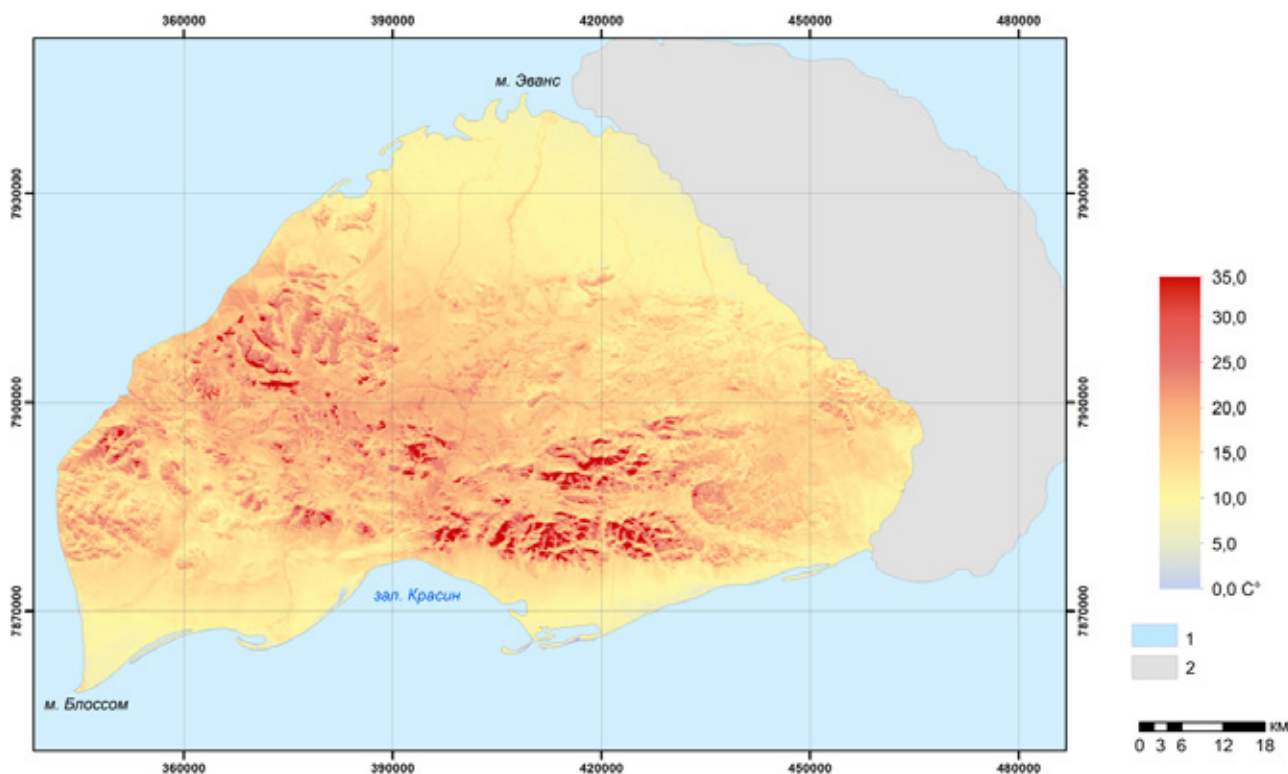


Рис. 3. Поле распределения температуры приземного слоя атмосферного воздуха на территорию о. Врангеля на 08.08.2014 по уравнению (2). Маскированные участки: 1. Морские и океанические акватории; 2. Облачность

Среднеквадратическое отклонение рассчитанных значений температуры воздуха от результатов наземных измерений составляет на раннелетний и летний периоды 1,35°C и 1,1°C соответственно.

Выводы. В ходе работы произведено сопоставление рассчитанных по тепловым снимкам значений температуры земной поверхности и наземных измерений приземного слоя атмосферного воздуха для территории острова Врангеля по снимкам со спутников серии Landsat.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассчитанные значения температуры земной поверхности и наземные измерения для рассматриваемых территории и сезонов имеют выраженную линейную связь, что подтверждается высокими значениями коэффициентов корреляции и детерминации. Особенно репрезентативными являются результаты, полученные для летнего периода, так как при относительно большом количестве измерений (32 штуки) получен высокий коэффициент корреляции, равный 0,83.

2. Кроме этого, на основе сопоставления рассчитанных значений температуры поверхности и измеренных значений температуры приземного слоя воздуха установлено, что в первой половине июля на острове Врангеля воздух прогревается намного слабее, чем в следующие летние месяцы. В начале лета (в данном регионе это начало-середина июля) солнечная радиация интенсивно нагревает земную поверхность, но для активного теплообмена с приземным слоем воздуха этого еще не достаточно и вся поглощенная энергия расходуется на собственный нагрев. Поэтому данный период характеризуется более заметными различиями между температурой земной поверхности и температурой воздуха – в среднем до 10 °С, в то время как для летнего периода разница, как правило, варьирует в пределах 5 °С.

4. В ходе работы также удалось установить, что дифференциация температуры земной поверхности главным образом обусловлена неоднородностью растительного покрова. В местах, где на поверхности лежат открытые грунты, температура земной поверхности значительно выше, чем на участках, занятых растительностью. Даже различия в степени активности вегетации значительно влияют на значения температуры земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грищенко М.Ю. Анализ сезонной изменчивости поверхностного острова тепла Москвы по тепловым космическим снимкам // Геоинформационное картографирование в регионах России: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (Воронеж, 10–12 декабря 2015 г.) / Воронежский государственный университет. – Воронеж: Научная книга, 2015. С. 29–36.
2. Лялько В.И., Филиппович В.Е., Станкевич С.А., Мычак А.Г., Титаренко О.В. и др. Влияние урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съемок). Информационный отчет о НИР. Киев: ЦАКИЗ ИГН НАН Украины, 2014.
3. Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide // ENVI, Atmospheric Correction Module, Version 4.7, 2009.
4. Atmospheric Correction Parameter Calculator // NASA. [Электронный ресурс]. URL: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 20.02.2016).
5. Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to temperature // The Yale Center for Earth Observation, 2010. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.yale.edu/ceo> (дата обращения 14.04.2012).
6. Science data users handbook: Landsat 7: Data products: Level 1G Product // NASA, 2011. [Официальный сайт НАСА]. URL: <http://www.yale.edu/ceo> (дата обращения 08.04.2016).
7. Srinivasan S. Using data from the Landsat 8 TIRS instrument to estimate surface temperature // Geohackers, 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://geohackers.in/2013/08/using-data-from-the-landsat-8-tirs-instrument-to-estimate-surface-temperature> (дата обращения 10.03.2015).
8. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey: Landsat Missions: Using the USGS Landsat 8 Product // [Официальный сайт Геологической службы США]. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php (дата обращения: 25.04.2016).
9. Yang H., Zhang L.F., Zhang X., Fang C., Tong Q. Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data // Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 15. No 6. Pp. 1242–1254.

M.Y. Grishchenko¹, K.K. Chernulich²

COMPARISON OF THE GROUND AND SATELLITE TEMPERATURE DATA, CASE OF WRANGELL ISLAND

***Abstract.** In modern times, in the country many remote areas are characterized by low density of weather stations, which reduces the accuracy of synoptic forecasts for territories remotest from the weather stations. In this regard, the use of thermal infrared satellite images for simulation of some climatic parameters is considered by the authors as a promising area of science. The article presents the results of comparing the land surface temperature values calculated from Landsat satellites images and ground-measured air temperature values. For the considered seasons the indicators are characterized by a pronounced linear relationship with a high correlation coefficient.*

***Key words:** Thermal infrared satellite images, land surface temperature, atmospheric air temperature, Wrangell island.*

REFERENCES

1. Grishchenko M.Y. Analiz sezonnoi izmenchivosti poverkhnostnogo octrova tepla Moskvy po teplovyim kosmicheskim snimkam // Geoinformatsionnoye kartografirovaniye v regionakh Ros-

¹ M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru.

² M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography; e-mail: chernulich.kk@gmail.com.

sii: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii (Voronezh, 10-12 dekabrya 2015 g.) / Voronezhskiy gosudarstvenniy universitet. [Analysis of the seasonal changes of the Moscow surface urban heat island based on thermal infrared satellite images // Geoinformation cartography in regions of Russia: Proceedings of VII Russian-wide research and practice conference (Voronezh, 10–12th of December 2015) / Voronezh state university] – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2015. Pp. 29–36.

2. *Lyalko V.I., Filippovich V.Y., Stankevich S.A., Mychak A.G., Titarenko O.V. et al.* Vliyaniye urbanizatsii na mikroklimat gorodov (po materialam teplovykh aerokosmocheskikh syomok). Informatsionniy otchyot o NIR [The effect of urbanization on the city microclimate (using the materials of thermal infrared aerospace surveys). Research project information report]. Kiev: TSAKIZ IGN NAN Ukrainy, 2014.

3. Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide // ENVI, Atmospheric Correction Module, Version 4.7, 2009.

4. Atmospheric Correction Parameter Calculator // NASA. [Электронный ресурс]. URL: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 20.02.2016).

5. Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to temperature // The Yale Center for Earth Observation, 2010. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.yale.edu/ceo> (дата обращения 14.04.2012).

6. Science data users handbook: Landsat 7: Data products: Level 1G Product // NASA, 2011. [Официальный сайт НАСА]. URL: <http://www.yale.edu/ceo> (дата обращения 08.04.2016).

7. *Srinivasan S.* Using data from the Landsat 8 TIRS instrument to estimate surface temperature // Geohackers, 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://geohackers.in/2013/08/using-data-from-the-landsat-8-tirs-instrument-to-estimate-surface-temperature> (дата обращения 10.03.2015).

8. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey: Landsat Missions: Using the USGS Landsat 8 Product // [Официальный сайт Геологической службы США]. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php (дата обращения: 25.04.2016).

9. *Yang H., Zhang L.F., Zhang X., Fang C., Tong Q.* Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data // Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 15. No 6. Pp. 1242–1254.

УДК 911.2:528.7:551.32

А.Д. Китов¹, В.М. Плюснин²

ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ НИВАЛЬНО-ГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ХРЕБТА КОДАР (БАЗА ДАННЫХ)

Резюме. Работа представляет продолжение исследований авторов по картографированию нивально-гляциальных образований Южной Сибири и созданию соответствующих баз данных [Китов, Плюснин, 2008, 2011, 2012, 2015]. Рассматривается состояние оледенения с середины прошлого века до настоящего времени на разных известных этапах. Для хребта Кодар выделяются состояния оледенения: (1) по первым топографическим картам на начало 1960-х лет; (2) по данным Каталога ледников СССР (начало 1970-х); (3) по Карте ледников хребта Кодар 1976 г. (исследования ИГСиДВ АН СССР); (4) современное состояние по данным дистанционного зондирования Земли (комоснимки 2007–2015 гг. EROS, Quick Bird, Aster, Landsat). Атрибутивные таблицы представлены в формате типа WGI [WEBGEO, 2015]. Анализ данных разного временного состояния показывает динамику оле-

¹ Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; e-mail: kitov@irigs.irk.ru.

² Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru.