

УДК 551.58

Е. А. ИСТОМИНА, О. В. ВАСИЛЕНКО

Институт географии СО РАН, г. Иркутск

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЛАНДШАФТОВ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ LANDSAT И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ

Произведена валидация дистанционных данных Landsat в тепловом диапазоне (24 снимка разных сезонов года за период 2010–2012 гг., 6-й канал 10,4–12,5 мкм, пространственное разрешение 60–120 м) на основе наземных наблюдений за температурой воздуха с помощью электронных датчиков-термохрон на более чем 30 ключевых участках. Вычислена разница значений температуры воздуха, измеренной дистанционными и наземными методами. Установлена зависимость изменения температуры воздуха от типа ландшафта и сезона съемки, а также ее крайние значения — от 0 до 12 °С. Выявлены несоответствия между установленными дистанционным методом и зафиксированными с помощью датчиков-термохрон значениями температуры воздуха. Приведены данные о завышении значений температуры, измеренной дистанционным методом, относительно температуры, зафиксированной с помощью датчиков, на открытых участках местности и занижении показателей температуры для лесных ландшафтов. Обозначены возможные причины расхождения данных: различие температуры поверхности и воздуха, разница пространственного масштаба измерений (точка для датчика и пиксел для снимка), а также влияние излучательной способности ландшафтов на дистанционные замеры. Выбраны снимки Landsat с наименьшими отклонениями, на основе которых проанализирована пространственно-временная динамика температурного поля исследуемого участка. Установлены особенности температурного режима ландшафтов, расположенных в различных формах рельефа. Отмечена разница между характеристиками температурного режима ландшафтов в днище котловины и на ее склонах в течение холодного и теплого периодов. Приведены значения градиентов температуры воздуха на склонах хребтов Хамар-Дабан и Тункинские Гольцы, отмечено наличие круглогодичной температурной инверсии на склонах разной экспозиции, а также дано описание ее характеристик.

Ключевые слова: температура воздуха, температура поверхности, микроклимат, космические снимки Landsat, дальний инфракрасный диапазон.

We carried out a validation of remotely sensed Landsat data in the thermal range (24 images from different seasons for the period 2010–2012, channel 6, 10.4–12.5 μm, spatial resolution 60–120 m) against ground-based air temperature observations by means of electronic ThermoChron sensors in more than 30 key areas. We calculated the difference of air temperature values measured by remote sensing and ground-based techniques. It is found that air temperature variations are correlated with the type of topography and observing season; its extreme values over the range from 0 to 12 °C were determined. The study revealed differences between air temperature values determined by remote sensing and by ThermoChron sensors. It is found that the air temperatures measured by remote sensing are too high when compared with temperatures recorded by the sensors in open areas of terrain and that temperatures are too low for forest landscapes. We suggest the possible reasons behind the differences of the data, specifically the difference of surface and air temperatures, the difference of the spatial scale of measurement (a point for the sensor, and a pixel for the image) as well as the influence of the emissivity of landscapes on remote sensing measurements. We used Landsat images with the least deviations in analyzing the spatiotemporal dynamics of the temperature field for the study area. Characteristic features of temperature regime of landscapes located in different landforms are determined. The difference between characteristics of temperature regime of landscapes located along the bottom of the depression and on its slopes is pointed out for a cold and a warm period. Values of air temperature gradients are provided for the slopes of the Khamar-Daban and Tunkinskie Gol'tsy mountain ranges; the presence of the year-round temperature inversion on slopes of different aspects is pointed out, and the description of its characteristics is provided.

Keywords: air temperature, surface temperature, microclimate, Landsat images, far-infrared range.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследований климата базируется на данных метеостанций [1–4]. Станции, наблюдающие температуру на территории Тункинской долины, расположены на равнинных открытых участках, поэтому по их данным сложно судить о климате горных районов. Для изучения пространственного распределения температуры воздуха и поверхности в горно-котловинных ландшафтах в работе используются датчики-термохроны, а также космические снимки Landsat в тепловом диапазоне.

В последнее время активно развиваются методы дистанционного определения температуры суши и океана по спутниковым данным различного пространственного разрешения. Большое количество съём-

мочных систем (Terra MODIS, NOAA AVHRR, Envisat AATSR, Meteosat 9 SEVIRI, Landsat TM и ETM и др.) производят съемку в тепловом диапазоне 10,4–12,5 мкм. При этом исследуется радиационная температура (характеризует излучение тонкого поверхностного слоя), усредненная по пикселу снимка и спектральному диапазону радиометрических измерений [5]. Фиксируемое на снимках уходящее излучение зависит от температуры поверхности и ее излучательной способности. Существует также много карт глобального уровня генерализации (satellite Earth Surface Temperature products), созданных на основе материалов космической съемки и отражающих температуру земной поверхности и ее излучательную способность [6]. В некоторых случаях при пересчете характеристик яркости снимков в тепловом диапазоне в значения температуры излучательная способность объектов не учитывается, что приводит к значительным искажениям и неточностям [6]. Это особенно актуально для поверхности суши, так как излучательная способность разных типов ландшафтов (открытые участки земли, песок, степь, различные типы леса и т. д.) сильно колеблется. Искажения также связаны с влиянием атмосферы, которая, с одной стороны, поглощает часть излучения земной поверхности, а с другой — излучает, отражает и рассеивает волны в тепловом диапазоне. Кроме того, в различных ландшафтах формируется индивидуальный микроклимат, в том числе и температурный режим. На снимках фиксируется температура поверхностного слоя (почвы на открытых участках, травяного покрова на луговых участках, поверхности крон деревьев в лесу, поверхности снега в зимний период), что необходимо учитывать при разработке алгоритма расчета температуры воздуха и поверхности по космическим снимкам.

Большое количество работ посвящено сопоставлению данных метеостанций и других наземных (in situ) наблюдений с дистанционными данными о температуре воздуха и поверхности суши (англоязычные термины — Land air temperature (LAT) и Land surface temperature (LST) соответственно), их валидации, оценке точности, выявлению несоответствий, учету излучательной способности поверхности и пр. [7–12]. При этом в указанных исследованиях, как и в представленной работе, данные наземных наблюдений за температурой считаются точными и используются для валидации дистанционных данных. Для корректного распознавания температуры поверхности по дистанционным данным топологического уровня необходимо наличие густой сети наземных наблюдений за микроклиматом территории и температурой воздуха и почвы.

Цель исследования — оценка возможности использования космических снимков Landsat разных сезонов и лет для определения температуры воздуха и поверхности на территории Тункинской котловины, а также обнаружение закономерностей пространственно-временной структуры температурного поля на основе наземных и дистанционных данных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тункинская котловина находится на стыке хребтов Тункинские Гольцы и Хамар-Дабан, относится к зоне островного распространения многолетнемерзлых толщ и характеризуется высокой континентальностью климата, большими суточными и годовыми амплитудами температур. Горы, обрамляющие долину, препятствуют поступлению тихоокеанских и атлантических воздушных масс. Годовая сумма осадков в центральной части днища котловины относительно невелика и увеличивается к ее бортам [13, 14]. В связи с существенными природными отличиями центральной части котловины и ее горного обрамления район исследования характеризуется разнообразием ландшафтных условий, форм рельефа и почвообразующих пород и климата. Все это позволяет на компактной территории изучать множество ландшафтов с разным температурным режимом (от гольцовых и горно-таежных до степных).

Начиная с 2006 г. в Тункинской котловине проводятся полустационарные комплексные ландшафтные, в том числе климатические, исследования [15]. Создана геоинформационная база данных территории, содержащая топографические карты, цифровую модель рельефа (SRTM), разновременные космические снимки Landsat 5, 7, SPOT 4, а также имеющиеся мелкомасштабные геологические и ландшафтные карты [16].

Для получения данных о температуре воздуха на ключевых участках используются программируемые электронные датчики — термохроны (Thermochron I-Button DS1922L-F5, Dallas Semiconductors, USA). Они представляют собой полностью защищенный двухканальный электронный самописец (логгер), накапливающий в собственной энергонезависимой памяти значения температуры и(или) относительной влажности среды, окружающей его корпус, с привязкой к реальному времени. Диапазон регистрируемых данных — от –40 до 85 °С. Минимальная градация регистрации температуры воздуха 0,0625 °С, погрешность регистрации данных составляет ±0,5 °С [17].

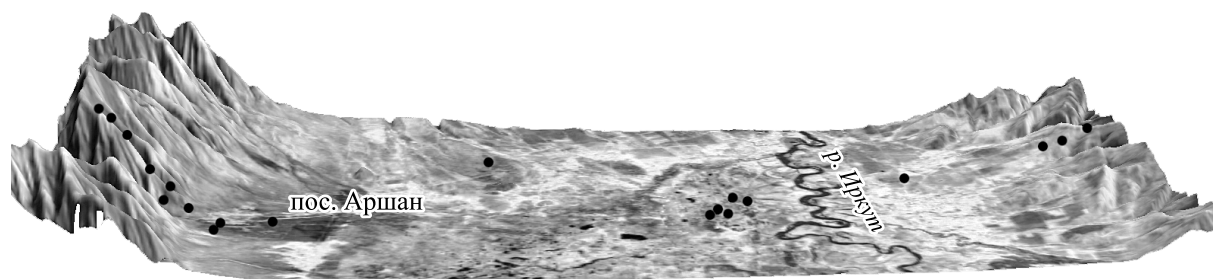
Таблица 1

Характеристики сравнения дистанционных данных температуры воздуха (°С) и данных с датчиков-термохронов для различных точек наблюдений и моментов съемки спутника Landsat

Дата съемки	Точки наблюдений													d _{j aver}	d _{j min}	d _{j max}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
16.01.2010	–	–4,0	0,7	–2,0	–4,3	–2,4	–3,1	–2,4	–1,2	–3,5	–	–3,5	–9,8	3,4	0,7	9,8
09.02.2010	–	–6,5	–1,5	2,9	–3,7	–1,3	–2,9	–1,8	–3,4	–2,2	–	–6,0	–4,1	3,3	1,3	6,5
25.02.2010	–	–5,4	–2,1	1,8	–2,4	–4,8	–2,9	0,1	–4,1	–1,4	–	–4,6	–4,5	2,9	0,1	5,4
30.04.2010	–	–1,1	–1,0	–4,0	–6,6	2,5	3,2	6,9	6,9	–4,2	–	7,1	6,6	4,3	1,0	7,1
01.06.2010	–	2,1	–1,4	4,9	1,6	1,4	4,5	1,8	3,6	7,8	–	8,2	9,9	4,0	1,4	9,9
03.07.2010	–	–0,7	–2,0	2,8	–2,4	0,5	3,7	3,9	3,6	6,9	–	3,2	6,9	2,8	0,2	6,3
11.07.2010	–	–2,1	–2,8	1,1	–2,8	10,2	1,2	3,5	2,6	3,2	–	2,3	6,1	3,3	1,1	10,2
19.07.2010	–	–7,2	–7,0	–3,1	–6,9	–1,8	–1,3	–	–0,4	–3,8	–	–1,6	–0,3	3,6	0,3	7,2
27.07.2010	–	–5,3	–6,2	–5,3	–13,0	4,9	–4,2	–3,7	–4,1	0,5	–	–4,5	–2,2	5,1	0,5	12,6
29.09.2010	–1,0	–0,7	–2,2	2,0	–2,2	–0,4	–	0,3	–	2,2	–	7,1	–	2,0	0,2	7,1
24.11.2010	0,1	–4,2	1,3	–0,2	–3,8	1,2	–	0,5	–	1,1	–	0,5	–	1,5	0,1	4,2
01.04.2011	5,7	–1,7	1,1	5,3	–3,3	4,7	–	–0,2	–	0,4	–	11,8	–	4,3	0,2	11,8
14.07.2011	–1,8	–4,5	–3,4	0,3	–4,8	–1,8	–	–3,0	–	2,3	–	–0,4	3,3	2,7	0,3	5,8
08.09.2011	0,5	1,4	–1,0	5,0	–1,4	1,6	–	0,1	–	7,9	–	11,0	8,2	3,3	0,1	11,0
02.10.2011	0,3	–0,4	0,2	7,3	–1,2	–0,8	–	–0,4	–	7,0	–	8,3	4,7	0,9	0,2	8,3
27.11.2011	–1,6	–3,9	–0,8	–1,1	–2,7	–6,4	–	–0,8	–	0,5	–	–0,7	–3,3	0,9	0,7	1,0
18.03.2012	1,6	–4,1	–1,1	2,4	–2,3	–4,3	–	–1,1	–	1,6	–	4,9	2,3	2,5	1,0	4,9
22.06.2012	0,8	–	1,3	0,2	5,5	0,6	–	3,1	–	–4,0	2,3	–2,0	–4,0	2,0	0	5,5
09.08.2012	–	–	–	–	2,4	–	–	1,1	–	–	–3,0	–7,0	–5,0	3,2	1,1	7,1
25.08.2012	1,4	1,2	–0,9	2,7	–1,5	0,4	–	–3,8	–	7,2	0,1	9,4	6,7	3,1	0,4	9,4
29.11.2012	0	–	–1,0	–1,0	3,4	4,5	4,7	–2,0	–	–1,0	7,5	5,7	2,7	3,8	0,5	13,0
01.02.2012	3,6	–	1,3	0,2	4,2	5,6	6,6	–1,0	–	3,6	6,7	3,6	4,2	4,1	0,1	12,0
21.03.2012	–3,3	–	1,2	–3,1	2,3	–1,6	–	–0,2	–	–4,1	2,9	–0,9	0,7	2,8	0,2	6,6
08.05.2012	–2,8	–	–2,4	7,0	7,6	–	0,1	–	–	3,5	–11,0	–	–7,2	4,9	0,1	11,0

Примечание. Точки наблюдений: 1 – березняк осоково-разнотравный, 2 – осинник осоково-разнотравный, 3 – березняк осоково-разнотравный, 4 – кедряк осоково-разнотравный, 5 – лиственничник разнотравный, 6 – сосняк мертвопокровный, 7 – сосняк травянистый, 8 – сосняк мертвопокровный, 9 – луг разнотравный, 10 – граница леса, 11 – гарь, 12 – злаковая степь, 13 – эоловый массив. Прочерк – нет данных.

В настоящий момент на территории Тункинской котловины установлены датчики на высоте от 806 до 2119 м (табл. 1). Они рассредоточены таким образом, что образуют трансект от правого до левого борта котловины (рис. 1). Датчики-термохроны расположены на высоте 2 м над уровнем поверхности почвы и запрограммированы, как и на метеостанциях, на сбор показаний через каждые три часа. Информация с датчиков считывается один раз в год.



• I

Рис. 1. Места расположения датчиков (I).

Для анализа пространственного распределения температурного поля использовались космические снимки Landsat 5 и Landsat 7 за период 2010–2012 гг. за следующие даты (в скобках указан номер спутника Landsat (5 или 7), которому соответствуют съемочные системы «тематический картограф» (ТМ) и «улучшенный тематический картограф плюс» (ЕТМ+)): 16.01.2010 (5), 09.02.2010 (7), 25.02.2010 (7), 30.04.2010 (7), 01.06.2010 (7), 03.07.2010 (7), 11.07.2010 (5), 19.07.2010 (7), 27.07.2010 (5), 29.09.2010 (5), 24.11.2010 (7), 01.04.2011 (7), 14.07.2011 (5), 08.09.2011 (7), 02.10.2011 (5), 27.11.2011 (7), 18.03.2012 (7), 22.06.2012 (7), 09.08.2012 (7), 25.08.2012 (7), 29.11.2012 (7), 01.02.2012 (7), 21.03.2012 (7), 08.05.2012 (7). Пространственное разрешение дальнего инфракрасного канала указанных снимков (канал 6) составляет 120 и 60 м для спутников Landsat 5 и Landsat 7 соответственно. Снимки были загружены с сервера Центра науки и исследования земных ресурсов Геологической службы США (EROS USGS USA) (<http://glovis.usgs.gov/>) и предварительно обработаны с помощью алгоритма калибровки, заложенного в программу ENVI. Для температурного канала алгоритм переводит безразмерные показатели DN (Digital Number, яркость исходного снимка) в значения температуры без учета излучательной способности ландшафтов. Атмосферная коррекция снимков производилась с использованием модуля FLAASH (Fast Line of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) для программы ENVI [18].

Была поставлена задача оценить возможности использования снимков Landsat для определения температуры воздуха, а также сформулировать возможные причины отклонений значений температуры, измеренной дистанционным и наземным методами.

Алгоритм расчетов погрешности разделяется на этапы. На первом для каждой точки полевых наблюдений по данным термохронов на даты и время съемки спутника Landsat определялась температура воздуха LAT_{is} (in situ Land air temperature). Температура на датчиках фиксируется каждые три часа синхронно с измерениями на метеостанциях, имеются данные на 12 и 15 ч по местному времени. Съемка же спутником Landsat производится в 13 ч по местному времени. Для расчета температуры воздуха на 13 ч принималась гипотеза, что температура в интервале времени с 12 до 15 ч меняется линейно; применялась следующая формула: $T_{13} = T_{12} + (T_{15} - T_{12})/3$, где T — температура, а нижний индекс — время.

Затем для пикселей, в которые попадали датчики, определяется температура по снимкам Landsat LST_d (distance Land surface temperature). Таким образом, формируется две матрицы значений $LAT_{is\ ij}$ и $LST_{d\ ij}$, где i — точка расположения датчика-термохрона, j — момент съемки. На третьем этапе для каждой точки и момента съемки вычисляется разница этих температур $d_{ij} = LAT_{is} - LST_d$ (см. табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из табл. 1 видно, что реальная температура воздуха LAT_{is} , которая измеряется с использованием датчиков-термохронов, отличается от температуры, определяемой по снимку LST_d . Разница температур зависит от нескольких факторов. По закону Стефана–Больцмана, фиксируемое на снимках уходящее излучение P пропорционально радиационной температуре поверхности T и ее излучательной способности ϵ (отношение фактического излучения к теоретическому, испускаемому абсолютно черным телом при заданной температуре; изменяется от 0 до 1). Ландшафты обладают различной излучательной способностью. Этот фактор приводит к занижению дистанционно измеренных значений температур, т. е. к увеличению значения d_{ij} . Однако оценить влияние этого обстоятельства довольно сложно, так как в один пиксел изображения может попадать несколько типов поверхностей, обладающих разной излучательной способностью. Кроме того, излучательная способность зависит от сезона.

Погрешности также связаны с разницей температур различных слоев ландшафта, что объясняется его микроклиматическими особенностями. Датчиками измеряется температура воздуха на высоте 2 м, поскольку ставится задача определить по космическим снимкам температуру именно на этом уровне. Данный показатель — наиболее используемый в климатологии, наблюдается на всех метеостанциях и присутствует во многих базах данных. На снимках фиксируется температура поверхности. Предположительно, это температура поверхности почвы на открытых участках, травостоя — на степных и луговых участках, поверхности крон — на лесных участках. Кроме того, на снимке передается усредненная по пикселу (площадка 60×60 или 120×120 м) температура, а термохрон измеряет температуру в определенной точке. Этот фактор трудно оценить, оказывает различное влияние в разные сезоны года, может приводить как к завышению, так и к занижению значений температуры, измеренной дистанционным методом.

Анализ полученных данных показал, что значения d_{ij} изменяются от 0 до 12°C по модулю; среднее арифметическое модулей отклонений для всех точек и моментов времени равно 3°C . Минимальные отклонения ($1-3^\circ\text{C}$) наблюдаются осенью, зимой и ранней весной, с апреля по сентябрь отклонения уве-

личиваются до 3–5,5 °С; максимальные значения (7–12 °С) соответствуют открытым участкам (степь, песчаные массивы, подгольцовый пояс).

Преобладают положительные значения d_{ij} (176 из полученных 342 значений), сумма всех d_{ij} равна 133 °С (0,4 °С на точку). Это говорит о том, что в среднем значения LST_d завышены относительно температуры воздуха, измеренной датчиками.

Для лесных участков преобладают отрицательные значения d_{ij} (55 % значений), сумма всех d_{ij} равна –53 °С (–0,2 °С на точку). Это, вероятно, связано с низкой излучательной способностью листвы и хвой деревьев.

Для открытых участков (влажные лугово-болотные угодья и сухие степные и песчаные участки) доминируют положительные значения d_{ij} (61 % значений), сумма всех d_{ij} равна 68 и 120 °С (1,3 и 1,5 °С на точку) для влажных и сухих участков соответственно. Максимальные положительные значения d_{ij} отмечены для теплого периода года на открытых участках местности. Скорее всего, это связано с тем, что в дневные часы поверхность прогревается сильнее, чем воздух. Для проверки этой гипотезы на некоторых безлесных участках установлены датчики-термохроны, измеряющие температуру воздуха и поверхности. Действительно, в летнее время в 13 ч температура поверхности превышает температуру воздуха на 3–10 °С. Разница увеличивается пропорционально росту дневных температур и уменьшению растительности на исследуемом участке. Следовательно, космические снимки, на которых отклонения для открытых участков в теплый период года велики, могут использоваться для анализа температурного поля ландшафтов с учетом того, что полученные выводы относятся к температуре поверхности.

В холодный период года серьезное влияние на значения температуры, измеряемой дистанционным методом, оказывает снежный покров. Он препятствует определению температуры поверхности, так как датчики устанавливаются в летний период на поверхность почвы, зимой же они оказываются под снегом. Для этого периода характерны в основном отрицательные значения d_{ij} , что, вероятно, обусловлено низкой температурой и излучательной способностью снежного покрова.

Зависимости температур LAT_{is} и LST_d сложные, имеют ландшафтную и сезонную специфику, более подробный анализ отклонений требует специального исследования. Для этого в летне-осенний полевой сезон 2011–2013 гг. установлено несколько датчиков, измеряющих температуру поверхности почвы, кустарникового яруса и поверхности крон.

В дальнейшем планируется разработка алгоритма пересчета значений LST_d в LAT_{is} с введением поправочных коэффициентов, отличающихся для различных типов ландшафтов и сезонов года. Это сложная задача, которая требует более масштабных исследований. На данном этапе для анализа пространственно-временной динамики температурного поля исследуемой территории решено использовать полученные после калибровки и атмосферной коррекции снимки (рис. 2) без корректировки значений LST_d , с учетом того, что на снимках отображается температура поверхности. Для оценки использовались снимки с наименьшими отклонениями d_j (среднее модулей отклонений, рассчитанное для каждого снимка) за разные сезоны года (см. табл. 1): 16.01.2010, 25.02.2010, 18.03.2012, 30.04.2010, 01.06.2010, 14.07.2011, 08.09.2011, 02.10.2011, 27.11.2011.

На первом этапе анализировалось распределение температуры по высоте. Для этого проводилось квантование вышеперечисленных снимков по температуре с интервалом 5 °С (см. рис. 2). Использовалась также цифровая модель рельефа (SRTM, пространственное разрешение 90 м), которая разбивалась на интервалы по 100 м по высоте. В итоге получены геоизображения территории, отражающие высоту над уровнем моря с интервалом 100 м (700–800, 800–900, ..., 2900–3000 м), а также температуру поверхности с интервалом 5 °С для каждого момента времени. Затем рассчитывались площади S_{ijk} , где i — класс высоты, j — класс температуры, k — момент съемки, и определялась средневзвешенная по площади температура T_{ik} для каждого диапазона высот и момента съемки (рис. 3). Расчеты производились отдельно для хр. Хамар-Дабан (макросклон северной экспозиции) и хр. Тункинские Гольцы (макросклон южной экспозиции), линия раздела проходит по долине р. Иркут (см. рис. 1).

По информации, полученной с термохронных за период 2011–2012 гг., рассчитаны среднемесячные температуры воздуха и построены аналогичные вышеприведенным распределения температуры по высоте (см. рис. 3). Такие данные характеризуют температуру только в определенных точках (местах установки датчиков), но имеют среднемесячное осреднение, тогда как графики, построенные по дистанционным данным, отображают ранжирование температур на момент съемки (13 ч местного времени на дату съемки), но усредняют температуру по всей исследуемой территории.

Как видно из графика (см. рис. 3), построенного по наземным среднемесячным данным, на борту котловины, формируемой хр. Тункинские Гольцы, температурная инверсия встречается практически

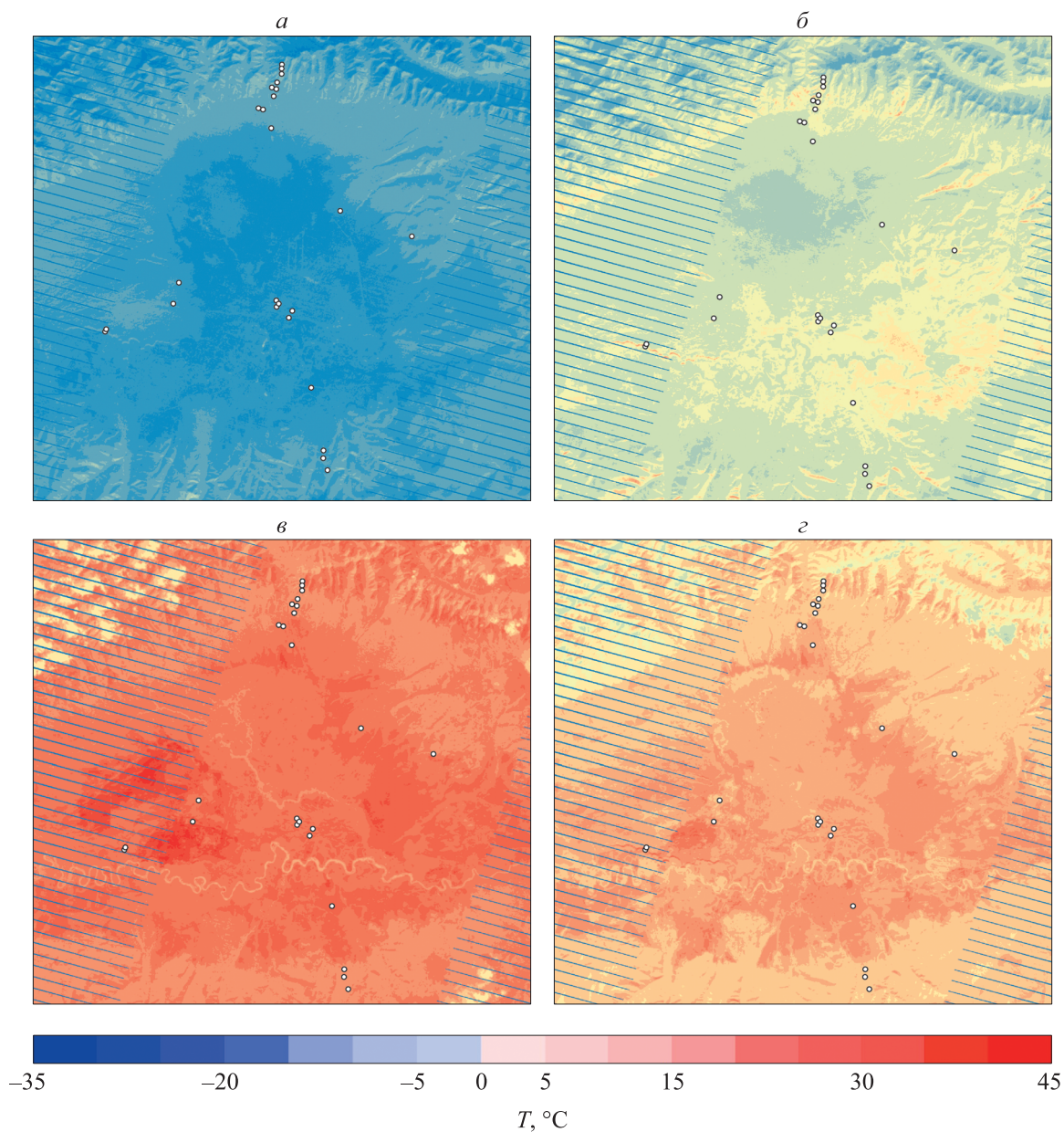


Рис. 2. Температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на территории Тункинской котловины за определенные даты.

а — 25.02.2010, *б* — 18.03.2012, *в* — 03.07.2010, *г* — 08.09.2011.

круглогодично, но наиболее очевидна с октября по март. В этот период температура растет до высоты примерно 900–1000 м, с ноября по апрель — до 1100–1500 м. На хр. Хамар-Дабан летняя температурная инверсия почти не наблюдается (лишь небольшая, с высоты 1000–1050 м), зимняя температурная инверсия схожа с хр. Тункинские Гольцы. Начиная с отметки 1000 м температура равномерно падает с высотой, наименьший градиент характерен для зимних месяцев.

Анализируя график (см. рис. 3), построенный по дистанционным данным, можно сделать вывод, что температурная инверсия в дневные часы характерна только для января–февраля и свойственна тем же высотам, что и выявленная по среднемесячным данным. По дистанционным данным удастся отследить температуру до высоты 3000 м, где датчики отсутствуют. Из полученной информации следует, что начиная с высоты 2770–2800 м формируется другой уровень температурной инверсии, характеризующейся наибольшими градиентами в теплый период года. В целом же температура воздуха с высотой убывает, наименьшие градиенты характерны для зимних месяцев.

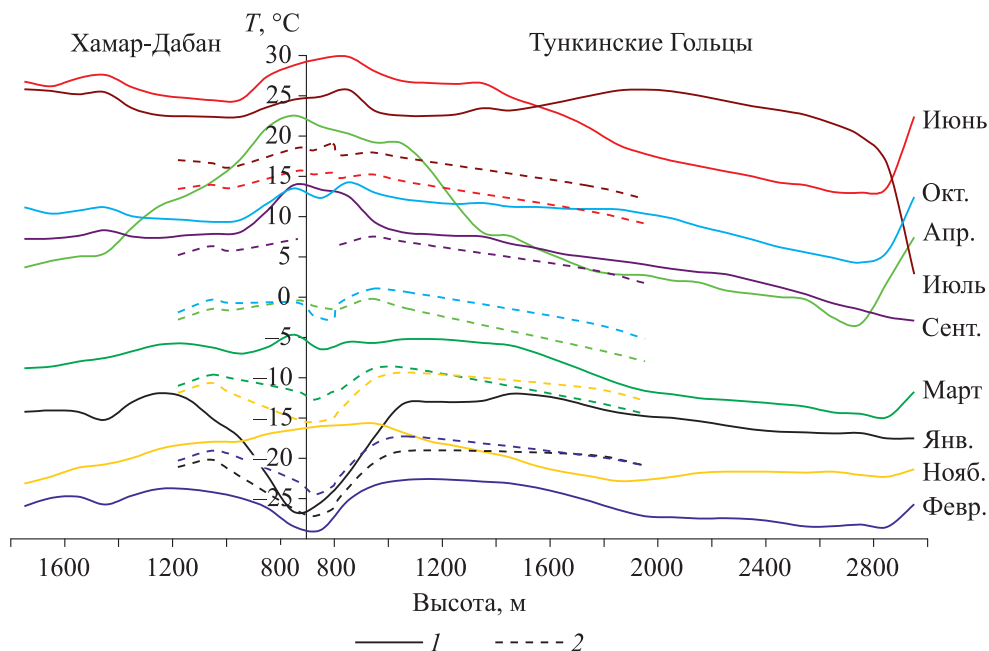


Рис. 3. Распределение температуры воздуха по высоте по данным космической съемки (1) и по наземным данным (2).

С более детальным разрешением по времени температурная инверсия исследовалась по данным термохронов [19]. Обнаружено, что максимальная интенсивность инверсий на склоне южной экспозиции отмечается в первой половине года в утреннее время на высотах 850–950 м. Значения температурного градиента достигают 11,5 °C/100 м. Во второй половине года на всех высотах градиент более сглаженный и не превышает 3 °C/100 м. Максимальное количество инверсий в утренние сроки наблюдения фиксируется в нижнем слое (850–950 м). Велика повторяемость и приподнятых инверсий (слой 1200–1400 м). Что касается дневных сроков, в первой половине года максимальный градиент отмечается на высотах 950–1400 м, здесь же наблюдается максимальное количество случаев в месяц. В вечернее и ночное время максимальные интенсивность и повторяемость приходится на слои, расположенные на середине склона. Максимальная интенсивность инверсий зафиксирована на уровне высот 1070–1200 м. Эти максимумы приходятся на первую половину года, градиент между слоями более сглаженный и не превышает 3 °C/100 м. На склоне северной экспозиции также наблюдается повышение температуры воздуха с высотой по всему исследуемому склону. До высоты 900 м инверсии наблюдаются в утреннее и дневное время суток (6–12 ч) и имеют максимальный температурный градиент: от 6 °C/100 м в июле до 1,5 °C/100 м в январе. На склоне южной экспозиции градиенты достигают максимальных величин в теплое время года. По склону до высоты 1192 м отрицательный градиент отмечается в вечернее и ночное время суток (18–03 ч), максимальное значение наблюдается в теплый период года (4,5 °C/100 м в июне), минимум приходится на декабрь (1,2 °C/100 м).

На следующем этапе исследовался температурный режим различных ландшафтов. С использованием вышеперечисленных снимков и ландшафтной карты территории [16] для каждого типа ландшафта (класс фаций) и даты съемки рассчитывались средневзвешенная по площади температура T_{cp} , максимальная T_{max} и минимальная T_{min} , а также разница максимальной и минимальной температуры D (диапазон) в пределах ареала класса фаций (табл. 2).

Степные ландшафты и сосновые леса, расположенные в днище котловины, характеризуются наименьшими средними температурами в холодный период (от –30 до –25 °C) и наибольшими (25–30 °C) в теплый период года, D в пределах ландшафта относительно невысоки и составляют 10–15 °C. Гольцовым ландшафтам хр. Тункинские Гольцы, а также плакорным ландшафтам хр. Хамар-Дабан свойственны относительно высокие температуры в холодный период года и низкие — в теплый, диапазоны температур высоки в феврале, марте, июне и октябре и составляют 20 °C. Практически совпадает годовой ход температур горно-таежных геосистем кедрово-лиственничных лесов обоих хребтов, температура горно-таежных геосистем хр. Хамар-Дабан на 1–5 °C ниже, что, вероятно, связано с его северной ориентацией.

Значения температуры (°С) различных ландшафтов Тункинской котловины

Дата съемки	T, °С	Класс фаций								
		1 (9)	2 (10)	3 (17)	4 (9)	5 (16)	6 (11)	7 (18)	8 (9)	9 (1)
16.01.2010	T_{cp}	-13	-16	-17	-24	-25	-27	-24	-20	-13
	T_{min}	-20	-20	-25	-30	-30	-30	-30	-30	-20
	T_{max}	-5	-10	-10	-20	-20	-25	-20	-20	-10
30.04.2010	T_{cp}	6	5	18	24	20	22	25	16	7
	T_{min}	0	0	5	15	15	20	20	20	0
	T_{max}	15	10	25	30	25	30	30	25	15
14.07.2011	T_{cp}	24	25	23	28	24	24	26	23	23
	T_{min}	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	T_{max}	30	30	30	35	30	30	30	25	30
02.10.2011	T_{cp}	11	10	12	14	10	13	15	9	10
	T_{min}	0	0	5	5	5	5	10	5	5
	T_{max}	20	20	15	20	15	20	20	15	20

Примечание. Классы фаций (в скобках дана площадь, %). Гольцовые байкало-джугджурские: 1 — сублитоморфных и гольцовых фаций (сосново-лиственничных с кедром лесов); 2 — сублитогидроморфных фаций. Горно-таежные байкало-джугджурские (хр. Тункинские Гольцы): 3 — класс сублитоморфных фаций (кедрово-лиственничных лесов). Горно-таежные южносибирские: 4 — субсаммоморфных фаций (сосновых лесов). Центрально-азиатские степные геосистемы: 5 — гидроморфных лугово-болотных фаций, 6 — субгидроморфных остепненно-луговых фаций долины р. Иркут, 7 — антропогенных фаций. Горно-таежные байкало-джугджурские (хр. Хамар-Дабан): 8 — сублитоморфных фаций, 9 — сублитоморфных плакорных фаций.

Антропогенные геосистемы наиболее теплые среди окружения в летнее, осеннее и весеннее время. Зимой они характеризуются относительно низкими температурами. Схожие тенденции свойственны геосистемам сосновых лесов, расположенных в днище котловины. Это, возможно, связано с высокой степенью антропогенной нарушенности (более половины их площади пройдено пожарами).

Исходя из дистанционных данных, пик максимума температуры для всех ландшафтов приходится на июнь, а пик минимума — на февраль. Для гольцовых ландшафтов хр. Тункинские Гольцы максимум смещен на июль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые данные по валидации снимков Landsat в тепловом инфракрасном диапазоне для территории Тункинской котловины, позволяющие определить корректность использования указанных снимков для анализа температурного поля. Вычислена разница значений температуры воздуха, измеренной дистанционным и наземным методом для различных ключевых участков и моментов съемки. Показано, что эти значения изменяются от 0 до 12 °С и зависят от типа ландшафта и сезона съемки; значения температуры, определенные дистанционным методом, завышены относительно температуры воздуха, измеренной датчиками для открытых участков местности, и занижены для лесных ландшафтов. Отклонения связаны с различием температуры поверхности и воздуха, разницей пространственного масштаба измерений (точка для датчика и пиксел для снимка), а также с влиянием излучательной способности ландшафтов на дистанционные замеры. Для разработки алгоритма корректировки дистанционно полученных значений температуры требуются дополнительные исследования. На основе имеющихся данных выбраны несколько снимков с наименьшими показателями средней разницы температур для всех точек наблюдения, которые использованы для дальнейшего анализа температурного поля исследуемой территории.

Таким образом, на основе уникальных данных о температуре воздуха с временным шагом 3 ч (данные датчиков термохронов) и пространственным шагом 60–120 м (данные, полученные на основе снимков Landsat) проанализирован температурный режим ландшафтов Тункинской котловины. Как наземные, так и дистанционные данные подтверждают наличие на склонах хребтов Хамар-Дабан и Тункинские Гольцы практически круглогодичной температурной инверсии. Показано, что степные ландшафты и

сосновые леса, расположенные в днище котловины, характеризуются относительно низкими температурами в холодный период года и высокими — в теплый, в пределах горно-таежных и гольцовых ландшафтов бортов котловины наблюдается обратная картина. Наиболее теплыми являются антропогенно нарушенные геосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Максютова Е. В.** Оценка радиационного баланса геосистем Минусинской котловины // География и природ. ресурсы. — 2006. — № 3. — С. 69–75.
2. **Густокашина Н. Н., Максютова Е. В.** Тенденции изменения засушливости в степи и лесостепи Предбайкалья // География и природ. ресурсы. — 2006. — № 4. — С. 76–82.
3. **Кочугова Е. А., Кошкин Д. А.** Тенденции изменения годовых экстремумов приземной температуры воздуха на территории Иркутской области // География и природ. ресурсы. — 2010. — № 2. — С. 63–69.
4. **Ипполитов И. И., Логинов С. В., Харюткина Е. В., Морару Е. И.** Изменчивость климата азиатской территории России в 1975–2012 годах // География и природ. ресурсы. — 2014. — № 4. — С. 13–22.
5. **Соловьев В. И., Успенский А. Б.** Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. — 2010. — № 3. — С. 5–17.
6. **Zhao-Liang Li, Bo-Hui Tang, Hua Wu, Huazhong Ren, Guangjian Yan, Zhengming Wan, Trigo I. F., Sobrino J. A.** Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives [Электронный ресурс]. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712004749#> (дата обращения 01.03.2014).
7. **Göttsche F. M., Olesen F. S., Bork-Unkelbach A.** Validation of land surface temperature derived from MSG/SEVIRI with *in situ* measurements at Gobabeb, Namibia // Intern. Journ. Remote Sensing. — 2013. — 34 (9–10). — P. 3069–3083.
8. **Urban M., Eberle J., Hüttich C., Schmullius C., Herold M.** Comparison of satellite derived Land Surface Temperature and Air Temperature from meteorological station on pan-arctic scale [Электронный ресурс]. — <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/5/2348/pdf> (дата обращения 01.03.2014).
9. **Guilleveca P. C., Privette J. L., Coudert B., Michael A., Demarty P. J., Otlée C., Augustine J. A.** Land Surface Temperature product validation using NOAA's surface climate observation networks — Scaling methodology for the Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS) [Электронный ресурс]. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712002076> (дата обращения 01.03.2014).
10. **Halla D. K., Vobx J. E., Casey K. A., Hook S. J., Shuman C. A., Steffen K.** Comparison of satellite-derived and *in situ* observations of ice and snow surface temperatures over Greenland [Электронный ресурс]. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425708001739> (дата обращения 01.03.2014).
11. **Jacob F., Schmugge T., Olioso A., French A., Courault D., Ogawa K., Petitcolin F., Chehbouni G., Pinheiro A., Privette J.** Modeling and Inversion in Thermal Infrared Remote Sensing over Vegetated Land Surfaces [Электронный ресурс]. — http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/39/26/69/PDF/06-Jacob-_Liang-_Chehbouni.pdf (дата обращения 01.03.2014).
12. **Niclòsa R., Galvea J. M., Valenteb J. A., Estrelac M. J., Colla C.** Accuracy assessment of land surface temperature retrievals from MSG2-SEVIRI data // Remote Sensing of Environment. — 2011. — Vol. 115, Iss. 8. — P. 2126–2140.
13. **Белоусов В. М., Будэ И. Ю., Радзиминович Я. Б.** Физико-географическая характеристика и проблемы экологии юго-западной ветви Байкальской рифтовой зоны: Учеб. пособие. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2000. — 160 с.
14. **Преображенский В. С., Фадеева Н. В., Мухина Л. И.** Типы местности и природное районирование Бурятской АССР. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 217 с.
15. **Воропай 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.
16. **Истомина Е. А.** Геоинформационное картографирование ландшафтов Тункинской котловины на основе метода факторально-динамической классификации // Геодезия и картография. — 2012. — № 4. — С. 32–39.
17. **Термохрон.ру:** все о защищенных регистраторах iButton / Научно-Техническая Лаборатория «Электронные Инструменты» [Электронный ресурс]. — <http://www.thermochron.ru> (дата обращения 01.01.2014).
18. **Болсуновский М. А., Черепанов А. С.** Атмосферная коррекция в ПО ENVI. Модуль FLAASH // Геопрофи. — 2006. — № 5. — С. 22–24.
19. **Василенко О. В., Воропай Н. Н.** Влияние рельефа на тепловой режим склонов Тункинских котловин // Материалы 18-й конференции молодых географов Сибири и Дальнего Востока. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2014. — С. 15–17.

Поступила в редакцию 14 апреля 2015 г.