Температура ландшафтной поверхности Республики Тыва по данным спутника Landsat-8 в зимний период 2014–2017 гг.

Х.Б. Куулар

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН Кызыл, 667007, Россия E-mail: khbkr@inbox.ru

На основе обработки снимков территории Республики Тыва, полученных со спутника Landsat-8, построена карта январской температуры в период 2014—2017 гг. Данная карта демонстрирует дифференциацию ландшафтной поверхности по интенсивности теплового излучения, соответствующего типу растительности и ландшафтов. Выявлена характерная особенность холодного периода в регионе — температурные инверсии, которые возникают после понижения температуры в приземном слое. Значения температуры по полученной карте варьируются от -13 до -38 °C. Температура повышается на 1 °C с увеличением уровня местности на каждые 100–120 м на северных макросклонах хребтов и на каждые 70–100 м — на южных. Минимальные температуры (-35...-38 °C) наблюдаются у подножья хребтов и на межгорных понижениях (в Убсунурской, Тувинской и Тоджинской котловинах) на высотах 650–1100 м над уровнем моря (н.у.м.). Максимальные температуры (-13...-23 °C) отмечены на высотах 1700–2200 м н.у.м. (подгольцово-таёжный высотно-поясной комплекс). Приведено сравнение данных LST-карты (Land Surface Temperatures) с наземными данными, что уточняет и корректирует полученную информацию о связях зимней температуры ландшафтной поверхности (LST) с растительностью в горах.

Ключевые слова: температура ландшафтной поверхности, снимки Landsat-8, дальний инфракрасный диапазон, высотная поясность, котловинно-горные ландшафты

Одобрена к печати: 15.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-67-77

Введение

Климатические карты (карты температуры, осадков, ветра) Республики Тыва были созданы в 1960-х гг. ХХ в. Карты температуры часто служат основой для принятия решений в сфере природопользования и охраны окружающей среды. Отсутствие современной картографической информации о температуре региона может привести к принятию ошибочных решений. В связи с глобальным изменением климата стало актуально создание карт, отражающих температуру региона. Составление таких карт классическими методами позволяет получить достоверную информацию о температуре воздуха республики, но работа эта очень трудоёмкая.

В последние годы большое развитие получили методы дистанционного зондирования в различных сферах деятельности. Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) представляют собой непрерывное поле данных, основанное на большой плотности информации. Использование результатов космосъёмки для целей картографирования обусловливается следующими свойствами: единовременность съёмки труднодоступных и больших территорий; широкий охват, который даёт возможность изучать связь всех компонентов ландшафта. Использование ДДЗ при картографировании температуры ландшафтной поверхности (LST — Land Surface Temperatures) относится к ключевым параметрам при изучении эколого-климатической обстановки территорий.

Воссозданию LST на основе космоснимков при различных климатических условиях посвящено достаточно много работ, например (Buyadi et al., 2013; Land..., 2010; Landsat-8..., 2016; Raj, Fleming, 2008; Omran, 2012; Vlassova et al., 2014). Авторы этих исследований сравнивают корректность распознавания температуры поверхности Земли с наземными измерениями.

В работах (Buyadi et al., 2013; Omran, 2012; Raj, Fleming, 2008) температура поверхности получена на основе данных Landsat-ETM+. В публикации (Raj, Fleming, 2008) приведены результаты исследования, которое проводилось в Гималаях в июне и октябре 2000 г. Показано, что температура поверхности имеет высокую корреляцию с температурой воздуха и отличается на 1-2 °С. Приведённые в работе (Omran, 2012) наблюдения проводились в Египте в 2006-2011 гг. Согласно полученным данным, температура поверхности урбанизированной территории за 27 лет повысилась на 6,23 °С. Исследование (Buyadi et al., 2013) проводилось в окрестностях ботанического сада Шах-Алама в период 1991-2001 гг. LST-карта показывает рост температуры поверхности за исследуемый период. Температура поверхности с растительным покровом повысилась на 0,7 °C, а на территории лесных участков — на 0,67 °C. В работе (Vlassova et al., 2014) значения температуры поверхности были получены с использованием данных MODIS и Landsat-5. Измерения проводились в Казани в 2007-2010 гг. Среднеквадратичное отклонение между значениями температуры варьировалось от 0,5 до 1,81 °C. Таким образом, можно констатировать единство взглядов всех исследователей, что сопоставление данных LST-карты с наземными данными уточняет и корректирует полученную информацию.

В данной статье рассматривается создание карты температуры подстилающей поверхности на территории Республики Тыва по данным Landsat-8 за январь 2014—2017 гг.

Объект исследования

Республика Тыва расположена в центре Азиатского материка, между 50–54° с.ш. и 89– 98° в.д., на высотных отметках 508–3990 м над уровнем моря (н.у.м.). Имеет ширину в самом узком месте ~100 км, в самом широком — ~440 км. Климат республики относится к резко континентальному подтипу умеренного климатического пояса, для которого характерны отчётливое разделение на холодный и тёплый сезоны года и большие перепады температуры.

Особенности природных условий региона связаны с резкой континентальностью климата и орографической спецификой региона. Климат республики суровый, обусловлен горным рельефом и расположением в центре Азии. Среднегодовая температура составляет $-2,3\pm0,9$ °C. Характерны большие суточные и годовые амплитуды температур, годовая сумма осадков невелика: в котловинах — 190–220 мм, а в лесной части — 300–370 мм. Зима характеризуется устойчивым метеорологическим режимом, средняя температура января составляет $-27,5\pm2,8$ °C (1961–1990). На холодный период времени приходится 13-20 % годовых осадков.

Территория республики расположена в южной части гор Южной Сибири, в пределах которой с севера на юг чередуются горные системы и межгорные котловины. Горы занимают 82 % территории региона, а межгорные котловины — 18 %. В северной части республики расположены Западный (2826 м н. у. м.) и Восточный (2805 м н. у. м.) Саяны. Южнее Саян расположены Тувинская (500–600 м н. у. м.) и Тоджинская (800–1800 м н. у. м.) котловины. Южнее котловин находятся хребты Академика Обручева (2895 м н. у. м.), Западный Танну-Ола (3967 м н. у. м.) и Восточный Танну-Ола (2588 м н. у. м.). К западу от хр. Западный Танну-Ола в юго-восточном направлении простирается хр. Цаган-Шибэту (3970 м н. у. м.). Южнее хребта Танну-Ола расположена Убсунурская котловина (750–1000 м н. у. м.).

Распределение основных типов растительности на территории республики сопряжено с рельефом, определяющим контрастность климатических условий. Существенными геоботаническими закономерностями являются наличие высотно-поясных смен и экспозиционная асимметрия растительного покрова.

В степных котловинах преобладают тырсово-мелкозлаковые и полынно-мелкозлаковые степи. Северные макросклоны хребтов более пологие и почти сплошь покрыты лесом. Основными лесообразователями являются лиственница сибирская (*Larix sibirica*), кедр сибирский (*Pinus sibirica*), ель сибирская (*Picea obovata*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), пихта сибирская (*Abies sibirica*) и лиственные породы (берёзы (*Betula pendula, Betula microphilla*), тополь (*Populus laurifolia*), осина (*Populus tremula*)) (Растительный..., 1985).

Леса с кедром, лиственницей и елью образуют пояса подгольцовой и горно-таёжной растительности. Горно-таёжный пояс преобладает главным образом на склонах северных и восточных экспозиций, сочетаясь со степными сообществами южных склонов. На склонах разной экспозиции в пределах одного высотного уровня формируется растительность разных природных поясов. В горах на склонах восточной и северной экспозиций произрастает бореальная лесная растительность, на западных и южных — субаридная и суббореальная.

На южных макросклонах хребтов до 1800 м н.у.м. господствуют сухие горные степи на слаборазвитых каменистых почвах. Соответственно, особенность высокогорий Тувы состоит в широком распространении переходных типов растительности между высокогорной (пустошной) растительностью и настоящими степями (разнотравно-злаковыми). На более влажных склонах гор растут кустарники: шиповник, спирея, карагана, лапчатка кустарниковая, жимолость, барбарис. На подветренных склонах по выровненным местам распространены ерниковые тундры. В местах с хорошим увлажнением — травянистые тундры, представленные осоковыми сообществами. Альпинотипный тип растительности представлен осочниками и кобрезниками. Разнообразны заросли кустарников, среди которых: рододендрон мелколистный, ива сетчатая, ива сизая, берёза круглолистная, карагана гривастая (Макунина, 2016; Растительный..., 1985).

Материалы и методы исследования

Современные дистанционные методы позволяют осуществлять сбор данных для качественного составления и обновления тематических карт. При измерении температуры поверхности Земли используют дальние инфракрасные диапазоны, по данным которых формируются температурные карты поверхности Земли (LST) (Lambin, Ehrlich, 1995). Для составления карты ландшафтной поверхности на территорию республики отобраны 16 безоблачных космических снимков Landsat-8 за 2014—2017 гг., сделанных в следующие даты: 01.01.2016, 06.01.2016, 13.01.2016, 14.01.2017, 16.01.2017, 21.01.2017, 25.01.2017, 16.01.2014, 29.01.2016, 04.01.2016, 27.01.2016 и 20.01.2017. Снимки спутника Landsat-8 первого уровня обработки получены с помощью сервиса Earth-Explorer (сервер Геологической службы США, http://earthexplorer. usgs.gov). Значения поверхностной температуры (LST) определены из теплового диапазона 10,3–11,3 мкм с использованием 10-го канала (TIR1) с разрешением 100 м. Время съёмки с 04:47 до 04:54 по всемирному координированному времени (UTC — Coordinated Universal Time), а по местному времени, соответственно, — с 08:47 до 08:54.

Определение температурных характеристик поверхности Земли проводилось при помощи геоинформационной системы Quantum GIS 2.18 с использованием модуля Semi-Automatic Classification Plugin (Congedo, 2017). Данный модуль переводит безразмерные показатели DN (Digital Number, яркость исходного снимка) в значения температуры без учёта излучательной способности ландшафтов. Атмосферная коррекция снимков производилась с использованием того же модуля. Проведены радиометрическая коррекция снимков уравнением (1) и атмосферная коррекция с учётом влияния атмосферы (2):

$$CV_{R1} = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{Qcal_{\max} - Qcal_{\min}} (DN - Qcal_{\min}) + R_{\min},$$
(1)

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

где CV_{R1} — спектральная плотность излучения без учёта влияния атмосферы; R_{max} , R_{min} — максимальное и минимальное значения интенсивности теплового излучения; $Qcal_{max}$, $Qcal_{min}$ — максимальное и минимальное значения яркости пикселов снимка; DN — исходное значение яркости пиксела; CV_{R2} — спектральная плотность излучения с учётом влияния атмосферы; L^{\uparrow} — спектральная плотность энергетической яркости восходящего излучения атмосферы в направлении сенсора; L^{\downarrow} — спектральная плотность энергетической яркости вергетической яркости

нисходящего излучения атмосферы в направлении земной поверхности; т — зональный коэффициент пропускания атмосферы; є — излучательная способность объектов земной поверхности; параметры $L\uparrow$, $L\downarrow$, τ рассчитаны с помощью калькулятора параметров атмосферной коррекции (Грищенко, Константинов, 2016).

Температура поверхности Земли получена по формуле (3) и преобразована в шкалу Цельсия добавлением абсолютного нуля (-273,15 °C). Для вычисления температуры поверхности (*T*) использовались следующие уравнения (Landsat-8..., 2016):

$$T = \frac{T_B}{1 + \lambda T_B \frac{s}{hc} \ln(\varepsilon)},\tag{3}$$

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)},\tag{4}$$

где T_B — яркостная температура; λ — длина волны (канала TIR1); *s* — постоянная Больцма-на; *h* — постоянная Планка; *c* —скорость света; K_2 и K_1 (Вт/м²·ср·мкм) — константы тепло-вого канала TIR1 из метафайла (К) (K_2 = 1321,0789 и K_1 = 774,8853); L_{λ} — спектральная энергетическая яркость в апертуре сенсора.

Качество космоснимков сравнивалось с данными метеорологических наблюдений (Булыгина и др., 2014). На территории республики метеостанции расположены в следующих населённых пунктах: Кызыл, Туран, Чадан, Эрзин, Сарыг-Сеп, Мугур-Аксы, Хову-Аксы, Тоора-Хем, Сосновка и Тээли. В работе использованы значения температуры воздуха в момент съёмки территории региона за даты: 16.01.2014, 01.01.2016, 04.01.2016, 06.01.2016, 13.01.2016, 29.01.2016, 14.01.2017, 16.01.2017, 20.01.2017, 21.01.2017, 25.01.2017, 27.01.2016. Спутниковая съёмка производилась между 04:23 и 04:55 UTC. Метеостанции измеряют температуру воздуха в определённой точке каждые три часа. Измерения на метеостанциях проводились в 03:00 и 06:00 по UTC. Показатели метеостанций считают точными и используют для валидации спутниковых данных. Для расчёта температуры воздуха на 04:00 принималась гипотеза, что температура в интервале времени с 03:00 до 06:00 меняется линейно, и применялась формула:

$$T_4 = T_3 + \frac{T_6 - T_3}{3},\tag{5}$$

где *Т* — температура, а нижний индекс — время измерения (Истомина, Василенко, 2015).

Для пикселов, в которых расположены метеостанции, определялась температура по созданной LST-карте. Для каждой метеостанции в момент космосъёмки вычислялась разница температур T_d :

$$T_d = T_{\rm MC} - T_{\rm KC},\tag{6}$$

где $T_{\rm MC}$ — температура метеостанции; $T_{\rm KC}$ — температура космосъёмки. Отражательные свойства растительного покрова зависят от его структуры, т.е. характера пространственного распределения растений. Значение вегетационного индекса (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index) показывает распределение растительности, рассчитываемое по формуле (Rouse et al, 1973):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$
(7)

где NIR — значение коэффициентов отражения в спектральном интервале поглощения радиации хлорофиллом 0,7-0,9 мкм; RED — значение коэффициентов отражения в интервале спектра 0,6-0,7 мкм.

По закону Планка фиксируемое на снимках уходящее излучение пропорционально радиационной температуре поверхности и её излучательной способности є (отношение фактического излучения к теоретическому, испускаемому абсолютно чёрным телом при заданной температуре; изменяется от 0 до 1).

Коэффициент излучения поверхности на основе вегетационного индекса NDVI определяется по следующей формуле (Van de Griend, Owen, 1993):

$$\varepsilon = 1,0094 + 0,047 \ln(\text{NDVI}).$$
 (8)

В качестве исходных данных использованы карта-схема лесов республики (Карта-схема..., 1992) и деление растительности на пояса и варианты (высотно-поясные комплексы — ВПК) по лесорастительному районированию Тувы (Типы..., 1980).

Результаты и обсуждение

На основе космических снимков Landsat-8 за даты 16.01.2014, 01.01.2016, 04.01.2016, 06.01.2016, 13.01.2016, 29.01.2016, 27.01.2016, 14.01.2017, 16.01.2017, 20.01.2017, 21.01.2017, 25.01.2017, 29.01.2017 построена карта температуры ландшафтной поверхности на территории республики (*puc. 1*).

На созданной LST-карте видны большие перепады поверхностной температуры. Это объясняется господством азиатского антициклона над территорией региона в зимний период. С режимом антициклона связана холодная, малооблачная и малоснежная зима. Как показывает LST-карта, минимальные температуры (-35...-38 °C) концентрированы в котловинах (Убсунурской, Тувинской и Тоджинской).

Окружающие горные массивы региона хорошо и надолго сохраняют холодную температуру в котловинах. Гипсометрический фактор проявляется в адиабатическом снижении температуры за счёт усиления инверсии. Зимняя инверсия, в отличие от летней, означает, что холодный воздух скапливается внизу, в котловинах, а тёплый воздух оказывается выше в горах. Поэтому зимой на высоких точках значительно теплее, чем в котловинах. Разница температур самой высокой и низкой частей региона составляет 25 °C.

На *рис. 26* (см. с. 72) приведён профиль, который проходит вертикально по западной части региона (прямая красная линия). Он начинается с северного макросклона Западного Саяна, проходит через Хемчикскую котловину и заканчивается на хребте Цаган Шибэту.



Рис. 1. Карта температуры ландшафтной поверхности Республики Тыва по январским снимкам в период 2014–2017 гг.



Рис. 2. LST-карта (профиль обозначен прямой красной линией) (*a*) и динамика температуры ландшафтной поверхности профильного участка (*б*)

Как сказано выше, профиль начинается с северного макросклона Западного Саяна, который относится к Западно-Саянскому округу горно-таёжных и подгольцово-таёжных кедровых лесов (1400–2000 м н. у. м.). Климат здесь более мягкий, чем на всей территории региона. Доминирует горно-таёжный ВПК кедровых лесов. Ландшафтообразующую роль в ВПК играют зелёномошные кедровники III–IV классов бонитета, поверхностная температура колеблется от -14 до -18 °C.

Затем профиль проходит гребень Западного Саяна (2600–2800 м н.у.м.), поверхностная температура снижается до –24 °C. На вершинах распространены высокогорные типы растительности (каменистая и мохово-лишайниковая тундры). Лес здесь не растёт из-за недостатка тепла летом, короткого вегетационного периода, а также ветрового режима и мерзлоты.

Далее профиль проходит южный макросклон Западного Саяна, который относится к Верхне-Хемчикскому округу горных степей, горно-таёжных лиственничных лесов и состоит из подгольцово-таёжного и таёжного ВПК кедровых лесов (1600-2200 м н. у. м.). В силу большой крутизны склонов леса перемежаются с каменистыми осыпями, а также петрофитными разнотравными и кустарниковыми сообществами. Здесь в основном растут подгольцово-таёжные мшистые кедровники, поверхностная температура составляет -18...-20 °C. Самая низкая высота над уровнем моря отмечается в Хемикской котловине, где поверхностная температура колеблется в диапазоне -31...-36 °C.

Заканчивается профиль в Чуйско-Монгольско-Алтайской котловинно-горной лесорастительной провинции горных степей (1600–2500 м н.у.м.), где поверхностная температура колеблется в пределах –20...–13 °С.

Динамика температуры ландшафтной поверхности профильного участка по LST-карте приведена на *рис. 26.* Как видно из рисунка, на небольшом участке поверхностная температура существенно различается по значениям. На такой перепад температуры влияют горно-котловинная форма рельефа и неравномерное распределение растительного покрова. Растительность региона, формирующая соответствующие высотно-поясные комплексы, определяется пространственно-временным распределением температуры и влажности местообитаний, но одновременно она создаёт и свой особый фитоклимат (Типы..., 1980). Основной породой тёмнохвойного леса является кедр сибирский, который не выносит резких контрастов зимних и летних температур. Кедр — порода более мягкого климата, поэтому в горах может расти на высоте более 1400 м н.у.м. Лиственница выдерживает континентальность и морозность, потому растёт на нижней границе леса северных макросклонов (1100–900 м н.у.м.), она устойчивее, чем кедр.

Градация поверхностной температуры и растительного покрова по поясам (степному, горно-лесному и высокогорному) и высотно-поясным комплексам (ВПК) региона представлена в *табл. 2* и *3*. Расчленённость рельефа обуславливает также необычайную контрастность температур на сравнительно малых расстояниях в зависимости от высоты местности над уровнем моря. По мере поднятия в горы температура повышается на 1 °C на каждые 100–120 м подъёма на северных макросклонах хребтов и на каждые 70–100 м —на южных.



Рис. 3. NDVI-изображение января (профиль обозначен прямой красной линией) (*a*) и динамика NDVI профильного участка (*б*)

Западная и восточная части республики отличаются растительным покровом. Южный и северный макросклоны также различаются по структуре высотной поясности и температурным условиям. На хребтах преобладают северные и северо-западные экспозиции склонов. На северные склоны поступает гораздо меньше солнечной радиации, чем на южные. Сильнее освещены южные и западные склоны. Склоны с промежуточной ориентацией крутизны и экспозиции (юго-западные и северо-западные) получают промежуточное количество солнечной радиации (Куулар, Чупикова, 2010). Это и определяет безлесье склонов световых экспозиций на западной и центральной частях региона, выраженное как на северном, так и на южном макросклоне.

На основе описанных выше снимков было рассчитано значение вегетационного индекса NDVI за январь и построена карта NDVI-растительности региона за период 2014–2018 гг., которая представлена на *рис. За*. Минимальные значения индекса NDVI (от –0,227 до 0,193) соответствуют нелесным участкам (степь, высокогорная тундра (гольцы), участки с гарями), максимальные (от 0,192 до 0,548) — бореальным лесам с преобладанием тёмнохвойнолиственничных и лиственнично-тёмнохвойных лесов. Значения температуры поверхности ландшафта и вегетационного индекса NDVI показывают пространственную связь: при увеличении вегетационного индекса растительности увеличивается температура поверхности.

Коэффициент излучательной способности поверхности определялся на основе вегетационного индекса NDVI. Этот метод имеет высокую точность, что позволяет вычислять данный коэффициент по каждому пикселю изображения. Градация коэффициента излучательной способности и растительного покрова по поясам и ВПК региона представлена в *табл. 1* и 2. Показаны значения є приведённого на *рис. 26* профиля (красная линия). С увеличением высоты над уровнем моря диапазон изменения є возрастает, что связано с вклиниванием высокогорных степей во все ВПК до тундры.

| Высотно-поясные комплексы | 3 | Высота смс н.у.м. | <i>T</i> , °C смс | Высота юмс н.у.м. | <i>T</i> , °С юмс |
|--------------------------------------|-----------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Степной пояс | 0,74-0,89 | 650-900 | -35,532 | 750-1600 | -3827 |
| Лесостепной пояс | 0,69-0,94 | 1000-900 | -3228 | 1600-1800 | -2723 |
| Подтаёжный ВПК (лиственница, берёза) | 0,63-0,96 | 1200-900 | -3432 | _ | — |
| Лиственничные таёжные леса ВПК | 0,66-0,97 | 1400-1200 | -3223 | 1800-1900 | -2523 |
| Горно-таёжный ВПК | 0,90-0,96 | 1300-1700 | -3018 | - | — |
| Подгольцово-таёжный ВПК (лиственни- | 0,85-0,98 | 1700-2200 | -1913 | 2000-2200 | -1323 |
| ца, кедр, ель) | | | | | |
| Тундра | 0,65-0,85 | 2000-2600 | -2325 | 2000-2600 | -2523 |

Таблица 1. Значения излучательной способности (є), температуры ВПК северных (смс) и южных (юмс) макросклонов западной части Тувы по LST-карте

| Высотно-поясные комплексы | 3 | Высота смс н. у. м. | <i>T</i> , °С смс | Высота юмс н.у.м. | <i>T</i> , °С юмс |
|-------------------------------------|-----------|------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Лесостепной пояс | 0,85-0,89 | 1000-900 | -34 | 950-1000 | -3429 |
| Подтаёжный ВПК светлохвойных травя- | 0,81-0,89 | 1200-900 | -31 | 1200-900 | -2928 |
| ных лесов | | | | | |
| Лиственничные таёжные леса ВПК | 0,85-0,91 | 1400-1200 | -2925 | 1400-1200 | -2726 |
| Горно-таёжный ВПК | 0,80-0,94 | 1300-1700 | -2422 | 1300-1700 | -2524 |
| Подгольцово-таёжный ВПК (лиственни- | 0,89-0,95 | 1700-2200 | -2220 | 2000-2200 | -2321 |
| ца, кедр, ель) | | | | | |
| Тундра | 0,81-0,92 | 2000-2600 | -26 | 2000-2600 | -2013 |

Таблица 2. Значения излучательной способности (є), температуры ВПК северных (смс) и южных (юмс) макросклонов восточной части Тувы по LST-карте

Средние значения излучательной способности степного пояса в западной части региона варьируют от 0,74 до 0,89, в подгольцово-таёжном ВПК (лиственница, кедр, ель) — от 0,81 до 0,92. Для восточной части региона средние значения излучательной способности лесостепного пояса варьируют от 0,85 до 0,89, а для подгольцово-таёжного ВПК (лиственница, кедр, ель) — от 0,89 до 0,95.

В табл. 3 приведены температура воздуха и температура ландшафтной поверхности. Данные космосъёмки были сопоставлены с показателями метеостанций. Температура воздуха и погодные условия были типичными для января: средняя температура составила -31,6 °C, амплитуда температуры по метеостанциям — 15,8 °C. Между 03:00 и 06:00 UTC температура воздуха поднялась от 4,2 до 11,3 °C. Самая низкая (-34,2 °C) зафиксирована в 03:00 в центральной части региона (метеостанция Туран). Гипсометрический и инверсионный факторы проявляются в снижении январской температуры в котловинах (Кызыл, Чадан, Эрзин) и низкогорьях (Хову-Аксы, Тээли, Сосновка) по сравнению со среднегорьем (Мугур-Аксы). Самая высокая температура в западной части региона составила -17,3 °C. Метеостанция Мугур-Аксы расположена в долине рек Мугур и Каргы на юго-западной части хребта Цаган-Шибэту на высоте 1830 м. Температура воздуха ($T_{\rm мс}$), которая измеряется метеостанциями, отличается от температуры, определяемой по космоснимку ($T_{\rm кc}$). Температура поверхности имеет среднюю корреляцию с температурой воздуха r = 0,57, и среднеквадратичное отклонение составило 3,8 °C.

| Метеостанции | Высота | Координаты | | Средняя Тмст, °С | | $T_{_{\rm MC}}, ^{\circ}{ m C}$ | $T_{\rm kc}, {}^{\circ}{\rm C}$ | T_d , °C |
|--------------|-----------|------------|--------|------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|------------|
| | н.у.м., м | с.ш. | в.д. | 03:00 UTC | 06:00 UTC | | | |
| Чадан | 832 | 51°28′ | 91°58′ | -35,8 | -29 | -33,5 | -29,7 | -3,8 |
| Тээли | 983 | 51°02′ | 90°20′ | -34,5 | -28,3 | -32,4 | -29,7 | 2,7 |
| Хову-Аксы | 1043 | 52°62′ | 94°57′ | -33,6 | -23 | -30,1 | -25,5 | -4,6 |
| Мугур-Аксы | 1850 | 50°38′ | 90°43′ | -26,5 | -17,3 | -23,4 | -25,5 | 2,1 |
| Кызыл | 628 | 51°72′ | 94°50′ | -39,5 | -33,6 | -37,5 | -29,6 | -7,9 |
| Туран | 862 | 52°15′ | 93°92′ | -41,8 | -34,1 | -39,2 | -32 | -7,2 |
| Эрзин | 1101 | 50°28′ | 95°12′ | -34,2 | -30 | -32,8 | -32,6 | -0,2 |
| Сосновка | 947 | 51°15′ | 94°52′ | -28,6 | -21,5 | -26,2 | -27,1 | 0,9 |
| Сарыг-Сеп | 706 | 51°50′ | 95°67′ | -33 | -26,8 | -30,9 | -26,7 | -4,2 |
| Тоора-Хем | 920 | 52°47′ | 96°37′ | -33,5 | -22,2 | -29,7 | -33,4 | 3,7 |
| Среднее | 987,2 | _ | _ | -34,1 | -26,6 | -31,6 | -29,6 | -1,9 |

Таблица 3. Температура воздуха и температура ландшафтной поверхности

Разница температур зависит от следующих факторов. Во-первых, в установлении климатического режима ведущая роль принадлежит горно-котловинному рельефу. Абсолютная высота региона (горные хребты, амплитуда относительных понижений и повышений) создают многообразие и контрастность местных (локальных) климатических режимов. Также радиационно-циркуляционные особенности хребтов определяют существенную пространственную неоднородность температуры. Пространственное распределение температуры в горах зависит от поступающей солнечной радиации в зависимости от высоты местности, направления склона и экспозиций.

Во-вторых, значение поверхностной температуры отличается от температуры воздуха в среднем на -1,9 °C. Измерения на метеостанциях проводились в 10:00 и 13:00 по местному времени. Низкие температуры отмечаются в утреннее время, к полудню температура поднимается. В дни съёмки местности температура воздуха поднялась на 4,2°C и составила -11,3 °C. В момент космосъёмки — с 04:47 по 04:54 — поверхность достаточно прогрелась, поэтому на космоснимках поверхностная температура выше на 1,9 °C по сравнению с наземными данными. На космоснимке получается усреднённая поверхностная температура по пикселю (100 м). В один пиксель изображения попадает несколько типов ландшафтов и растительности, обладающих разной излучательной способностью.

Выводы

На данном этапе исследования информация по зимней температуре региона пополнилась на даты 2014–2017 гг. Созданная LST-карта показывает, что горно-котловинный характер региона определяет дифференциацию январской температуры по рельефу. По LST-карте видно повышение поверхностной температуры ландшафта при поднятии в горы (на 1 °C на каждые 70–120 м н. у. м.). Температура поверхности воздуха варьировалась от -13 до -38 °C. Гребень Азиатского антициклона охватывает территорию региона, образуя антициклональную инверсию температуры воздуха. В котловинах температура колеблется от -35 до -38 °C. В горах зима намного теплее и поверхностная температура ландшафта варьирует от -13 до -25 °C.

В целом составленная LST-карта информативна для получения поверхностной температуры ландшафтов. Результаты дешифрирования показывают, что LST-карта обладает достаточной степенью детализации и может послужить источником составления тематических карт. По созданной LST-карте чётко видны сочетания температурных различий на разных высотах и экспозициях склонов горных массивов, которые определяют неоднородные и контрастные сочетания растительных сообществ и формирование различных высотных поясов и их вариантов (ВПК) в горах. По-видимому, ещё большие различия будут проявляться между ними в весенний и летний периоды, а разница температуры весной станет ещё более ощутимой при недостатке влаги, особенно сильном на южных макросклонах.

Автор благодарит д-ра физ.-мат. наук Гуревича Ю.Л., канд. физ.-мат. наук Ладыгину В.П. (КНЦ СО РАН, Красноярск), д-ра биол. наук Назимову Д.И. (КНЦ ИЛ СО РАН, Красноярск) за советы и помощь на различных этапах подготовки рукописи.

Литература

- 1. *Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В.* Описание массива данных среднемесячной температуры на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. Рег. 20.11.2014. ULR: http://meteo.ru/data/156-temperature.
- Грищенко М., Константинов П. Дешифрирование поверхностного острова тепла Москвы по тепловым космическим снимкам с ресурсных спутников // Збірник наукових праць Харків. 2016. Вып. 23. С. 27–34.

- 3. Истомина Е.А., Василенко О. В. Анализ температурного поля ландшафтов Тункинской котловины с использованием комических снимков Landsat и наземных данных // География и природные ресурсы. 2015. № 4. С. 162–170.
- 4. Карта-схема лесов Тувы. Масштаб 1: 300 000. М.: ГУГК, 1992.
- 5. *Куулар Х. Б.*, *Чупикова С.А.* Экологические особенности бореальных лесов хребта Западный Танну-Ола и геоинформационный анализ // Геоинформатика. 2010. № 1. С. 68–72.
- 6. *Макунина Н. И.* Растительность лесостепи Западно-Сибирской равнины и Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2016. 183 с.
- 7. Растительный покров и естественные кормовые угодья Тувинской АССР / отв. ред. И. Ю. Коропачинский. Новосибирск: Наука, 1985. 253 с.
- 8. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 334 с.
- 9. *Buyadi S. N.A., Mohd W. M. N. W., Misni A.* Impact of Land Use Changes on the Surface Temperature Distribution of Area Surrounding the National Botanic Garden, Shah Alam // Procedia Social and Behavioral Sciences. 2013. V. 101. P. 516–525.
- 10. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. 2017. 278 p.
- 11. *Lambin E. F., Ehrlich D.* Combining vegetation indices and surface temperature for land-cover mapping at broad spatial scales // Intern. J. Remote Sensing. 1995. V. 16. No. 3. P. 573–579.
- 12. Land Surface Temperature (LST). Product user manual. LSA SAF. SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.5. 2010. Iss. 2.5. 49 p.
- 13. Landsat-8 (L8). Data Users Handbook. Version 2.0. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2016. 106 p.
- 14. *Omran E.-S. E.* Detection of Land-Use and Surface Temperature Change at Different Resolutions // J. Geographic Information System. 2012. V. 4. P. 189–203.
- 15. *Raj K. B. G., Fleming K.* Surface Temperature Estimation from Landsat ETM Data for a part of the Baspa Basin, NW Himalaya, India // Bulletin of Glaciological Research. 2008. V. 25. P. 19–26.
- Rouse J. W., Haas R. H., Shell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symp., 10–14 Dec. 1973. Washington, DC, 1973. V. 1. P. 309–317.
- 17. *Van de Griend A.A., Owen M.* On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface // Intern. J. Remote Sensing. 1993. V. 14. P. 1119–1131.
- Vlassova L., Perez-Cabello F., Nieto H., Martín P., Riaño D., De la Riva J. Assessment of Methods for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat-5 TM Images Applicable to Multiscale Tree-Grass Ecosystem Modeling // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 4345–4368.

Land surface temperature in the Tyva Republic in the winters of 2014-2017 by Landsat-8 data

Kh. B. Kuular

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl 667007, Russia E-mail: khbkr@inbox.ru

Processed Landsat-8 images of the territory of the Republic of Tyva formed the basis for compiling a January temperature map for 2014–2017. The generated map demonstrates that thermal radiation intensity varies over the land surface with vegetation type and landscape. The cold period in the region is found to exhibit a specific feature — temperature inversions arising after decrease of temperature in the surface layer. The temperature in the generated map varies from -13 to -38 °C. The temperature increases with height by 1 °C every 100–120 m at the northern macroslopes and every 70–100 m on the southern macroslopes of the mountain ridges. Minimum temperatures (-35...-38 °C) are observed at the piedmont of the ridges and in the intermountain depressions (Ubsu-nur, Tyva and Todzha basins) at the heights of 650–1100 m above sea level. Maximum temperatures (-13...-23 °C) are observed at the heights of 1700–2200 m above sea level (subgoltsy-taiga altitudinal belt complex). The LST map data are compared with the ground data. This specifies and corrects the available information about correlation of the winter temperature of the landscape surface (LST) and the vegetation in the mountains.

Keywords: land surface temperature on January, Landsat-8 image, far infrared range, altitude mountain landscape

Accepted: 15.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-67-77

References

- 1. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Trofimenko L. T., Shvets N. V., *Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoi temperatury na stantsiyakh Rossii* (Description of array of average monthly temperature data at stations in Russia), Certificate of state registration of database No. 2014621485, Reg. 20.11.2014, ULR: http://meteo.ru/data/156-temperature.
- 2. Grishchenko M., Konstantinov P., Deshifrirovanie poverkhnostnogo ostrova tepla Moskvy po teplovym kosmicheskim snimkam s resursnykh sputnikov (Revealing Moscow surface urban heat island using thermal infrared images acquired by resource satellites), *Zbirnik naukovikh prats' Kharkiv*, 2016, Issue 23, pp. 27–34.
- 3. Istomina E.A., Vasilenko O.V., Analiz temperaturnogo polya landshaftov Tunkinskoi kotloviny s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov Landsat i nazemnykh dannykh (Temperature field analysis of landscapes of the Tunkinskaya depression with the use of Landsat images and terrestrial data), *Geografija i prirodnye resursy*, 2015, No. 4, pp. 162–170.
- 4. *Karta-skhema lesov Tuvy, Masshtab 1: 300 000* (The map-scheme of the forest of Tuva, Scale 1: 300000), Moscow: GUGK, 1992.
- 5. Kuular Kh. B., Chupikova S. A., Ekologicheskie osobennosti boreal'nykh lesov khrebta Zapadnyi Tannu-Ola i geoinformatsionnyi analiz (Ecological features of boreal forests of the Western Tannu-Ola ridge and geoinformation analysis), *Geoinformatika*, 2010, No. 1, pp. 68–72.
- 6. Makunina N. I., *Rastitel'nost' lesostepi Zapadno-Sibirskoi ravniny i Altae-Sayanskoi gornoi oblasti* (The forest-steppe vegetation of the west Siberian plain and the Altai-Sayan Mountain region), Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo", 2016, 183 p.
- 7. *Rastitel'nyi pokrov i estestvennye kormovye ugod'ya Tuvinskoi ASSR* (The vegetation cover and natural forage lands in the Tuva ASSR), I. Yu. Koropachinskii (ed.), Novosibirsk: Nauka, 1985, 253 p.
- 8. *Tipy lesov gor Yuzhnoi Sibiri* (Types of forests in the mountains of Southern Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1980. 334 p.
- Buyadi S. N.A., Mohd W. M. N. W., Misni A., Impact of Land Use Changes on the Surface Temperature Distribution of Area Surrounding the National Botanic Garden, Shah Alam, *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2013, Vol. 101, pp. 516–525.
- 10. Congedo L., Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, 2017, 278 p.
- 11. Lambin E. F., Ehrlich D., Combining vegetation indices and surface temperature for land-cover mapping at broad spatial scales, *Intern. J. Remote Sensing*, 1995, Vol. 16, No. 3, pp. 573–579.
- 12. *Land Surface Temperature (LST). Product user manual*, LSA SAF, 2010, SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.5, Issue 2.5, 49 p.
- 13. Landsat-8 (L8). Data Users Handbook, Version 2.0, 2016, Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2016, 106 p.
- 14. Omran E.-S. E., Detection of Land-Use and Surface Temperature Change at Different Resolutions, *J. Geographic Inform. System*, 2012, Vol. 4, pp. 189–203.
- 15. Raj K. B. G., Fleming K., Surface Temperature Estimation from Landsat ETM Data for a part of the Baspa Basin, NW Himalaya, India, *Bulletin of Glaciological Research*, 2008, Vol. 25, pp. 19–26.
- Rouse J. W., Haas R. H., Shell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symp., Proc., Washington, DC, 1973, Vol. 1, pp. 309–317.
- 17. Van de Griend A.A., Owen M., On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surface, *Intern. J. Remote Sensing*, 1993, Vol. 14, pp. 1119–1131.
- Vlassova L., Perez-Cabello F., Nieto H., Martín P., Riaño D., De la Riva J., Assessment of methods for land surface temperature Retrieval from Landsat-5 TM Images Applicable to Multiscale Tree-Grass Ecosystem Modeling, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 4345–4368.