

## Исследование температурного поля земной поверхности Тункинской котловины с использованием космических снимков Landsat

Н.Н. Воропай, Е.А. Истомина, О.В. Василенко\*

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1*

Поступила в редакцию 11.10.2010 г.

В 2007 г. начаты микроклиматические исследования температурного режима почв (глубина 40 см) на ключевых участках в Тункинской котловине (Республика Бурятия). Выбор площадок осуществлялся с учетом характеристик рельефа и высотной поясности межгорных котловин. Для экстраполяции данных точечных наблюдений и восстановления поля температуры подстилающей поверхности использовались разновременные космические снимки Landsat. Вычисленные температуры поверхности тесно связаны с температурой почвы для каждого момента времени (линейный коэффициент корреляции более 0,9).

*Ключевые слова:* температура почвы, изменения климата, микроклиматические исследования, космические снимки, тепловой диапазон; temperature of soil, climate change, microclimatic investigation, space images, far infrared band.

Тункинский район занимает Саяно-Прибайкальскую часть Республики Бурятия, с севера граница проходит по гольцам Восточного Саяна (Тункинским Гольцам), с запада по массиву Мунку-Сардык, с юга по хребту Хамар-Дабан. Тункинская долина является продолжением Байкальской впадины. Территория отличается большим разнообразием природно-климатических условий на очень ограниченных пространствах, что делает ее интересной для изучения. Горы, обрамляющие долину, препятствуют поступлению тихоокеанских и атлантических воздушных масс. Климат района резко континентальный, характеризуется большими суточными и годовыми амплитудами температур, небольшим количеством годовых сумм осадков.

В состав Тункинской долины входят шесть котловин, вложенных в сигарообразный контур, который резко ограничен на севере крутой стеной южного склона Тункинских Гольцов. Это котловины (с востока на запад) Быстринская, Торская, Тункинская, Туранская, Хойтогорская и Мондинская.

Важнейшим параметром состояния климатической системы является температура у поверхности планеты, осредненная по всему земному шару, полушарию или некоторому региону. Наиболее достоверно изменения климата могут быть оценены по данным инструментальных наблюдений на сети гидрометеорологических станций. В качестве стандартного периода для оценки климатических переменных, характеризующего текущий или современный

климат, по рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) используется период в 30 лет. В настоящее время это 1961–1990 гг.

Есть твердая уверенность, что глобальная осредненная температура у поверхности Земли повышается. Но это повышение температуры не было непрерывным. С 1976 г. средняя глобальная температура росла примерно в 3 раза быстрее, чем за последние 100 лет [1]. Наблюдающееся в XX в. потепление проявляется во всех регионах России.

Была проанализирована средняя месячная температура воздуха на станциях, расположенных в районе Тункинской ветви котловин Аршан, Тунка, Монды и Кырен. Обработка материалов проводилась с помощью методов описательной статистики.

Температурные изменения синхронны на всех рассматриваемых станциях, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции между рядами. За стандартный период отмечаются в основном положительные тренды температуры воздуха в течение всего года. Исключение составляют некоторые месяцы. Так, например, в августе на всех станциях тренд отрицательный. Также отрицательные тенденции наблюдаются в июне на ст. Аршан и Кырен. Наибольшее количество месяцев с отрицательными значениями трендов отмечается на ст. Кырен. В результате чего здесь прослеживается понижение средней годовой температуры ( $-0,04$  °C/год). В большинстве случаев изменения статистически не значимы.

На ст. Тунка, имеющей самый длительный период инструментальных наблюдений (с 1888 г.), отмечается положительный тренд температуры воздуха. Но с 1976 по 2008 г. тенденции выше, чем за стандартный и за весь период (табл. 1).

\* Надежда Николаевна Воропай (nadya@irigs.irk.ru); Елена Александровна Истомина (elena@irigs.irk.ru); Оксана Валерьевна Василенко.

Таблица 1

## Тенденции изменения температуры воздуха на ст. Тунка (°С/10 лет)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1939–2008												
0,37	0,55	0,51	0,15	0,24	0,1	0,16	0,1	0,13	0,3	0,56	0,4	0,27
1961–1990												
0,19	–0,18	0,23	0,7	0,06	–0,14	0,01	–0,21	0,32	0,21	0,24	0,17	0,08
1976–2008												
0,52	0,87	0,83	0,7	0,4	0,26	0,07	0,51	0,17	0,45	0,9	0,46	0,55

Вопросу изучения климата горных районов юга Сибири посвящено достаточно много работ [2–5 и др.]. Они характеризуют климатические условия в некоторых районах, долинах, бассейнах. Но большинство из них базируется на отдельных маршрутных эпизодических исследованиях, по которым невозможно охарактеризовать общие условия формирования климата.

Станции для наблюдения температуры на территории Тункинской долины расположены на равнинных открытых участках. Анализируя данные этих станций, очень сложно судить о климате горных районов. Можно лишь проследить общие закономерности.

В июле–августе 2007 г. в рамках комплексных ландшафтных исследований [6] были начаты микроклиматические наблюдения за температурным режимом почв (глубина 40 см) на ключевых участках в Тункинской котловине. Выбор площадок осуществлялся с учетом характеристик рельефа и высотной поясности межгорных котловин [3], карты «Ландшафты юга Восточной Сибири» [7]. Рассматривается профиль, включающий днище Тункинской долины, ее горное обрамление – хр. Тункинские Гольцы (южная экспозиция). Характеристика ключевых участков представлена в табл. 2.

нуму времени. Датчики были запрограммированы на измерения с периодичностью сбора показаний через каждые 3 ч, синхронно с измерениями на метеостанциях.

Установлено, что колебания среднегодовой температуры почвы на различных глубинах в основном согласуются с колебаниями температуры воздуха [8].

Выбор глубины (40 см) продиктован следующими причинами. На глубине 50 см затухают суточные колебания температуры и сводится к минимуму ее межсуточная изменчивость [9]. Это обеспечивает достаточно корректное проведение температурных замеров. Выбор глубины определялся также возможностью сопоставить полученные нами данные с результатами измерения температуры почвы на метеостанциях. Глубина 40 см является одной из стандартных глубин измерения температуры почвы [10].

Результаты исследования (табл. 3) показывают, что средние годовые температуры почвы на глубине 40 см, в основном, выше нуля, за исключением высокогорной точки (МК-3-Тк), характеризующейся также максимальной годовой амплитудой. Наименьшая амплитуда годового хода отмечается на середине склона (МК-4-Тк).

Таблица 2

## Характеристика ключевых участков

Номер точки	Широта	Долгота	Высота, м	Ландшафтная характеристика
МК-1-Тк	51° 45,134'	102° 18,714'	806	Сосняк разнотравный зеленомошный на выположенной поверхности на песчаных почвах
МК-2-Тк	51° 54,601'	102° 24,729'	863	Сосново-кедровый осоково-разнотравный на выположенной поверхности
МК-3-Тк	51° 56,729'	102° 26,421'	2119	Крутосклонный гольцовый тундровый
МК-4-Тк	51° 55,871'	102° 26,105'	1418	Склоновый сосново-лиственничный разнотравно-злаковый

Были выбраны наиболее типичные ландшафты, и в соответствии с этим выбором в 2007 г. было установлено 4 программируемых электронных датчика – термохрона. Эти датчики представляют собой полностью защищенный двухканальный электронный самописец (логгер), накапливающий в собственной энергонезависимой памяти значения температуры и (или) относительной влажности окружающей его корпус среды, с привязкой к реаль-

Таблица 3

## Значения годовых характеристик температуры почвы на ключевых участках (2007–2009 гг.)

Температура	МК-1-Тк	МК-2-Тк	МК-3-Тк	МК-4-Тк
Средняя	1,6	1,9	–0,8	–2,3
Максимум	15,5	13,5	12,5	12,0
Минимум	–12,5	–10,0	–15,5	–5,5
Амплитуда	28,0	23,5	28,0	17,5

На южном макросклоне Тункинских Гольцов подтверждаются известные особенности температурного режима, присущие горно-котловинным ландшафтам в течение года: летом наблюдается понижение температуры с высотой, зимой – температурная инверсия.

Одна из задач исследования заключалась в выявлении возможности экстраполяции полученных нами точечных данных о температуре воздуха и почвы на различных глубинах на территорию котловины. При этом необходимо, используя имеющуюся информацию о поле температуры подстилающей поверхности, определить связи между температурой поверхности и температурой почвы на глубинах (в данном случае на глубине 40 см) и изменение этих связей в зависимости от ландшафтных условий территории и сезонных особенностей.

В последнее время активно развиваются методы дистанционного определения температуры суши и океана по спутниковым данным. При этом исследуется радиационная температура (характеризует излучение тонкого поверхностного слоя), усредненная по пикселю снимка и спектральному диапазону радиометрических измерений [11]. Фиксируемое на снимках уходящее излучение зависит от радиационной температуры поверхности и ее излучательной способности. В данном исследовании зависимостью от излучательной способности пренебрегаем.

Для восстановления поля температуры подстилающей поверхности использовались космические снимки спутника Landsat-7, съемочная система ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) (30.08.2008 г.), а также серия снимков спутника Landsat-5, съемочная система TM (Thematic mapper) (22.06, 24.07 и 9.08.2009 г.).

Температура подстилающей поверхности рассчитывалась по тепловым каналам указанных снимков (канал 6 съемочной системы Landsat-TM и канал 61 съемочной системы Landsat ETM+, спектральный диапазон 10,4–12,5 мкм) по следующей схеме [12].

На первом этапе производился пересчет безразмерных значений DN (Digital Number, значений яркости исходного снимка) в значения излучения  $L_\lambda$  (Вт/м<sup>2</sup>), приходящего на сенсор:

$$L_\lambda = \frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{cal\max} - Q_{cal\min}}(Q_{cal} - Q_{cal\min}) + L_{\min\lambda},$$

где  $Q_{cal}$  – калиброванное значение яркости пикселей на снимке (DN);  $L_{\max\lambda}$  и  $L_{\min\lambda}$  – количество приходящего излучения (12,65 и 3,2 Вт/м<sup>2</sup> для камеры ETM+ и 15,303 и 1,238 Вт/м<sup>2</sup> для камеры TM);  $Q_{cal\min}$  – минимальное калиброванное значение DN (равно 1);  $Q_{cal\max}$  – максимальное калиброванное значение DN (255).

Затем производился пересчет значений излучения  $L_\lambda$  в значения абсолютной температуры поверхности  $T$  в кельвинах [13]:

$$T = K2 / \ln((K1 / L_\lambda) + 1),$$

где  $K1$  – калибровочная константа 1 (равна 666,09 и 607,76 для камер ETM+ и TM);  $K2$  – калибровочная константа 2 (равна 1282,71 и 1260,56 для камер ETM+ и TM).

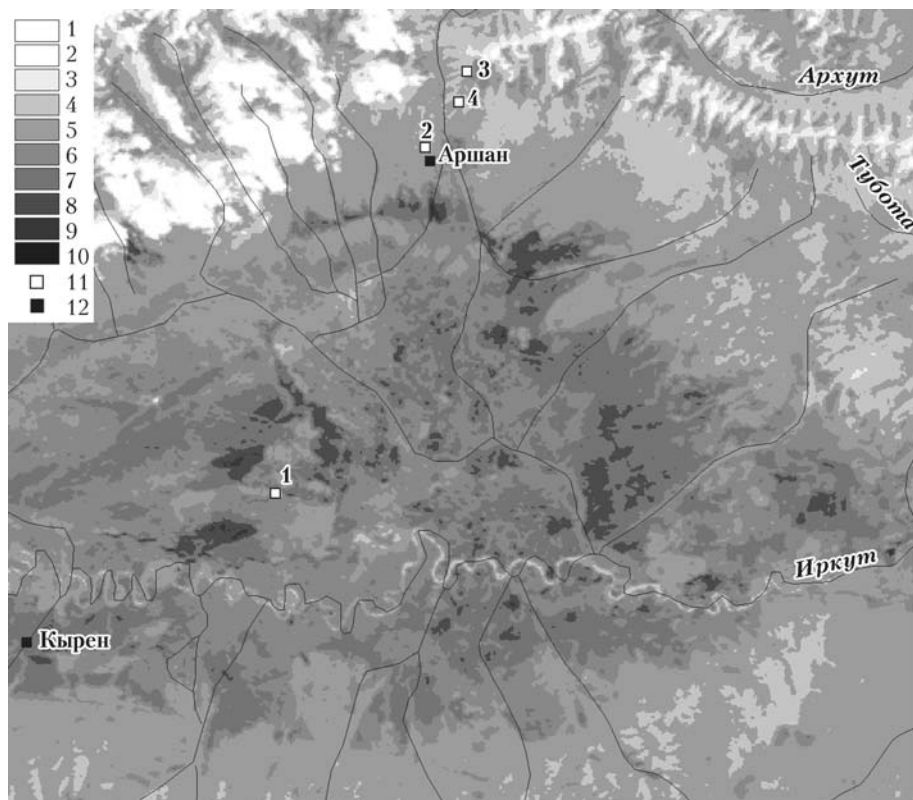
Итоги расчетов, переведенные в °C, представлены на рис. 1. На снимках прослеживается понижение температуры от дна котловины (центральная часть снимка) к ее бортам (северная и южная части), однако в верхней части склонов на прогретых южных участках температура также высока, что объясняется большим притоком солнечной радиации. В распадках гор прослеживается падение температуры поверхности. Более низкие температуры отмечены также вдоль р. Иркут и в районе распространения болот. Кроме того, температура августа гораздо ниже температуры июля.

Проанализирована связь температуры поверхности  $T$ , вычисленной по снимкам, и температуры почвы  $T_{40}$ , измеренной с использованием датчиков (точность измерения 0,5 °C) (табл. 4, рис. 2).

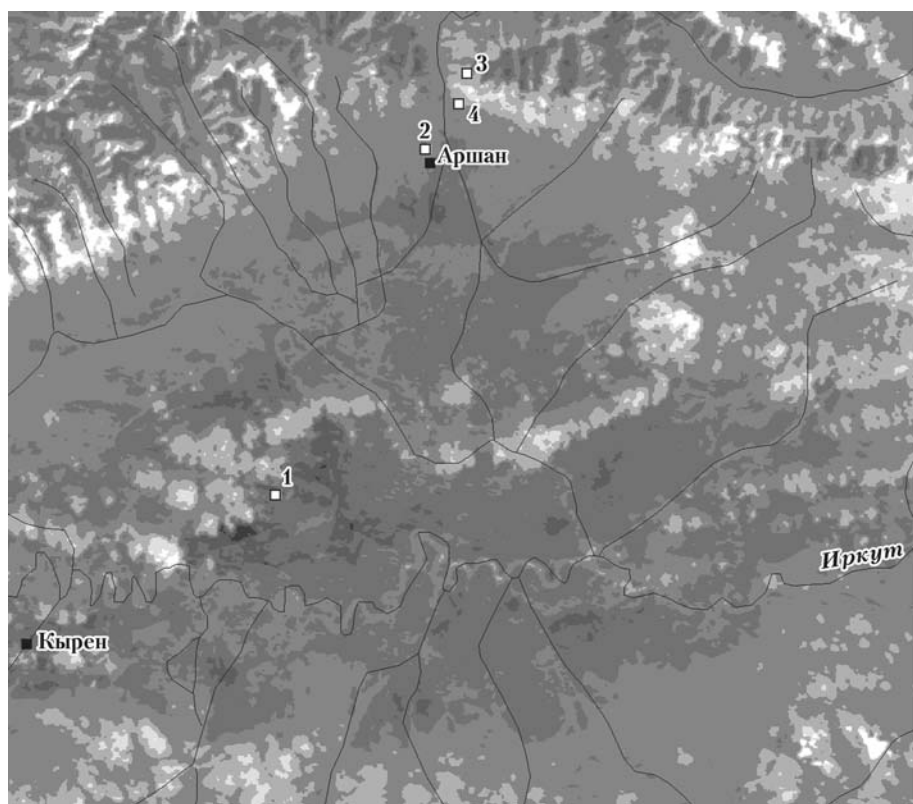
Из рис. 2 видно, что температура поверхности тесно связана с температурой почвы для каждого момента времени (коэффициент корреляции более 0,9). Кроме того, значения температур июля 2009 г. (ряд 2) и 2008 г. (ряд 4) лежат на одной линии. В разные месяцы температуры поверхности и почвы на глубине 40 см связаны по-разному.

Мониторинг температуры воздуха и температуры почвенного слоя предоставляет уникальный экспериментальный материал для изучения сложных процессов передачи тепла от приземного слоя атмосферы в почву. Опыт работ специалистов университетов и институтов РАН [13–15 и др.] показывает перспективность использования программируемых электронных датчиков – термохрон – для мониторинга экологического состояния окружающей среды. При этом осуществляется оперативный контроль за динамикой гидротермических характеристик природных и антропогенных объектов в течение всего срока наблюдений без непосредственного участия оператора.

Дистанционное определение температуры земной поверхности по спутниковым данным позволяет детально исследовать пространственную дифференциацию температурного поля. Полученные другими методами в основном точечные данные (данные метеорологических станций, экспедиционных измерений и пр.) не дают такой возможности. В настоящем исследовании сочетается наличие современных спутниковых данных и синхронных наземных наблюдений температуры воздуха и почвы на стандартных глубинах. В некоторых работах для экстраполяции точечных наблюдений используются карты типов земной поверхности (ландшафтные карты, карты растительности и т.п.) [15, 16 и др.]. В этом случае климатические показатели усредняются по всему ландшафтному выделу, что не вполне соответствует действительности.



*a*



*б*

Рис. 1. Рассчитанные значения температуры подстилающей поверхности по снимкам Landsat: *a* – 22.06.2009 г. и *б* – 24.07.2009 г.; 1–10 – температура 0–40 °С с интервалом 4 °С; 11 – точки наблюдений (см. табл. 1); 12 – населенные пункты

Значения температур на ключевых участках

Номер точки	29.07.08 г.		22.06.09 г.		24.07.09 г.		9.08.09 г.	
	$T$	$T_{40}$	$T$	$T_{40}$	$T$	$T_{40}$	$T$	$T_{40}$
МК-1-Тк	26,1	14	23,0	7	24,7	13	17,2	12,5
МК-2-Тк	19,2	11	17,2	4,5	19,9	11	15,3	10,5
МК-3-Тк	18,7	9,5	—	—	—	—	—	—
МК-4-Тк	19,0	8,5	18,1	3,5	19,0	9,5	13,9	9

Для более точного и детального восстановления температурного поля в горно-котловинных ландшафтах Тункинской долины в 2009 г. были установлены дополнительные датчики (термохроны) как на уже исследуемом склоне хр. Тункинские Гольцы, так и на северном макросклоне хребта Хамар-Дабан, который ограничивает Тункинскую котловину с юга, а также в днище котловины. Кроме того, в район исследования включена Мондинская котловина. Осуществляется мониторинг температуры и влажности воздуха, температуры почвы на глубине 40 см.

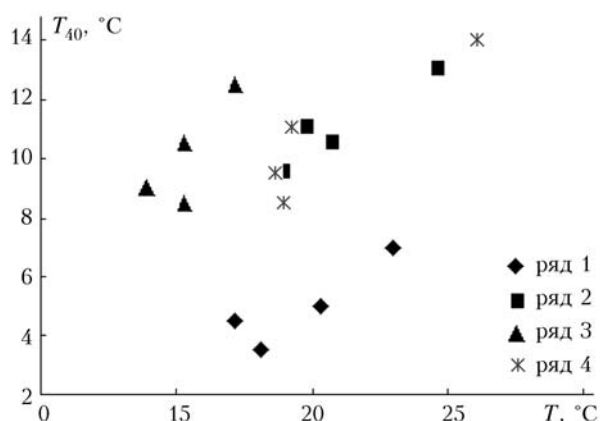


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности  $T$  и температуры почвы на глубине 40 см ( $T_{40}$ ). Ряд 1–3 — июнь–август 2009 г., ряд 4 — июль 2008 г.

На данный момент на территории Тункинской котловины расположено 20 площадок на высоте от 806 до 2119 м. На территории Мондинской котловины — 12 площадок в высотном интервале от 1300 до 2325 м. Датчики в котловинах установлены в таком порядке, что образуют так называемое поперечное сечение от правого до левого борта котловин (рис. 3) и охватывают наибольшее количество различных типов ландшафтов, представленных на территории: гольцовые, подгольцовые, горнотаежные лиственничные, подгорные лиственнично-кедровые и сосновые, лугово-болотные и лугово-степные ландшафты, а также антропогенно-нарушенные участки.

Одновременно с климатическими наблюдениями на территории проводятся комплексные ландшафтные исследования. Создана геоинформационная система территории исследования, содержащая

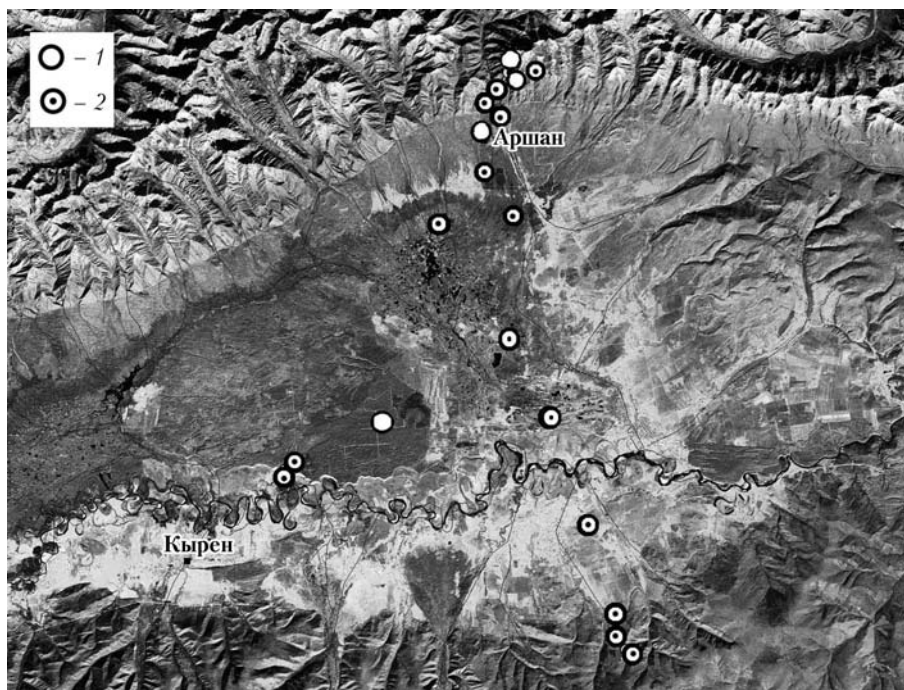
топографические карты, цифровую модель рельефа (SRTM), разновременные космические снимки Landsat-5, -7, SPOT-4, а также имеющиеся мелко-масштабные геологические и ландшафтные карты территории.

Сделаны комплексные ландшафтные описания более 100 точек. Описания проводились по специально разработанным формам, включающим основные характеристики компонентов геосистем: литогенной основы, почв, растительности. Основной акцент поставлен на количественные характеристики. В ходе натурных исследований и геоинформационного анализа территории выделены основные видоизменяющие факторы и соответствующие им факторально-динамические ряды, создана ландшафтная карта территории (М1:100 000). Это позволяет исследовать климатические особенности территории в контексте ландшафтного подхода.

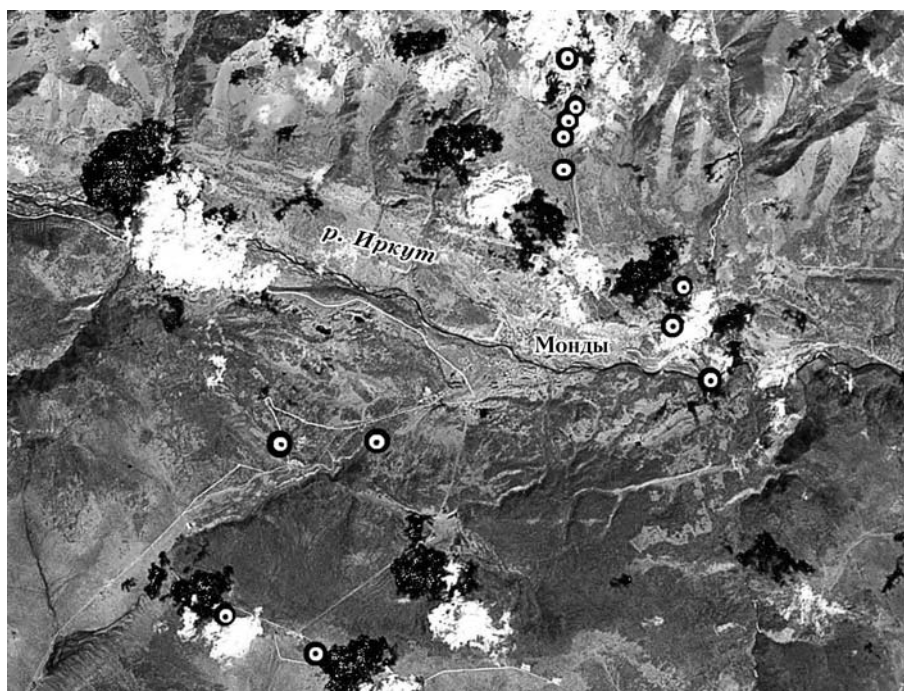
Используемый в настоящей статье метод восстановления температурного поля основан на том, что на космических снимках в дальнем инфракрасном (тепловом) диапазоне фиксируется собственное излучение земной поверхности  $E$ . По закону Стефана–Больцмана  $E$  прямо пропорционально температуре поверхности  $T$  (с коэффициентом пропорциональности  $k$ ) и излучательной способности объекта  $e$ .

В работе при вычислении температуры не учтены различия излучательной способности конкретных ландшафтов, а также особенности  $k$  для различных снимков. Расширение сети наземных наблюдений на исследуемой территории позволит более точно и детально восстановить температурное поле земной поверхности, создать единый алгоритм вычисления температуры воздуха и почвы по характеристикам яркости снимка, с индивидуальными коэффициентами для каждого местоположения и момента времени.

В перспективе для изучения сезонных изменений теплообмена между атмосферой и почвой, а также в почвенной толще в разных ландшафтах планируется увеличить количество экспериментальных площадок, расширить перечень климатических характеристик, подключив измерение температуры и влажности на поверхности почвы и на стандартных глубинах (2, 5, 10, 15 см и т.д.), характеристик снежного покрова, радиационного режима и др.



а



б

Рис. 3. Расположение ключевых участков на территории Тункинской (а) и Мондинской (б) котловин: 1 – датчики, установленные в 2007 г., 2 – в 2009 г.

1. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата.* М., Росгидромет, 2008.
2. *Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств* / Ред. Н.П. Ладейщиков. Новосибирск: Наука, 1977. 272 с.
3. *Башалханова Л.Б., Буфал В.В., Русанов В.И.* Климатические условия освоения котловин Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1989. 159 с.
4. *Сухова М.Г., Русанов В.И.* Климаты ландшафтов Горного Алтая и их оценка для жизнедеятельности человека. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 150 с.
5. *Севастьянов В.В.* Климатические ресурсы Горного Алтая и их прикладное использование. Томск: Изд-во ТГПУ, 2009. 252 с.
6. *Данько Л.В., Истомина Е.А.* Постановка комплексных полевых исследований пространственной структуры геосистем с использованием ГИС технологий //

- XIII Научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока: Тр. конференции. Т. 1. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. С. 133–134.
7. *Михеев В.С., Ряшин В.А.* Ландшафты юга Восточной Сибири (Карта м-б 1:1500000). М.: ГУГК, 1977. 4 с.
  8. *Трофимова И.Е.* Методические приемы оценки реакции термического режима почвы на современные изменения климата // Шестое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск: Изд-во «КЦ», 2005. С. 184–187.
  9. *Коломьц Э.Г.* Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
  10. *Наставления* гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 308 с.
  11. *Соловьев В.И., Успенский А.Б.* Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорол. и гидрол. 2010. № 3. С. 5–17.
  12. *Конвертация* данных Landsat TM/ETM+ в значения температуры. <http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>
  13. *Смагин А.В., Глаголев М.В.* Использование программируемых электронных датчиков «термохрон» и «гигрохрон» для скрытого мониторинга гидротермических характеристик почв и сопредельных сред // Материалы Шестого Сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу. Томск: Изд-во «КЦ», 2005. С. 438–442.
  14. *Помазкова Н.В., Войта Л.Л., Чернова О.А., Бондаревич Е.А.* Об изучении термического режима склонов в условиях Забайкалья // Динамика геосистем и оптимизация природопользования. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2010. С. 170–182.
  15. *Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А.* Временная и пространственная изменчивость температуры торфяной почвы // Динамика геосистем и оптимизация природопользования. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2010. С. 86–88.
  16. *Густокашина Н.Н., Максютова Е.В.* Атмосферное увлажнение степной и лесостепной зоны юга Восточной Сибири за вегетационный период // География и природные ресурсы. Спецвыпуск. Новосибирск: ГЕО, 2004. С. 292–296.

*N.N. Voropai, E.A. Istomina, O.V. Vasilenko. Investigation of temperature field of land surface of Tunkinskaya bolson using Landsat space images.*

In 2007, the microclimate studies of the soil temperature regime of key areas of Tunkinskaya bolson (the Republic of Buryatia) were started. The choice of key areas was made, taking into account the characteristics of relief and altitudinal belts of intermountain bolsos. The series of the Landsat space images were used for extrapolation of data of point observations and for reconstruction of the temperature field of the land surface. Linear correlation coefficient between calculated temperatures of the land surface and temperatures of the soil for each time moment is more than 0.9.