

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 551.50

DOI: 10.15372/GIPR20220407

**О.В. ВАСИЛЕНКО\*, Н.Н. ВОРОПАЙ\*,\*\***

\*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033,  
Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, oksa\_na85@mail.ru

\*\*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия, voropay\_nn@mail.ru

### АВТОМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ГОРНО-КОТЛОВИННЫХ ЛАНДШАФТАХ ПРИБАЙКАЛЯ

*Оценка корректности использования автоматических термографов DS1922L-F5 и термогигрографов DS1923-F5 для мониторинга температуры и относительной влажности воздуха в горно-котловинных ландшафтах проведена путем сравнения данных, полученных при использовании логгеров и стандартных психрометрических термометров, установленных на метеорологической станции Тунка (Республика Бурятия). Анализ выполнен с помощью стандартных статистических методов. Различия между показаниями приборов не превышают инструментальную погрешность измерения срочных температур воздуха (0,1 °C) в 75 % случаев, погрешность измерений относительной влажности (5 %) — в 98 %. При анализе средних суточных характеристик эти диапазоны увеличиваются до 80 и 100 % случаев соответственно. Коэффициенты корреляции между рядами данных измерения стандартными метеорологическими приборами и логгерами во всех случаях выше 95 %. В результате исследования сделан вывод о корректности использования указанных приборов при микроклиматическом мониторинге. Измерения температуры и влажности воздуха проводятся на 56 модельных площадках начиная с 2007 г. синхронно с наблюдениями на метеорологических станциях Росгидромета. На основе полученных данных описаны особенности температурного режима и режима относительной влажности в горно-котловинных ландшафтах Юго-Западного Прибайкалья (Тункинская и Мондинская котловины). Показаны статистически значимые различия температур воздуха и влажности на склонах и днище каждой из котловин в отдельные месяцы и за год, а также различия температурного режима между котловинами, обусловленные строением, площадью, относительной высотой и коэффициентом котловинности. В средних годовых значениях разности температур между аналогичными формами рельефа в двух котловинах составляют около 2 °C. Такой же порядок микроклиматических разностей между склонами в каждой из котловин.*

**Ключевые слова:** термогигрографы, валидация данных, микроклимат, мониторинг, горно-котловинные ландшафты.

**O.V. VASILENKO\*, N.N. VOROPAY\*,\*\***

\*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, oksa\_na85@mail.ru

\*\*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, pr. Akademicheskii, 10/3, Russia, voropay\_nn@mail.ru

### AUTOMATIC MONITORING OF AIR TEMPERATURE AND HUMIDITY IN MOUNTAIN-DEPRESSION LANDSCAPES OF CISBAIKALIA

*An assessment was made of the correctness of using automatic thermographs DS1922L-F5 and thermohygrometers DS1923-F5 in monitoring air temperature and relative humidity in mountain-depression landscapes by comparing data obtained with loggers and standard psychrometric thermometers installed at the Tunka weather station (Republic of Buryatia). A comparative analysis was carried out by using standard statistical methods. It was found that the differences in the readings of the instruments do not*

exceed the instrumental error of temperature measurement ( $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in 75 % of cases, and the error in relative humidity measurements (5 %) in 98 % of cases. In analyzing the daily average values, these ranges increase to 80 and 100 % of cases, respectively. The correlation coefficients between data obtained by standard meteorological instruments and compact automatic loggers are higher than 95 % both for temperature and for humidity. Based on the results of the study, the conclusion was drawn regarding the correctness of the use of these instruments in microclimate monitoring. Since 2007, air temperature and humidity measurements have been made at 56 model sites, synchronously with observations at weather stations of Roshydromet. The peculiarities of the temperature regime and the regime of relative humidity of the mountain-depression landscapes of the South-Western Cisbaikalia (Tunka and Mondy depressions) were described. Statistically significant differences in air temperatures on the slopes and at the bottom of each of the depressions in individual months and over a year, and also the differences in the temperature regime between the depressions, due to the structure, area, relative height and depressions coefficient, are shown. In average annual values, the temperature difference between similar landforms in two depressions is about  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The same order of magnitude is shown by the microclimatic differences between the slopes in each of the depressions.

**Keywords:** *thermohygrographs, data validation, microclimate, monitoring, mountain-depression landscapes.*

## ВВЕДЕНИЕ

Климатические изменения в последние десятилетия достигли значительных темпов и масштабов [1, 2]. Глобальный характер колебаний климатической системы необходимо учитывать при решении множества проблем устойчивого развития, а сами тенденции изменчивости являются предметом специального рассмотрения для ученых различных научных направлений [3–6]. Вариации состояния климатической системы обусловлены рядом природных и антропогенных факторов, степень влияния которых зависит от множества физико-географических, социально-экономических характеристик и имеет неоднородный характер пространственного и сезонного распределения. В результате изменение климатического режима наблюдается в широком диапазоне метеорологических элементов. Кроме того, изменчивость метеопараметров имеет сложную пространственную и временную структуру. Неоднородность распределения климатических трендов в глобальном масштабе и по территории России подтверждена множеством авторов, например в [7–9]. Для решения социально-экономических задач и планирования устойчивого развития обширной территории Российской Федерации необходимо в полной мере понимать причины климатических изменений в различных природно-географических условиях [10, 11]. В связи с этим региональный мониторинг компонентов климата с высоким пространственным разрешением является неотъемлемой частью фундаментальных исследований глобальных климатических изменений и разработки стратегии адаптации к новым условиям окружающей среды.

В настоящее время в России мониторинг характеристик климата проводится в рамках Глобальной системы наблюдения за климатом (ГСН), обеспечивающей измерение многочисленных параметров атмосферы для решения широкого спектра задач. Основные составляющие ГСН включают сеть наземных метеорологических, аэрологических и радиолокационных наблюдений; систему морских и аэрокосмических наблюдений. Перечисленные компоненты ГСН имеют свои преимущества, а также ограничения, ошибки и неточности. Кроме того, плотность метеорологической сети недостаточна для изучения климатических изменений регионального масштаба. Также затруднения вызывают погрешности различных современных систем наблюдения, которые зависят от методов измерения, используемых приборов, состояния атмосферы, времени суток и условий подстилающей поверхности. В результате возникает необходимость расширения сети мониторинга метеопараметров, особенно на региональном уровне, и более масштабного привлечения данных альтернативных систем наблюдения. К их числу можно отнести данные спутниковых систем наблюдения за климатом, математического моделирования, а также натурных наблюдений с использованием современных автоматических измерительных приборов и комплексов.

Особенно важной проблема привлечения данных альтернативных систем наблюдения за климатом становится в рамках исследования климатических изменений горных районов. В условиях горно-котловинного рельефа под влиянием множества факторов (широта и высота местности, локальные особенности топографии, условия подстилающей поверхности и пр.) распределение метеорологических элементов может варьировать в значительном диапазоне. В результате невозможно обобщать данные наблюдений за климатическими параметрами в отдельных пунктах без дополнительной проверки, добавочных данных и детального анализа. Этот факт существенно затрудняет анализ особенностей метеорологического режима и изменений климата горных районов [12, 13]. При этом заметно возрастает актуальность современных комплексных исследований горных районов [14–16].

В рамках комплексных географических работ на Тункинском котловинном стационаре Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН успешно реализованы климатические исследования с исполь-

зованием автоматического метеорологического оборудования. Проводятся работы по выявлению пространственных и временных особенностей распределения климатических характеристик в горно-котловинных ландшафтах и изучению факторов их формирования [17].

Цель данной работы — валидация данных автоматических термографов и термогигрографов, используемых в качестве альтернативы стандартным метеорологическим приборам, и обоснование корректности их применения для организации комплексного мониторинга метеопараметров высокогорного временного и пространственного разрешения в условиях горно-котловинных ландшафтов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования расположена в пределах юго-западной части Байкальской рифтовой зоны в Южно-Сибирской физико-географической области и представлена Тункинской ветвью межгорных котловин. В работе подробно рассмотрены материалы, полученные в Тункинской и Мондинской котловинах.

На зональные черты климата этого региона накладывается влияние местных факторов, что существенно усложняет организацию метеорологических наблюдений и анализ климатического режима этого района. Особенности микроклимата формируются в результате взаимодействия циркуляционных, радиационных факторов и свойств подстилающей поверхности. Сложный рельеф территории и индивидуальные геоморфологические условия способствуют формированию уникального микроклимата разных ландшафтов межгорных котловин Тункинской ветви. В настоящее время информация о режиме основных элементов климата поступает в результате наблюдений довольно редкой сети метеорологических станций и постов. Станции, по данным которых возможен анализ метеорологического режима территорий со сложным рельефом, расположены преимущественно в долинах рек, на равнинных, открытых участках, высота которых не превышает средней высоты днищ котловин.

На территории Тункинской и Мондинской котловин в разное время было организовано пять метеостанций. Первой, в 1888 г., Восточно-Сибирским отделением РГО была создана станция Тунка. С момента открытия и до 1932 г. данные с нее имеют существенные пробелы, так как метеоплощадка станции многократно переносилась. В настоящее время метеоплощадка станции Тунка расположена в центральной части Тункинской котловины, на высоте 721 м над ур. моря. В 1910 г. начала работу станция Аршан. Метеоплощадка располагалась у подножия хр. Тункинские Гольцы, на высоте 885 м над ур. моря. Метеоинформация со станции Аршан доступна до 1997 г., после она закрылась. В сентябре 1947 г. начала работу станция Кырен, расположенная в долине р. Иркут на абсолютной высоте 755 м над ур. моря. Информацию о метеорологическом режиме Мондинской котловины можно получить по данным с метеостанции Монды, которая была открыта в 1900 г. и работает по настоящее время. Метеоплощадка станции Монды находится на высоте 1303 м над ур. моря, в верхнем течении Иркуты.

Единственная станция Восточного Саяна, по данным которой возможно анализировать особенности высокогорного климата Тункинской ветви котловин, — это станция Ильчир, которая была открыта Иркутской магнитно-метеорологической обсерваторией в 1930 г. на высоте 2083 м над ур. моря. Здесь проводились наблюдения и обрабатывались данные о метеорологических условиях в течение 59 лет, в 1989 г. станция была закрыта [18].

Таким образом, данные с указанных станций на сегодня не дают представления о режиме метеоэлементов в преобладающих здесь высокогорных формах рельефа. Для мониторинга климатических характеристик на локальном уровне в Тункинской и Мондинской котловинах сотрудниками ИГ СО РАН организовано 58 модельных площадок, на которых были установлены автоматические термографы и термогигрографы (устройства семейства iButton Data Loggers) с корпоративным обозначением DS1922L-F5 и DS1923-F5 соответственно. Площадки наблюдения расположены таким образом, чтобы полученные данные характеризовали климатический режим основных типов ландшафтов, представленных на территории, с учетом особенностей рельефа и высотной поясности. В Тункинской котловине расположено 46 площадок в интервале высот от 718 до 2119 м, в Мондинской — 12 площадок в интервале высот от 1264 до 2325 м. Измерения основных характеристик фиксируются круглогодично с 2007 г. с интервалом в три часа, синхронно с измерениями на сети метеорологических станций Росгидромета.

Термограф (термогигрограф) представляет собой автономное малогабаритное энергозависимое электронное устройство для измерения температуры и относительной влажности окружающей среды. Устройство накапливает данные измерений и сохраняет во встроенной памяти. Значения температу-

ры воздуха фиксируются регистратором в диапазоне от  $-40$  до  $85$  °С. Точность измерения температуры составляет  $0,0625$  °С при погрешности  $\pm 0,5$  °С, заявленной производителем. Для относительной влажности интервал регистрируемых значений составляет  $0-100$  %, с точностью измерений до  $0,64$  % и погрешностью  $\pm 5$  % [19].

На сегодня электронные автоматические регистраторы являются выгодной альтернативой существующим инструментам мониторинга состояния окружающей среды [20–25]. Возможность измерения температуры и относительной влажности воздуха в различных средах и физических условиях, хранение значительного массива информации в памяти прибора, регистрация данных с регулируемой частотой и малогабаритные размеры позволяют успешно использовать автоматические датчики для множества задач современной науки [26–30]. Несмотря на использование термографов и термогигрографов в решении широкого спектра задач, исследователями предварительно не проводится сравнение фиксируемых регистратором данных с результатами измерений стандартными метеорологическими приборами, что может ставить под сомнение корректность полученных результатов. Таким образом, для применения автоматических термографов и термогигрографов необходимо провести валидацию данных с датчиков.

Для подтверждения корректности использования термографа (термогигрографа) и репрезентативности полученных данных проведен сравнительный анализ рядов температуры и относительной влажности воздуха по результатам наблюдения с помощью автоматического оборудования, установленного в психрометрической будке, и психрометрической пары на метеостанции Тунка (Республика Бурятия) в период с октября 2011 г. по июнь 2015 г. Количество сроков наблюдения, за которые сравнивались значения температуры, составляет 7910, относительной влажности — 1849. Термограф и термогигрограф были запрограммированы на измерения в метеорологические сроки синхронно с измерением температуры и относительной влажности воздуха стандартными метеорологическими приборами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Результаты валидации данных термографов и термогигрографов.** В ходе сравнительной оценки данных измерения термографами (термогигрографами) и измерений, проводимых на метеостанции Тунка, получены следующие результаты.

Ряды срочных значений температуры и относительной влажности воздуха не отвечают закону нормального распределения по результатам теста Колмогорова–Смирнова (рис. 1). Значения критерия Колмогорова–Смирнова для рядов температуры воздуха, полученных с помощью автоматического регистратора, составляют  $0,064$  ( $p < 0,01$ ), психрометрического термометра —  $0,062$  ( $p < 0,01$ ). При анализе рядов относительной влажности воздуха эти критерии равны  $0,098$  и  $0,076$  ( $p < 0,001$ ) соответственно. Полученные данные значительно превышают критическое значение критерия. Следовательно, при сравнении рядов должны быть использованы непараметрические статистические методы.

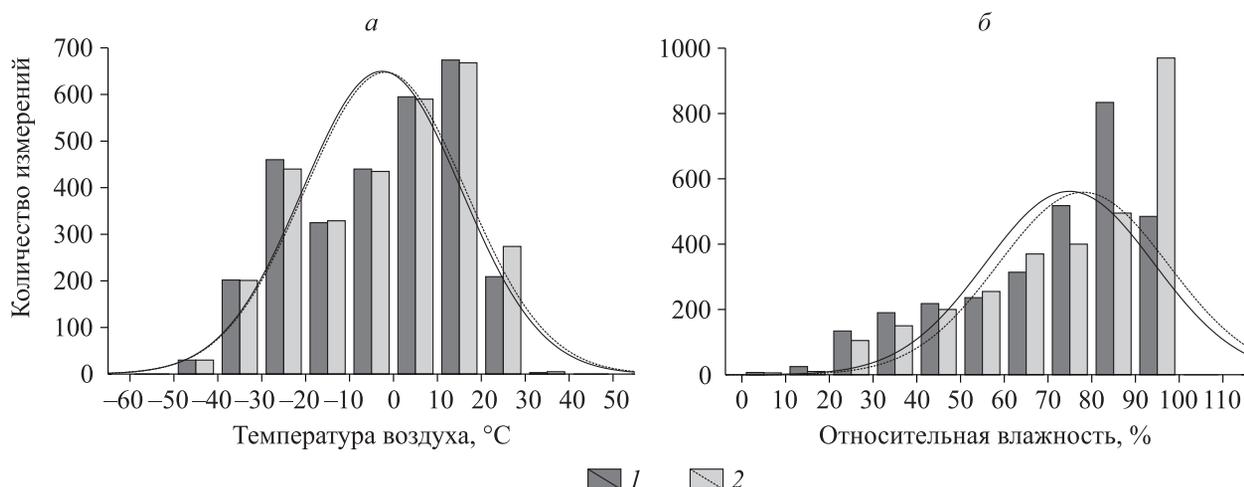


Рис. 1. Распределение значений температуры и относительной влажности воздуха, полученных по данным измерения психрометрическим термометром (1) и термографом (DS1922L-F5) / термогигрографом (DS1923-F5) (2).

Между медианными значениями рядов срочной температуры воздуха, полученных с помощью автоматического термографа и психрометрического термометра, отсутствуют статистически значимые ( $p < 0,05$ ) различия (по результатам теста Манна–Уитни ( $U = 62\ 317$ ) и дисперсионного анализа (тест Крускала–Уоллиса ( $H = 0,788$ )). Результаты тестов указывают на принадлежность выборок к одной генеральной совокупности. Таким образом, данные автоматического термографа и термометра, установленных в психрометрической будке на метеостанции Тунка, отражают единый процесс, который зависит от одного комплекса физических условий.

Средняя разность срочной температуры воздуха, полученной с помощью автоматического термографа, и данных измерений психрометрическим термометром составляет  $0,2\ ^\circ\text{C}$ , при стандартном отклонении разности до  $0,5\ ^\circ\text{C}$ . За весь период наблюдений изменение разности отмечено в пределах от  $-3,0$  до  $3,5\ ^\circ\text{C}$ . Разность срочных значений температуры воздуха, по данным измерений автоматическим термографом и психрометрическим термометром метеостанции Тунка в течение года, в 75 % измерений не превышает инструментальную погрешность, указанную производителем ( $\pm 0,5\ ^\circ\text{C}$ ), а в 93 % погрешность составляет  $\pm 1\ ^\circ\text{C}$  (табл. 1, рис. 2, а).

Разность средних суточных значений температуры воздуха, по данным показаний автоматического термографа и термометра, установленных в психрометрической будке, за весь период наблюдений изменяется от  $-0,6$  до  $0,8\ ^\circ\text{C}$ , при максимальной величине стандартного отклонении  $0,2\ ^\circ\text{C}$  (табл. 2). Погрешность данных средней суточной температуры, полученной посредством измерений автоматическим термографом, преимущественно имеет положительный знак. В 80 % наблюдений погрешность на превышает  $0,4\ ^\circ\text{C}$  (см. рис. 2, б). При анализе средних суточных температур выявляется систематическая ошибка в показаниях термографа ( $0,2\ ^\circ\text{C}$ ), при устранении которой разность между показаниями термографа и психрометрического термометра в 97 % случаев не превышает  $\pm 0,4\ ^\circ\text{C}$ . Данная погрешность находится в пределах точности измерения автоматического термографа.

Коэффициент корреляции между рядами срочных значений температуры, измеренной автоматическим термографом и термометром, установленными в психрометрической будке, составил 0,95. Для средних суточных значений температуры коэффициент корреляции равен 0,96.

Таблица 1

Разность срочных значений температуры воздуха, полученных по данным измерения термографом (D1922L-F5) и психрометрическим термометром на метеостанции Тунка (октябрь 2011 г. – июнь 2015 г.)

Характеристика	Диапазон температур, $^\circ\text{C}$								
	-45÷-35	-35÷-25	-25÷-15	-15÷-5	-5÷5	5-15	15-25	25-35	-45÷35
Количество измерений	153	814	1222	904	944	1092	744	130	6003
Средняя разность температур, $^\circ\text{C}$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
Стандартное отклонение, $^\circ\text{C}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Максимум, $^\circ\text{C}$	1,8	3,1	3,2	3,2	2,5	3,5	2,0	1,1	3,5
Минимум, $^\circ\text{C}$	-1,0	-1,9	-2,6	-2,7	-2,9	-2,1	-2,8	-1,3	-3,0

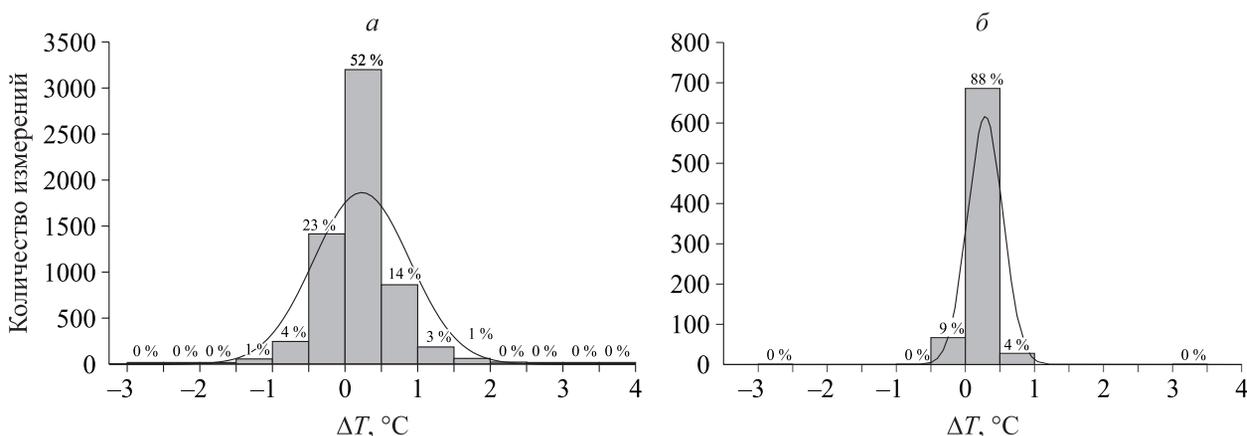


Рис. 2. Распределение разностей срочных (а) и средних суточных (б) значений температуры воздуха, полученных по данным измерения термографом (DS1922L-F5) и психрометрическим термометром на метеостанции Тунка.

Таблица 2

Разность средних суточных значений температуры воздуха, полученных по данным измерения термографом (DS1922L-F5) и психрометрическим термометром на метеостанции Тунка (октябрь 2011 г. – июнь 2015 г.)

Характеристика	Диапазон температур, °С								
	-45÷-35	-35÷-25	-25÷-15	-15÷-5	-5÷5	5-15	15-25	25-35	-45÷35
Количество измерений	8	106	171	113	110	161	107	—	776
Средняя разность температур, °С	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	—	0,2
Стандартное отклонение, °С	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	—	0,2
Максимум, °С	0,3	0,5	0,6	0,8	0,6	0,8	0,7	—	0,8
Минимум, °С	-0,3	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	—	-0,6

Примечание. Здесь и в табл. 3: прочерк – данные для указанного диапазона температур отсутствуют.

**Результаты валидации данных термогигрографов.** Заявленная производителем погрешность регистрации относительной влажности при 2-байтном сохранении результатов составляет ±5 % при измерении в температурном диапазоне от -20 до 85 °С. При температуре воздуха ниже -20 °С измерения относительной влажности не прекращаются, однако, согласно результатам наших исследований, показания термогигрографа выше данных гигрометра: в среднем отклонение составляет 12 %, при этом в основном (в 94 % случаев) отклонения выше предела погрешности регистрации, а в 55 % случаев находятся в диапазоне 10–15 %.

При анализе рядов наблюдения за относительной влажностью воздуха при температурах от -20 до 85 °С обнаружена систематическая погрешность в данных, фиксируемых термогигрографом. Для срочных значений она составила 6 %, для средних суточных значений – 8 % (рис. 3, а, б). При этом в диапазон отклонений -5 ÷ 15 % попадает 93 % измерений по данным срочных наблюдений, 100 % – по средним суточным данным. После введения поправки на систематическую погрешность в рядах значений относительной влажности, полученных при использовании электронных самописцев и стандартных метеорологических приборов, отсутствуют статистически значимые различия между медианными значениями и дисперсией как срочных, так и средних суточных величин (тест Манна–Уитни, тест Крускала–Уоллиса).

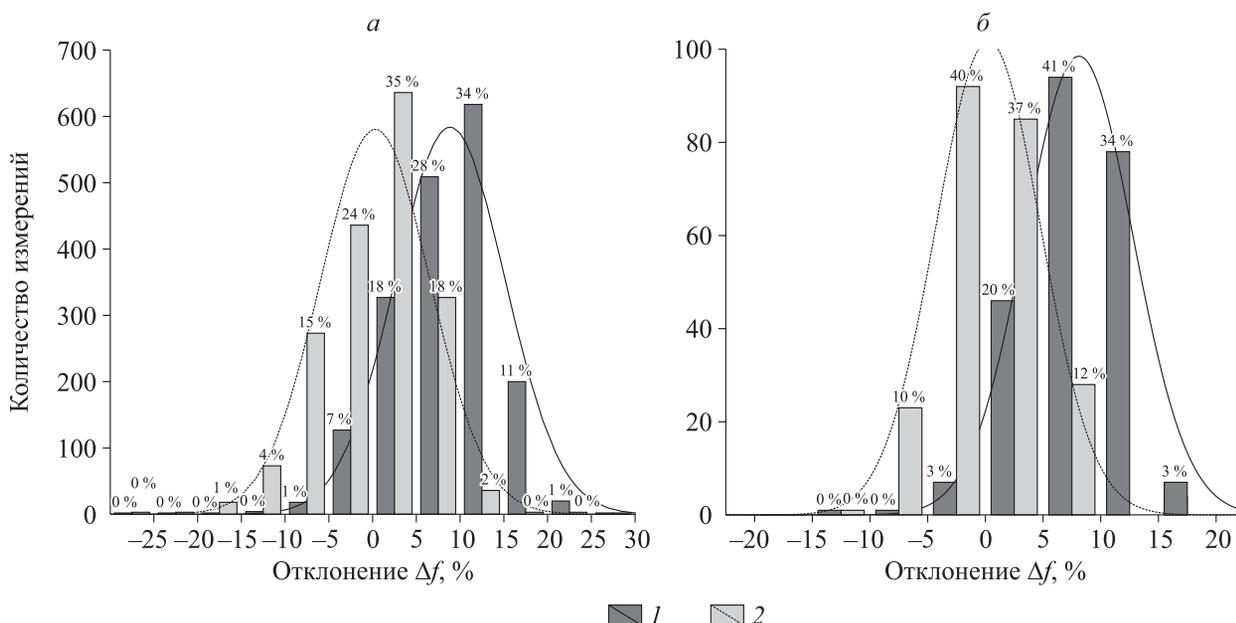


Рис. 3. Распределение разностей срочных (а) и средних суточных (б) значений относительной влажности воздуха, полученных по данным измерения термогигрографом (DS1923-F5) и психрометром на метеостанции Тунка до коррекции (1) и после коррекции (2).

Разность средних суточных значений относительной влажности воздуха, измеренных термогигрографом (DS1923-F5) и психрометром на метеостанции Тунка (октябрь 2011 г. – июнь 2015 г.)

Количество измерений	Диапазон влажности, %	Отклонение, %					
		до коррекции			после коррекции		
		среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
Диапазон температур от –40 до –20 °С							
–	0–20	–	–	–	–	–	–
–	21–40	–	–	–	–	–	–
2	41–60	19	18	20	11	10	12
239	61–80	12	–25	22	4	–33	14
407	81–100	12	–16	19	4	–24	11
Диапазон температур от –20 до 0 °С							
–	0–20	–	–	–	–	–	–
4	21–40	12	1	17	4	–7	9
90	41–60	10	–2	29	2	–10	21
283	61–80	9	–6	21	1	–14	13
297	81–100	4	–5	14	–4	–13	–6
Диапазон температур от 0 до 20 °С							
10	0–20	8	–3	15	0	–11	7
100	21–40	8	–7	26	0	–15	18
150	41–60	8	–8	25	0	–16	17
102	61–80	5	–13	17	–3	–21	9
99	81–100	0	–22	12	–8	–30	4
Диапазон температур от 20 до 40 °С							
10	0–20	6	0	12	–2	–8	4
29	21–40	6	–2	16	–2	–10	8
6	41–60	4	–2	15	–4	–10	7
3	61–80	–1	–3	1	–9	–11	–7
1	81–100	4	4	4	–4	–4	–4

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между рядами составляет 0,96 для обеих выборок. В интервал отклонений  $\pm 5\%$  (погрешность термогигрографа) попадают 68 % результатов срочных наблюдений и 86 % средних суточных значений за период исследования. В диапазоне  $\pm 10\%$  (погрешность психрометра) в этом случае оказались 98 и 100 % соответственно (табл. 3).

Таким образом, результаты сравнительной оценки данных измерений термографами (термогигрографами) и измерений стандартными метеорологическими приборами показали, что при использовании указанных приборов мы можем получить корректные данные, отражающие метеорологический режим территории, и существенно расширить возможности мониторинга природно-климатических процессов, в том числе в труднодоступных горных районах.

**Анализ режима температуры воздуха на территории Тункинской и Мондинской котловин.** В качестве примера использования данных, полученных с помощью автоматических термогигрографов, далее приведен анализ изменения температуры воздуха на территории Тункинской и Мондинской котловин. Работа выполнена на основе срочных измерений за 2009–2019 гг. с периодичностью наблюдений каждые три часа.

Расположение площадок наблюдения с установленными автоматическими датчиками образует профиль, включающий центральную часть (днище котловины) и склоны южной (хр. Тункинские Гольцы) и северной ориентации (хр. Хамар-Дабан). Таким образом, расположение и количество площадок наблюдения позволяют получить актуальную информацию о режиме температуры воздуха с учетом сложности местного рельефа и ландшафтных характеристик территории.

На первом этапе исследования были рассчитаны критерии Колмогорова–Смирнова (проверка рядов температуры воздуха на нормальность) и *F*-критерий Фишера (равенство дисперсий). Исходя из оценок *t*-критерия Стьюдента для рядов с нормальным распределением и *U*-критерия Манна–Уит-

Статистические критерии рядов средней суточной температуры воздуха за 2009–2019 гг.

Месяц	Критерий Колмогорова–Смирнова						<i>F</i> -критерий Фишера			<i>t</i> -критерий Стьюдента			<i>U</i> -критерий Манна–Уитни		
	Тункинская			Мондинская											
	С	Ю	Д	С	Ю	Д	С	Ю	Д	С	Ю	Д	С	Ю	Д
I	0,064	0,054	<b>0,119</b>	0,041	0,042	0,041	1,10	1,05	1,23	-2,0	1,8	–	–	–	12140
II	0,052	0,069	0,066	0,078	0,065	0,053	1,40	1,14	1,59	0,9	3,2	-4,0	–	–	–
III	<b>0,089</b>	0,073	0,055	0,069	0,064	0,062	1,31	1,21	1,31	–	3,7	0,2	17248	–	–
IV	0,070	0,060	0,068	0,050	0,051	0,060	1,04	1,20	1,18	6,0	4,0	3,3	–	–	–
V	0,060	0,053	<b>0,087</b>	0,053	0,050	0,061	1,04	1,20	1,18	7,0	4,3	–	–	–	17276
VI	0,071	0,077	0,049	<b>0,087</b>	0,067	<b>0,108</b>	1,14	1,26	1,00	–	5,7	–	18387	–	17529
VII	0,050	0,051	0,040	0,057	0,054	0,040	1,06	1,20	1,31	11,2	7,5	9,7	–	–	–
VIII	0,073	0,053	0,072	0,046	0,048	0,054	1,15	1,29	1,14	8,9	6,8	6,7	–	–	–
IX	0,061	0,052	0,079	0,071	0,043	<b>0,103</b>	1,11	1,09	1,19	6,1	5,0	–	–	–	17001
X	0,059	0,074	0,059	0,068	0,073	0,070	1,07	1,00	1,37	4,0	3,6	1,7	–	–	–
XI	0,063	0,062	<b>0,084</b>	0,052	0,050	0,049	1,26	1,06	1,12	0,9	3,5	–	–	–	13865
XII	<b>0,118</b>	0,071	0,061	0,058	<b>0,083</b>	0,052	1,05	1,12	1,35	–	–	-6,2	13759	17623	–

Примечание. С – северный склон, Ю – южный склон, Д – днище котловины. Жирным шрифтом выделены значения критерия Колмогорова–Смирнова для рядов, не соответствующих закону нормального распределения ( $p < 0,05$ ). Серым цветом выделены ячейки с незначимыми критериями *t* и *U*. Прочерк – данный критерий неприменим.

ни для рядов, не соответствующих нормальному распределению признаков, между склонами и днищем Тункинской и Мондинской котловин наблюдаются статистически значимые различия температурно-го режима ( $p < 0,05$ ) (табл. 4).

Средние годовые температуры воздуха Тункинской котловины имеют отрицательные значения. На склонах северной и южной ориентации средняя годовая температура составляет  $-0,6$  и  $-0,3$  °С соответственно. Средняя годовая температура центральной части значительно ниже и равна  $-1,2$  °С.

Несмотря на небольшую удаленность Мондинской котловины, средние годовые значения температуры здесь существенно ниже. Разность между значениями средней годовой температуры воздуха на северном и южном склонах Тункинской котловины и на склонах Мондинской котловины составляет  $2,1$  и  $2,4$  °С соответственно, центральная часть котловин в средних годовых значениях отличается на  $0,3$  °С (табл. 5).

Наиболее холодный месяц на территории котловин – январь. В Тункинской котловине средняя температура января изменяется от  $-24,7$  °С (центральная часть) до  $-16,6$  °С (южный склон). В Мондинской котловине средняя температура января по территории значительно меньше.

Самый теплый месяц – июль. Средняя месячная температура воздуха над склонами Тункинской котловины  $16,1$  °С (северный склон),  $14,0$  °С (южный склон). Наиболее прогрета в июле центральная часть котловины ( $17,5$  °С). По средним оценкам, температура воздуха самого теплого месяца в Мондинской котловине на  $3$  °С ниже, чем в Тункинской (см. табл. 5). В большинстве случаев полученные разности для склонов и центральной части котловин являются статистически значимыми.

Также данные с автоматических регистраторов показали, что в теплое время года температура над склонами котловины не превышает  $36,5$  °С – абсолютный максимум на склоне южной ориентации Тункинской котловины. Абсолютный максимум температуры воздуха в центральной части котловины –  $40,9$  °С. Соответствующие характеристики температурного режима воздуха для теплого периода года в Мондинской котловине в среднем на  $7$  °С ниже и отмечены в более ранние сроки. В центральной части Тункинской котловины абсолютный минимум температуры составляет  $-41$  °С (центральная часть), над склонами достигает  $-33,5$  °С (северный) и  $-37$  °С (южный).

На территории Мондинской котловины абсолютный минимум составляет  $-35$  °С на склонах северной и южной экспозиции. Показатели абсолютных минимумов температуры в Тункинской и Мондинской котловинах в среднем различаются на  $2$  °С (см. табл. 5).

Выявленные различия параметров температуры в четыре раза и более превышают инструментальную погрешность используемых для мониторинга приборов.

Температура воздуха в Тункинской и Мондинской котловинах за 2009–2019 гг., °С

Месяц	Тункинская котловина				Мондинская котловина			
	Метеостанция Тунка	С	Ю	Д	Метеостанция Монды	С	Ю	Д
Январь	-24,2	-21,1	-16,6	-24,7	-22,0	-20,0	-17,7	-20,8
Февраль	-23,5	-17,2	-14,5	-20,3	-22,5	-17,8	-16,7	-17,6
Март	-12,2	-6,4	-6,2	-7,3	-12,3	-9,0	8,7	-7,5
Апрель	-1,8	3,6	1,7	4,0	-4,1	-0,2	-1,0	2,2
Май	8,7	8,4	6,1	9,1	6,1	4,6	3,5	7,4
Июнь	14,6	14,7	12,6	15,6	12,8	10,9	9,7	13,0
Июль	18,7	16,1	14,0	17,5	14,4	12,4	11,2	14,6
Август	14,9	14,4	13,1	15,5	11,8	11,0	10,1	13,2
Сентябрь	8,3	7,5	7,0	8,0	6,7	4,3	3,9	5,7
Октябрь	-1,3	0,3	0,3	-0,1	-0,7	-2,0	-1,9	-1,0
Ноябрь	-17,1	-10,0	-7,9	-11,6	-7,5	-10,6	-10,3	-10,7
Декабрь	-23,7	-18,2	-13,9	-21,9	-18,1	-17,3	-15,3	-17,2
Годовая	-3,2	-0,6	-0,3	-1,2	-3,6	-2,7	-2,7	-1,5
Абс. максимум, °С (месяц, высота над ур. моря, м)	32,6 (август, 721)	33,0 (июль, 1192)	36,5 (август, 964)	40,9 (август, 736)	35,0 (июнь, 1303)	33,0 (июнь, 1867)	28,0 (июнь, 1995)	34,0 (июнь, 1264)
Абс. минимум, °С (месяц, высота над ур. моря, м)	-40,1 (декабрь, 721)	-33,5 (декабрь, 1192)	-37 (декабрь, 1968)	-41 (декабрь, 739)	-36,5 (февраль, 1303)	-35 (февраль, 1867)	-35 (декабрь, 2325)	-38,6 (декабрь, 1264)

Примечание. С – склон северной экспозиции, Ю – склон южной экспозиции, Д – днище котловины.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматический мониторинг температуры и влажности воздуха позволяет получить корректную информацию о климатическом режиме территорий со сложным рельефом и существенно дополнить сведения о метеорологических условиях горно-котловинных территорий.

Погрешность данных, регистрируемых автоматическим термографом DS1922L-F5, среди средних суточных значений не превышает 0,4 °С в 80 % случаев измерений. Погрешность срочных измерений  $\pm 0,5$  °С отмечена в 75 % наблюдений.

В процессе исследования установлено, что после введения поправки на систематическую ошибку в показания термогигрографов DS1923-F5 при измерении относительной влажности воздуха, в интервал отклонений  $\pm 5$  % попадают 68 % результатов срочных наблюдений и 86 % средних суточных значений за период исследования. В диапазон  $\pm 10$  % (погрешность психрометра) – 98 и 100 % значений соответственно.

По данным срочных круглогодичных наблюдений выявлены статистически значимые различия в температурном режиме котловин юго-западного Прибайкалья. По средним годовым значениям наиболее холодными являются склоны Мондинской котловины. Разность температуры воздуха с таковой над склонами Тункинской котловины составляет 2,2 °С. В то же время, благодаря более замкнутому строению, меньшей площади и меньшему коэффициенту котловинности, различия температурного режима склонов и днища Мондинской котловины в январе не превышают 2 °С. В Тункинской котловине разность средней месячной температуры января на склонах и днище составляет 5,8 °С. Кроме того, температурный режим котловин значительно различается по показателям абсолютного максимума – в среднем на 8 °С, значения абсолютного минимума – в среднем на 2 °С.

*Работа выполнена в рамках программы НИР Института географии им. В.Б. Сочавы (СО РАН АААА–А21–121012190059–5) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 20-04-00142А.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L. Land — climate interactions // IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. — 2019 [Электронный ресурс]. — [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/08/05\\_Chapter-2-V3.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/08/05_Chapter-2-V3.pdf) (дата обращения 12.11.2020).
2. Hoegh-Guldberg O., Jacob D., Taylor M., Bindi M., Brown S., Camilloni I., Diedhiou A., Djalante R., Ebi K.L., Engelbrecht F., Guiot J., Hijioka Y., Mehrotra S., Payne A., Seneviratne S.I., Thomas A., Warren R., Zhou G. Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems // IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. — 2018 [Электронный ресурс]. — [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15\\_Chapter3\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Chapter3_Low_Res.pdf) (дата обращения 25.09.2020).
3. Kjellstrom T., Freyberg C., Lemke V., Otto M., Briggs D. Estimating population heat exposure and impacts on working people in conjunction with climate change // International Journ. of Biometeorology. — 2018. — N 62. — P. 291–306. — DOI: 10.1007/s00484-017-1407-0.
4. Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В. Климатические изменения приземных полей атмосферного давления и температуры воздуха в умеренных широтах Северного полушария // Метеорология и гидрология. — 2017. — № 7. — С. 81–93.
5. Reyer C., Otto I.M., Adams S., Albrecht T., Baarsch F., Carlsburg M., Coumou D., Eden A. Climate change impacts in Central Asia and their implications for development // Regional Environmental Change. — 2017. — Vol. 17. — P. 1639–1650. — DOI: 10.1007/s10113-015-0893-z.
6. Бессолицына Е.П., Балязин И.В., Воропай Н.Н. Структура и разнообразие зооценозов почв Тункинской котловины // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 4. — С. 130–138.
7. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Колебания и изменения климата на территории России // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2003. — Т. 39, № 2. — С. 166–185.
8. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: Cambridge University Press, 2014. — 1132 p.
9. Максимова Е.В., Кичигина Н.В., Воропай Н.Н., Балыбина А.С., Осипова О.П. Тенденции гидроклиматических изменений на Байкальской природной территории // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 4. — С. 72–80.
10. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. — М.: Росгидромет, 2014. — С. 18–235.
11. Voropay N.N., Maksyutova E.V., Riazanova A.A. Hydrothermal conditions at the south of East Siberia during the ongoing warming // The Open Access Volume of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2016. — Vol. 48, N 1. — P. 012003.
12. Лурье П.М. Особенности гидрометеорологического режима внутригорных котловин западной и центральной частей Большого Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. — 2016. — Т 8, № 2. — С. 150–159. — DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-150-159.
13. Вангартнер Р., Гуня А.Н. Влияние изменения климата на сток и водное хозяйство горных регионов: опыт и уроки Альп для Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. — 2017. — Т. 9, № 1 (31). — С. 55–64. — DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-1-55-63.
14. Вангартнер Р., Гуня А.Н. Значение гор и необходимость активного участия в международных горных программах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2016. — Т. 8, № 2. — С. 120–126. — DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-120-126.
15. Баденков Ю.П. Жизнь в горах. Природное и культурное разнообразие — разнообразие моделей развития. — М.: ГЕОС, 2017. — 479 с.
16. Воропай Н.Н., Атугова Ж.В., Шуклина Е.С. Многолетняя динамика температуры почвы пирогенно трансформированных геосистем Тункинской котловины (Юго-Западное Прибайкалье) // География и природ. ресурсы. — 2021. — № 2. — С. 132–145.
17. Василенко О.В., Воропай Н.Н. Особенности формирования климата котловин Юго-Западного Прибайкалья // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2015. — № 2. — С. 104–111.
18. Справочник по климату СССР. История и физико-географическое описание метеорологических станций и постов / Ред. Г.И. Арсентьев. — Иркутск: УГМС, 1968. — 340 с.
19. Что такое термохрон? // НТЛ «ЭлИн» (научно-техническая лаборатория «Электронные инструменты») [Электронный ресурс]. — <https://elin.ru/-Thermochron> (дата обращения: 20.04.2017).
20. Lima F.P., Wetthey D.S. Robolimpets: Measuring intertidal body temperatures using biomimetic loggers // Limnology and Oceanography: Methods. — 2009. — N 7. — P. 347–353. — DOI: 10.4319/lom.2009.7.347.
21. Константинов П.Я., Федоров А.Н., Мичурина Т.Н. Использование автоматических регистрирующих устройств (логгеров) для температурного мониторинга многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли. — 2011. — № 1. — С. 23–32.

22. **Коркин С.Е., Кайль Е.К.** Температура грунтов в ландшафтах природного парка «Сибирские увалы» // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2014. — Т. 16, № 1–4. — С. 1209–1213.
23. **Осокин Н.И., Сосновский А.В.** Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности снежного покрова на Западном Шпицбергене // Лед и снег. — 2014. — № 3. — С. 50–58. — DOI: 10.15356/2076-6734-2014-3-50-58.
24. **Smagin A.V., Shnyrev N.A.** Methane fluxes during the cold season: distribution and mass transfer in the snow cover of bogs // Eurasian Soil Science. — 2015. — Vol. 48, N 8. — P. 823–830. — DOI: 10.7868/S0032180X15080080.
25. **Kiselev M.V., Voropay N.N., Cherkashina A.A.** Influence of anthropogenic activities on the temperature regime of soils of the South-Western Baikal region // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — N 381. — P. 012043.
26. **Bell S.C., Heard G.W., Berger L., Skerratt L.F.** Connectivity over a disease risk gradient enables recovery of rainforest frogs // Ecological Applications. — 2020. — N 30. — P. 2152. — DOI: 10.1002/eap.2152.
27. **Elmes A., Healy M., Geron N., Andrews M.M., Rogan J., Martin D.G., Sangermano F., Williams C.A., Weil B.** Mapping spatiotemporal variability of the urban heat island across an urban gradient in Worcester, Massachusetts using in-situ Thermochrons and Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) data // GIScience and Remote Sensing. — 2020. — Vol. 57. — P. 845–864.
28. **Loveday J., Loveday G.K., Byrne J.J., Ong B.-L., Morrison G.M.** Modified iButtons: A low-cost instrument to measure the albedo of landscape elements // Sustainability. — 2019. — N 11 (24). — P. 6896. — DOI: 10.3390/su11246896.
29. **Navarro-Serrano F., Lypez-Moreno J.I., Azorin-Molina C., Buisán F., Dominguez-Castro A., Sanmiguel-Vallelado E., Alonso-González E., Khorchani M.** Air temperature measurements using autonomous self-recording dataloggers in mountainous and snow covered areas // Atmospheric Research. — 2019. — Vol. 224. — P. 168–179. — DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.03.034.
30. **Lundberg A., Gustafsson D., Stumpp C., Kløve B., Feiccabrino J.** Spatiotemporal variations in snow and soil frost — A review of measurement techniques // Hydrology. — 2016. — Vol. 3 (3). — P. 28. — DOI: 10.3390/hydrology3030028.

*Поступила в редакцию 20.12.2021*

*После доработки 15.02.2022*

*Принята к публикации 05.07.2022*