МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ГОРНО-КОТЛОВИННЫХ ЛАНДШАФТАХ

Н.Н. Воронай^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск,

² Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск,
voronay_nn@mail.ru

Аннотация. Мониторинг – непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта, в сравнении с заданными критериями. В последние десятилетия большой интерес вызывают вопросы, связанные с изменениями климатических характеристик. Начиная с 2007 г. в горно-котловинных ландшафтах Байкальского региона (Тункинская, Мондинская, Байкальская котловины) в автоматическом режиме проводятся микроклиматические наблюдения. Показана корректность использования Атмосферно-почвенных измерительных комплексов, путем сравнения данных автоматических измерений и данных стандартных метеорологических приборов, используемых на метеорологических станциях Росгидромета. Получены оценки температурно-влажностного режима воздуха и почв на 72 площадках, расположенных в разных ландшафтах в диапазоне высот 450–2300 м над уровнем моря. Влияние ландшафтных характеристик, в первую очередь высотной поясности, проявляется в средних месячных и средних годовых значениях метеорологических величин. Проведены расчеты вертикального градиента температуры воздуха на склонах котловин. В результате чего дана оценка характеристик температурных инверсий – уникального по мощности явления на территории Восточной Сибири. Оценены их интенсивность, продолжительность, повторяемость. Проведено сравнение температурного режима почв, находящихся в естественных и антропогенно нарушенных условиях. Полученные данные измерения используются при валидации результатов климатического моделирования и дистанционного зондирования (космоснимки). Наилучшая сходимость рядов отмечается на открытых умеренно-увлажненных участках. Данные микроклиматических наблюдений позволяют детально изучить температурно-влажностный режим ландшафтов с учетом высотной поясности, экспозиции и крутизны склонов в течение года. Полученные данные наблюдений дают возможность уточнить климатическое описание территории исследования, опирающееся в настоящее время в основном на данные метеорологических станций, сеть которых не охватывает горные районы.

Ключевые слова: микроклимат, мониторинг, Байкальский регион

Интенсивность и направленность многих природных процессов происходит в результате глобальных изменений климата. Согласно данным инструментальных измерений, начиная с середины 70-х гг. XX века наблюдаются наиболее интенсивные глобальные изменения климата, которые проявляются и на региональном уровне [1; 2]. Горные районы занимают более 50 % территории Российской Федерации и обладают многообразием природных ресурсов. Для рационального и экономически эффективного их использования, стратегического планирования устойчивого развития регионов, включающих горные области, требуются подробные исследования. Кроме того, в период современных климатических изменений, участвовавших экстремальных гидроклиматических явлений (наводнения, засухи, сели, пожары и т.д.) особую актуальность приобретают работы, связанные с мониторингом и прогнозом этих явлений. В связи с разреженностью и нерегулярностью расположения метеостанций и гидропостов на территории Сибири и практически полным их отсутствием в горных районах, микроклиматические исследования с использованием

автоматического оборудования представляются весьма актуальными.

Мониторинг – непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта, в сравнении с заданными критериями. В последние десятилетия большой интерес вызывают вопросы, связанные с изменениями климатических характеристик. Причем, под влиянием комплекса внешних факторов изменения могут происходить с разной периодичностью, скоростью, интенсивностью. Вся ценность получаемой при многолетних наблюдениях информации заключается в непрерывности мониторинга. В большинстве случаев, исходная информация для анализа климатических изменений получается на метеорологических станциях, сеть которых крайне разрежена и не регулярна на территории Сибири. Имеющиеся метеорологические станции расположены в основном в долинах рек, и получаемая на них информация не отражает ситуацию, наблюдающуюся в горных районах.

В работе в качестве модельных территории исследований выбраны ветвь Тункинских межгорных котловин (на стыке хребтов Тункинские гольцы

и Хамар-Дабан) и Байкальская котловина. Территория относится к зоне островного распространения многолетнемерзлых толщ и характеризуется разнообразием ландшафтных условий (от степных до горнотаежных и гольцовых), форм рельефа и почвообразующих пород. Климат территории исследования формируется в результате сложного взаимодействия нижнего слоя атмосферы с обширной, весьма разнообразной поверхностью. Радиационному режиму свойственны повышенный приток тепла вследствие преобладания малооблачной погоды, большие различия величин радиационного и теплового балансов, возникающие под влиянием особенностей горно-котловинного рельефа, большого перепада абсолютных высот и характера растительности. В целом климат резко континентальный, характеризуется значительными суточными и годовыми амплитудами температур, небольшим количеством годовых сумм осадков. В холодное время года здесь господствует Азиатский антициклон, ему соответствует ясная, безветренная, морозная погода. Период с отрицательными средними суточными температурами начинается в середине ноября и длится около семи месяцев.

Сотрудниками Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН в рамках комплексных географических исследований в 2007 г. организован мониторинг природно-климатических характеристик ландшафтов в котловинах Байкальского типа (Тункинская, Мондинская, Байкальская). На настоящий момент существует уникальная ежегодно пополняющаяся база данных о природных и климатических характеристиках Юго-Западного Прибайкалья и Приольхонья. На территории котловин круглогодично в автоматическом режиме проводятся наблюдения за температурой и влажностью воздуха, температурой и влажностью почвы на глубинах (от подстилающей поверхности до 10 м, периодичность измерения 1 час). В настоящее время мониторинг природно-климатических характеристик осуществляется на 72 модельных площадках, расположенных как в днище котловин, так и на склонах гор, их обрамляющих (диапазон высот 700–2300 м над ур.м. в Тункинской и Мондинской котловинах, 450–1650 м над ур.м. в Приольхонье). Для измерения используются Атмосферно-почвенные измерительные комплексы (АПИК – производство ИМКЭС СО РАН), а также логгеры для измерения температуры и влажности воздуха (DS1922 и DS1923), автоматический измеритель влажности почвы TRIME-PICO32. АПИК предназначен для мобильных и стационарных долговременных автоматических измерений и регистрации основных параметров атмосферы, почвогрунтов

и водоемов. АПИК может быть укомплектован датчиками температуры почвы и воздуха, высоты и температуры снежного покрова, уровня болотных (грунтовых) вод, сумм атмосферных осадков, скорости и направления ветра, влажности почвы и воздуха, характеристик солнечной радиации, концентрации углекислого газа и пр. Отличие от уже имеющихся измерительных систем заключается в сочетании низкого энергопотребления, широкого набора подключаемых датчиков, автономного режима работы, работоспособности в широком диапазоне условий эксплуатации и низкой цены. Автономный контроллер-регистратор позволяет использовать АПИК как в «замаскированном» антивандальном виде, с накоплением данных внутри прибора, так и в открытом виде с аналоговым или цифровым интерфейсом. Программное обеспечение АИПТ дает возможность визуального представления рядов данных. Данные экспортируются в текстовый формат. В процессе работы проведена оценка качества информации, получаемой с помощью автоматического оборудования. Показана корректность его использования, путем сравнения данных автоматических измерений и данных стандартных метеорологических приборов, используемых на метеорологических станциях Росгидромета [3]. Коэффициенты корреляции между данными метеостанции и данными АПИК по температуре воздуха составляют более 99 %. Средние отклонения во все сроки не превышают 0,1–0,2°C. Анализ отклонений показал, что в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$ находится 91 % измерений. Коэффициенты корреляции между данными метеостанции и данными АПИК по температуре почвы имеют высокие значения на всех глубинах для каждого месяца (от 90 % и выше). Наибольшие отклонения в средней суточной температуре почвы наблюдаются на глубине 20 см, наименьшие – на глубинах более 160 см. В почвенном профиле зимой-весной значение температуры почвы по данным АПИК выше в среднем на 1,0–2,0°C, летом-осенью ниже – в среднем на 0,1–0,8°C. Сравнение данных метеостанции с данными АПИК по влажности воздуха показало, что средняя погрешность составила 5 %. После коррекции данных в диапазон отклонений $\pm 3,5$ % вошло 54 % измерений, в пределах 5 % оказалось 70 %, а в 10 % (составляющих погрешность гигрометра на метеостанции), вошло 95,5 % измерений. Высота снежного покрова определяется по превышению заданного порогового значения разницы показаний между двумя соседними термометрами, начиная с верхнего. Данный метод позволяет определять высоту снежного покрова с точностью 5 см.

Влияние ландшафтных характеристик, в первую очередь высотной поясности, на температурно-влажностный режим проявляется в средних месячных и средних годовых значениях метеорологических величин. При рассмотрении данных срочных наблюдений контрасты становятся более выраженными. Различия между средними температурами на площадках, расположенных на склоне, в отдельные месяцы не превышают 6–7 °С. При этом более контрастны температурные условия в нижней части склона [4, 5]. Согласно результатам картографирования поля температуры воздуха за отдельные месяцы, степные ландшафты и сосновые леса, расположенные в днище котловины характеризуются относительно низкими температурами в холодный период года и высокими – в теплый, в пределах горнотаежных и гольцовых ландшафтах бортов котловины наблюдается обратная картина [6, 7].

Проведены расчеты вертикального градиента температуры воздуха на склонах котловин. В результате чего дана оценка характеристик температурных инверсий – уникального по мощности явления на территории Восточной Сибири. Практически круглогодично на склонах хребтов наблюдаются температурные инверсии. Максимальная продолжительность (до 12 дней), повторяемость (до 97 %), вертикальный градиент (до – 11,7 °С / 100 м), высота инверсионного слоя (до 1100 м) характерны для холодного времени года. Инверсии фиксируются и в теплую половину года, но со значительно более низкими градиентами.

Особого внимания заслуживает мониторинг температуры и влажности почв, организованный на естественных и антропогенно нарушенных участках, на которые в разное время оказывалось антропогенное воздействие: нарушение естественного почвенного покрова, сведения лесных массивов, частичное или полное уничтожение лесных массивов пожарами, создание осушительных каналов [8]. В результате исследования получено, что почва на антропогенно нарушенных минеральных участках лучше прогревается и быстрее остывает, чем на естественных участках. Глубина проникновения изотермы +10 °С в среднем больше на 50 см на антропогенно нарушенных участках. Однако высокая густая трава иногда оказывает сильный теплоизолирующий эффект и может воздействовать аналогично лесному массиву. В холодный период отсутствует четкая взаимосвязь между глубиной промерзания и лесным покровом. Наибольшие отрицательные температуры наблюдаются в основном на антропогенно нарушенных участках. На органических почвах глубина промерзания и величина отрицательных температур напрямую

связана с уровнем болотных вод. В центральной части Тункинской котловины в автоматическом режиме проводятся наблюдения за объемной влажностью почвы (TRIME-PICO32). Измерения проводятся на глубине 15 см. Минимальными значениями средней за теплый период года влажности характеризуются площадки с песчаными почвами (7–10 %), максимальными – с органическими (достигая 85–90 %). Минимальное увлажнение минеральной почвы (6–16 %) наблюдается перед началом периода с отрицательными температурами. Максимальное – после снеготаяния (15–34 %). Процесс уменьшения влажности почвы после таяния снега заканчивается не одновременно на всей территории. Влажность почвы выходит на летний режим в период с 20 мая по 15 июня. Это объясняется в основном различиями растительного покрова и, как следствие, не одинаковым прогревом почв весной. Наибольшие колебания, на фоне отрицательного тренда влажности почвы за теплый период, связаны с увеличением увлажнения при выпадении атмосферных осадков. Оно может достигать 12–15 % и в большинстве случаев изменяется скачком в течение 1–3 часов. Уменьшение, наоборот, имеет сглаженный, иногда ступенчатый характер и продолжается до следующего выпадения осадков. Причем для различных ландшафтных условий изменения почвенного увлажнения на одну и ту же величину связаны с атмосферными осадками разной интенсивности и продолжительности. Что может быть объяснено как физическими свойствами самих почв (плотность, пористость, влагоемкость), так и характеристиками растительности (наличие травяного покрова, сомкнутость древостоя и т.д.), за счет которых происходит перехват некоторой части выпадающих осадков. Полученные данные измерения используются при валидации результатов климатического моделирования и дистанционного зондирования (космоснимки). Наилучшая сходимость рядов отмечается на открытых умеренно-увлажненных участках [9].

Данные микроклиматических наблюдений позволяют детально изучить температурно-влажностный режим ландшафтов с учетом высотной поясности, экспозиции и крутизны склонов в течение года. Полученные уникальные данные наблюдений позволят уточнить климатическое описание территории исследования, опирающееся в настоящее время в основном на данных метеорологических станций, сеть которых не охватывает горные районы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-04-00142).

Список литературы

1. IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.
2. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М., 2014.
3. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 190 (2018) 012031 doi:10.1088/1755-1315/190/1/012031
4. Bilichenko I.N., Voropay N.N. Landscape and Climate Studies of Mountain Areas of the Baikal Natural Territory // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 211 (2018) 012046 doi:10.1088/1755-1315/211/1/012046
5. Василенко О.В. Особенности формирования климата котловин Юго-Западного Прибайкалья / О.В. Василенко, Н.Н. Воропай // Известия РАН. Серия географическая, 2015, № 2 – С.98–104.
6. Kiselev M.V., Voropay N.N., Cherkashina A.A. Annual dynamics of hydrothermal conditions of natural and anthropogenically transformed soils // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 211 (2018) 012012 doi:10.1088/1755-1315/211/1/012012
7. Василенко О.В. Картографирование поля температуры воздуха Тункинской котловины на ландшафтной основе / О.В. Василенко, Е.А. Истомина, Н.Н. Воропай // География и природные ресурсы. – 2017. – №2. – С. 182–189.
8. Borodina I.A., Kizhner L.I., Voropay N.N., Bogoslovskiy N.N., Erin S.I. Evaluation of satellite data on soil moisture in the south-west region of the Baikal // SPIE Journal – 2016. Proceedings Volume 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 100356I (2016) doi: 10.1117/12.2249113
9. Воропай Н.Н. Исследования температурного поля Тункинской котловины с использованием космических снимков Landsat / Н.Н. Воропай, Е.А. Истомина, О.В. Василенко // Оптика атмосферы и океана. Том 24. – 2011, № 01. – С.67–73.

MICROCLIMATIC MONITORING IN MOUNTAIN-DEPRESSION LANDSCAPES

N.N. Voropay^{1,2}

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk,

² V.B.Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk
voropay_nn@mail.ru

Abstract. Monitoring is a continuous process of observing and registering the parameters of an object, in comparison with specified criteria. In recent decades, questions related to changes in climatic characteristics have been of great interest. Since 2007, microclimatic observations have been carried out automatically in the mountain-depression landscapes of the Baikal region. The correctness of the use of atmospheric-soil measuring systems is shown by comparing the data of automatic measurements and the data of standard meteorological instruments used at the weather stations of Roshydromet. Estimates of the temperature and humidity regime of air and soils were obtained at 72 sites located in different landscapes in the altitude range of 450–2300 m above sea level. The influence of landscape characteristics, primarily altitudinal zonality, is manifested in the monthly and annual values of meteorological characteristics. Calculations of the vertical gradient of air temperature on the slopes of the mountains are carried out. As a result, an assessment was made of the characteristics of temperature inversions, a phenomenon unique in its power in Eastern Siberia. Their intensity, duration, and frequency were estimated. A comparison is made of the temperature regime of soils under natural and anthropogenically disturbed conditions. The obtained measurement data are used to validate the results of climate modeling and remote sensing (satellite images). The best convergence of rows is observed in open, moderately humid areas. Microclimatic observation data make it possible to study in detail the temperature and humidity regime of landscapes, taking into account the altitudinal zonality, exposure and steepness of slopes throughout the year. The observational data obtained make it possible to clarify the climatic description of the study area, which is currently based mainly on the data of weather stations, the network of which does not cover mountainous regions.

Key words: microclimate, monitoring, Baikal region

References

1. Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation, 2014, Kattsov V.M. et al. – Moscow: Federal service for hydrometeorology and environmental monitoring (Roshydromet) 56 p (In Russian)
2. IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp. (In English)
3. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 190 (2018) 012031 doi:10.1088/1755-1315/190/1/012031 (In English)
4. Bilichenko I.N., Voropay N.N. Landscape and Climate Studies of Mountain Areas of the Baikal Natural Territory // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 211 (2018) 012046 doi:10.1088/1755-1315/211/1/012046 (In English)
5. Vasilenko O.V., Voropay N.N. Peculiarities of climate formation in the depressions of the South-Western Baikal region // Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya, 2015, No. 2 – P.98–104. (In Russian)
6. Kiselev M.V., Voropay N.N., Cherkashina A.A. Annual dynamics of hydrothermal conditions of natural and anthropogenically transformed soils // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 211 (2018) 012012 doi:10.1088/1755-1315/211/1/012012 (In English)
7. Vasilenko O.V., Istomina E.A., Voropay N.N. Mapping the air temperature field of the Tunkinskaya depression on a landscape basis // Geography and natural resources. – 2017. – No. 2. – S. 182–189. (In Russian)
8. Borodina I.A., Kizhner L.I., Voropay N.N., Bogoslovskiy N.N., Erin S.I. Evaluation of satellite data on soil moisture in the south-west region of the Baikal // SPIE Journal – 2016. Proceedings Volume 10035, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 100356I (2016) doi: 10.1117/12.2249113 (In English)
9. Voropay N.N., Istomina E.A., Vasilenko O.V. Investigations of the temperature field of the Tunkinskaya depression using Landsat satellite // Optics of the atmosphere and ocean. Volume 24. – 2011, No. 01. – P.67–73. (In Russian)