

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА
№ 3 · 1994**

УДК 528.873.041.3

© 1994 г. Т. Б. КУЛАГИНА, Ю. Л. МЕШАЛКИНА, И. В. ФЛОРИНСКИЙ

**ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ЛАНДШАФТА**

Оценивается влияние рельефа местности на распределение радиационной температуры ландшафта, измеренной сканером «Thermovision 880». Установлена значимая линейная корреляция радиационной температуры с локальной высотой, крутизной, ориентацией склонов рельефа. Получено уравнение, описывающее влияние рельефа на распределение радиационной температуры ландшафта.

Введение. Информация о пространственном распределении радиационной температуры ландшафта (T), используемая при проведении сельскохозяйственного, почвенного, лесного мониторинга и некоторых других работ [1], может служить обобщенной характеристикой естественных и сельскохозяйственных угодий. Это определяется тем, что распределение T связано с режимами тепла и влаги — основных показателей состояния биогеоценозов и агросистем [2]. Тепловое излучение компонентов ландшафта — растительности, почвы, водных поверхностей, техногенных объектов и прочих — регистрируется при дистанционном зондировании в тепловом инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (8—14 мкм).

Одним из основных компонентов ландшафта является рельеф. Рельеф контролирует миграцию и аккумуляцию минеральных и органических веществ, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием гравитации, увлажнение и освещенность местности, интенсивность склоновых процессов, распределение и характеристики почвенного, растительного покровов и др. В связи с этим в 80-е годы получило развитие применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) и методов их количественного анализа при автоматизированном тематическом дешифрировании данных дистанционного зондирования (ДЗ), в том числе — в ИК-диапазоне [3—10 и др.]. Интегральный автоматизированный анализ данных ДЗ и ЦМР, позволяющий существенно улучшить результаты обработки снимков, основан на трех идеях: 1) использование только спектральной информации не является достаточным условием для удовлетворительного дешифрирования компонентов некоторых ландшафтов; 2) влияние рельефа земной поверхности на формирование дистанционных изображений местности очевидно; 3) при тематической интерпретации данных ДЗ целесообразно учитывать априори известные пространственные связи между характеристиками рельефа и других компонентов ландшафта [6].

Для оптимизации использования ИК-снимков, в частности корректного применения при их дешифрировании ЦМР, необходимо иметь представление о влиянии рельефа земной поверхности на распределение T . Оценка этого влияния являлась целью настоящей работы.

Объект исследования. Исследование проведено на примере участка, расположенного на землях опытного хозяйства Белгородского Центрально-Черноземного филиала Института удобрений и агрохимии. Размеры участка — 86×100 м. В его пределах расположен задернованный овраг меридионального простирания,

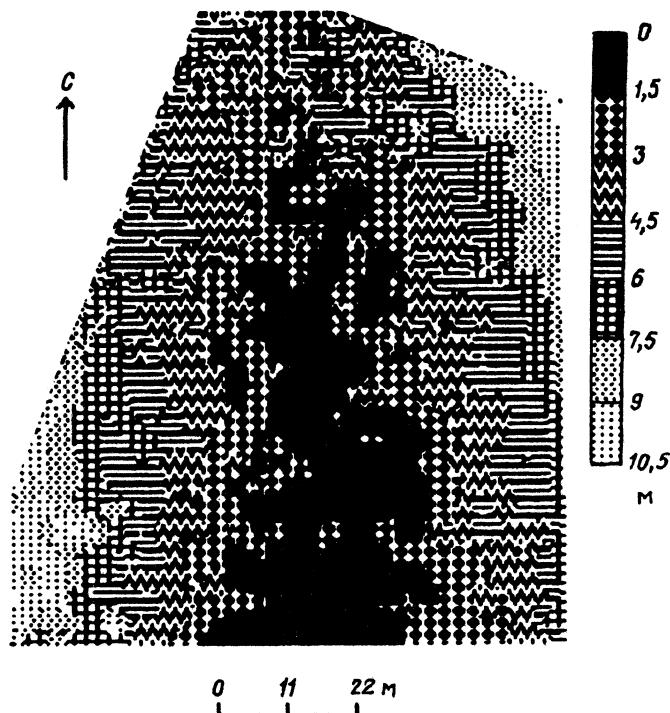


Рис. 1. Объект исследования: высоты; система высот — относительная

а также фрагменты прилегающих водоразделов; перепад высот до 12 м (рис. 1). Почвенный покров представлен типичными черноземами карбонатными мощными среднегумусными среднесуглинистыми на лёссовидных суглинках. На фоне однородной по флористическому составу травянистой растительности выделяются отдельно стоящие деревья и кустарники. Выходы подземных вод не отмечены. Техногенные образования отсутствуют.

Исходные данные и методы исследования. Для осуществления тепловой съемки использовали систему «Thermovision 880» производства фирмы «Ageta Infrared Systems» (Швеция). «Thermovision 880» является ИК-(8—12 мкм) сканером ($f = 38$ мм), формирующим тепловое изображение в реальном масштабе времени. Диапазон измеряемых температур: -20 — 1500°C , чувствительность $0,07^\circ\text{C}$ при температуре объекта 30°C . В состав блока управления входит портативный компьютер, функционирующий как входной терминал для всех существенных параметров измерения, в том числе температуры воздуха, расстояния до объекта и его излучательной способности. Параметры настройки сканера — характеристики калибровки, апертуры, фильтров — передаются в компьютер автоматически, обеспечивая полностью автоматизированный расчет температур.

Дистанционную тепловую съемку объекта исследования вели с борта вертолета Ка-26 с высоты 300 м, в астрономический полдень (при равномерной освещенности местности), в надир, в ясную погоду, при температуре воздуха $\sim 30^\circ\text{C}$. После калибровки сканера было получено цифровое ИК-изображение объекта исследования (рис. 2), разрешение снимка — 3,5 м.

В результате тахеометрической съемки, проведенной с помощью теодолита Т-35, была получена нерегулярная цифровая модель высот (ЦМВ) h объекта исследования, включающая 270 точек, построенная в относительной прямоугольной декартовой системе координат (система высот относительная). Для последующей ориентации снимка ЦМВ включала несколько реперных точек, зафик-

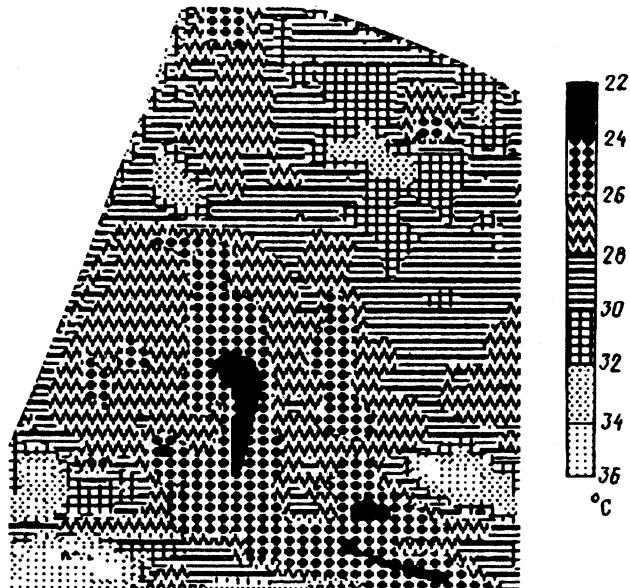


Рис. 2. Тепловой ИК-снимок объекта исследования

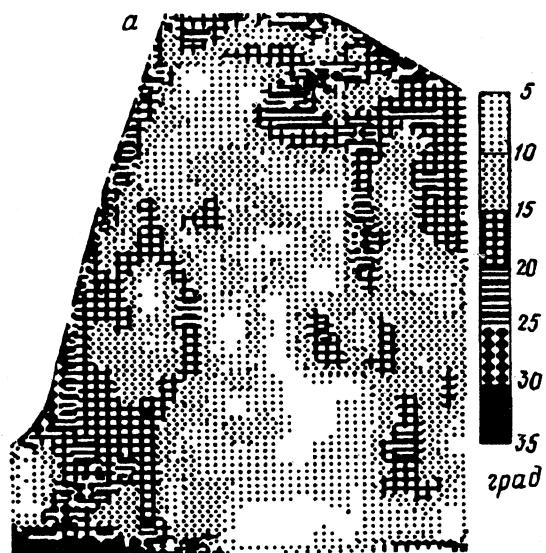
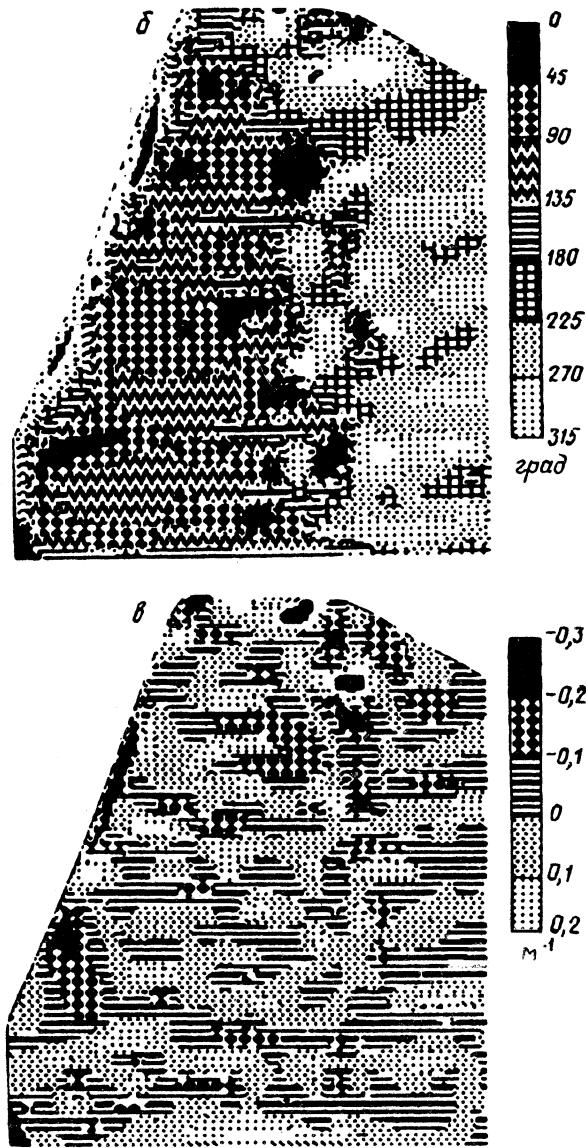


Рис. 3. Объект исследования: а — крутизна, б — ориентация склонов, в — горизонтальная кривизна, г — вертикальная кривизна, д — средняя кривизна

сированных на ИК-изображении (центры ряда кустарников и повороты грунтовой дороги, окаймляющей участок).

С помощью пакета программ QTA 3.93 (И. В. Флоринский) осуществлен пересчет нерегулярной ЦМВ в ЦМВ, построенную по квадратной сетке опорных точек с шагом 3,5 м, соответствующим разрешению снимка.

Ориентация снимка и ЦМВ проведена по реперным точкам. Точность привязки термоизображения к ЦМВ — 1,75 м. На основе снимка с помощью пакета программ для анализа термографических данных CATS (Agema Infrared Systems) была составлена регулярная матрица поля температур T объекта исследования. Шаг сетки опорных точек матрицы — 3,5 м.



Методом Эванса [11] по регулярной ЦМВ с помощью пакета программ QTA 3.93 рассчитаны цифровые модели ряда локальных топографических величин: крутизны G , ориентации склонов A , горизонтальной k_h , вертикальной k_v и средней H кривизны земной поверхности (рис. 3). G — угол между касательной и горизонтальной плоскостями в данной точке земной поверхности; A — угол между направлением на север и проекцией вектора внешней нормали в данной точке земной поверхности на горизонтальную плоскость; k_v — кривизна нормального сечения земной поверхности плоскостью, включающей в себя вектор внешней нормали и вектор ускорения силы тяжести в данной точке земной поверхности; k_h — кривизна нормального сечения земной поверхности, ортогонального сечению с k_v ; H — полусумма значений кривизны двух любых взаимно перпендикулярных нормальных сечений, в частности с значениями k_h и k_v [11]. Шаг сеток опорных точек цифровых моделей G , A , k_h , k_v и H — 3,5 м.

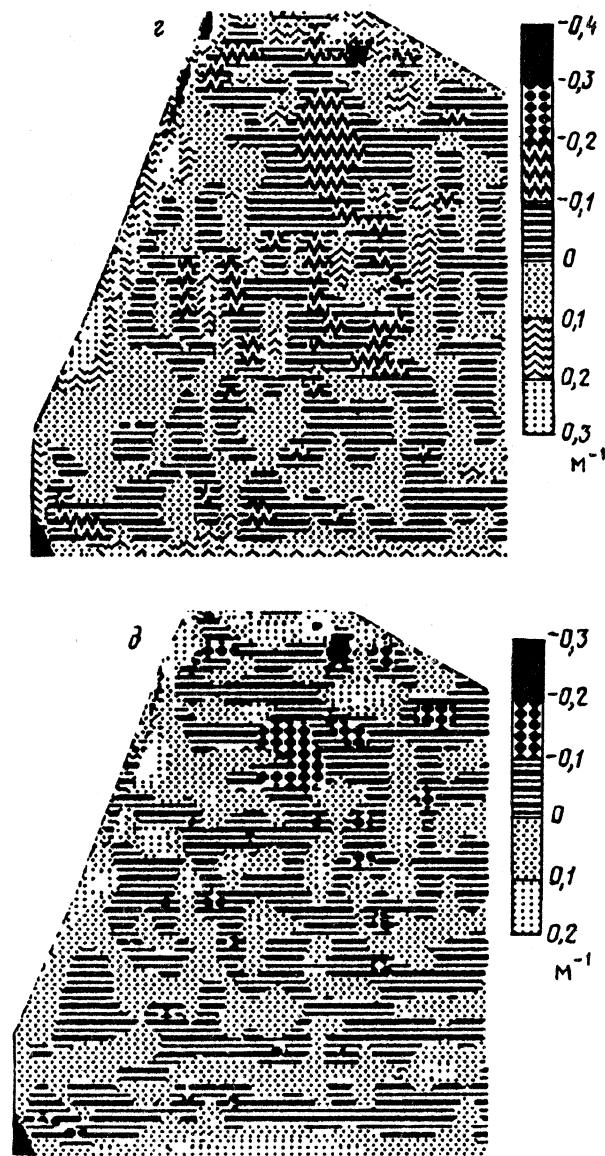


Рис. 3

Цифровые модели построены синтетично, из них исключены точки, соответствующие краевым эффектам.

С помощью пакета программ STATGRAPHICS 3,0 по выборке из 414 точек осуществлен корреляционный и регрессионный анализ матрицы поля T с матрицами h , G , A , k_h , k_v и H .

Результаты и обсуждение. Коэффициенты корреляции между значениями T и значениями ряда локальных топографических величин приведены в табл. 1.

В пределах рассматриваемого участка поле T формируется в основном за счет теплового излучения растительного покрова, который экранирует излучение почвы. Рельеф влияет на распределение T опосредованно, благодаря тому, что его характеристики контролируют условия инсоляции местности и свойства

Таблица 1

Точечные и интервальные оценки парных коэффициентов корреляции между значениями радиационной температуры ландшафта и топографических величин

Топографическая величина	Коэффициент корреляции	95%-ный доверительный интервал коэффициента корреляции	Уровень значимости
h	0,57	0,50—0,63	0,00
A	0,26	0,17—0,35	0,00
G	0,39	0,30—0,47	0,00
H	0,13	0,03—0,22	0,01
k_h	0,04	-0,06—0,13	0,38
k_v	0,15	0,05—0,24	0,00

почвенного покрова, которые в свою очередь влияют на характеристики растительности.

Условия инсоляции местности во многом определяются G и A [4 и др.]. Многочисленные исследования показывают значительное влияние этих локальных топографических характеристик на распределение и свойства растительного покрова территорий с контрастным рельефом [4, 8—10 и др.]. Поэтому наблюдается относительно высокая корреляция значений T со значениями G и A (см. табл. 1).

Однако инсоляция зависит не только от локальных характеристик рельефа, но и от положения участка в ландшафте: соседние элементы рельефа могут отбрасывать тени. Характеристики последних зависят преимущественно от положения Солнца на небесной сфере и относительной высоты элементов рельефа, отбрасывающих тени [12]. Именно поэтому при проведении данного исследования наибольший коэффициент корреляции получен для h (см. табл. 1). Топографические характеристики рассматриваемого участка таковы, что в утренние (и вечерние) часы, когда водоразделы уже освещаются Солнцем, дно остается в тени. По мере восхода Солнца освещенность участка становится более равномерной, но температурный контраст, сформировавшийся утром, в определенной степени сохраняется.

Свойства почвенного покрова, интенсивность склоновых процессов, увлажнение местности контролируются k_h , k_v и H (подробности см. в обзоре [13]). Например, H имеет практически функциональную связь с значениями влажности почвы при различных геоморфологических и климатических условиях [14, 15]. Авторы настоящей работы предполагали существование сильной зависимости T от указанных топографических величин. Однако корреляция T с k_v и H оказалась достаточно низкой, а с k_h не является значимой (см. табл. 1). Ранее отмечалась незначительная связь k_h и k_v с характеристиками растительных сообществ, дешифрируемых по спектральным (SPOT-1) и радиолокационным (SAR) изображениям [7]. Авторы цитированной работы попытались объяснить это локальностью влияния k_h и k_v на свойства компонентов ландшафта и, следовательно, невозможностью зарегистрировать связи k_h и k_v со свойствами растительного покрова и ландшафта в целом при анализе относительно больших территорий и сравнительно низкой плотности ЦМР (исследование проводилось на примере участка 6×7 км, шаг сетки ЦМР — 20 м). Однако при интегральном анализе теплового ИК-снимка участка 86×100 м и ЦМР с шагом 3,5 м существенной связи k_h , k_v , H с T также не выявлено (см. табл. 1). По-видимому, слабая корреляция между k_h , k_v , H и спектральными, тепловыми характеристиками растительного покрова связана с меньшей чувствительностью растительности в целом к изменениям k_h , k_v , H по сравнению с почвой (этот вывод не имеет отношения к аридным ландшафтам — см. данные о контроле H урожайности пшеницы в Палестине [14]).

При выборе переменных, достаточных для количественного описания зави-

Таблица 2

Коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии, описывающего зависимость радиоактивности температуры T от топографических величин (уровень значимости 0,01)

Топографическая величина	Коэффициент	Доверительный интервал для коэффициентов
h , м	0,69	0,59—0,78
A , град	0,01	0,005—0,015
H , m^{-1}	-3,70	-0,90—-6,60
Константа	14	13—15

симости T от характеристик рельефа земной поверхности, с помощью модели множественной линейной регрессии использовалась процедура пошагового отбора переменных. Влияние рельефа на распределение T описывает следующее уравнение (табл. 2):

$$T = 14 + 0,69h + 0,01A - 3,73H.$$

Полученные коэффициенты корреляции и модель связи справедливы для дневных крупномасштабных ИК-снимков, когда влиянием атмосферы на формирование теплового изображения можно пренебречь, а также для данного типа ландшафта, с перепадом h порядка 10 м.

Заключение. В результате анализа ИК-снимка, полученного с помощью системы «Thermovision 880», и ЦМР (h , G , A , k_h , k_v , H) осуществлена оценка влияния рельефа земной поверхности на распределение радиоактивной температуры T . Для данного ландшафта наиболее существенное влияние на формирование T оказывают h , A и H . Слабая связь между k_h , k_v , H и T обусловлена, вероятно, тем, что растительный покров менее чувствителен к изменению k_h , k_v , H , чем почва.

Результаты исследования могут позволить конкретизировать задачи природопользования и охраны окружающей среды, при решении которых целесообразен интегральный анализ ЦМР и тепловых ИК-снимков, определить основные принципы решения таких задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андроников В. Л., Королюк Т. В. Использование дистанционных методов в почвоведении и сельском хозяйстве. М.: ВИНТИ, 1985. 179 с. (Итоги науки и техники. Сер. Почвоведение; Т. 5).
2. Почвоведение/Под ред. Кауричева И. С. М.: Колос, 1982. 496 с.
3. Shashy M., Carnegie D. Vegetation and terrain mapping in Alaska using Landsat MSS and digital terrain data//Photogram. Eng. and Rem. Sens. 1986. V. 52. № 6. P. 779—786.
4. Frank T. D., Isard S. A. Alpine vegetation classification using high resolution aerial imagery and topoclimatic index values//Ibid. № 3. P. 381—388.
5. Menz G. Deduction of human-bioclimatological maps by means of remote sensing data and a digital terrain model using a correlation approach//Geol. Jb. 1988. V. A104. P. 383—391.
6. Franklin S. E. Topographic context of satellite spectral responses//Computers and Geosciences. 1990. V. 16. № 7. P. 1003—1010.
7. Peddle D. R., Franklin S. E. Image texture processing and data integration for surface pattern discrimination//Photogram. Eng. and Rem. Sens. 1991. V. 57. № 4. P. 413—420.
8. Wu S.-T. Integration of topographic data with synthetic aperture radar data for determining forest properties in mountainous terrain//IGARSS'87: Proc. IEEE Int. Geoscience & Remote Sensing Symp., Ann Arbor, 18—21 May, 1987. Remote Sensing: Understanding the Earth as a System. V. 2. N. Y.: IEEE. 1987. P. 1499—1503.
9. Leprieur C. E., Durand J. M., Peyron J. L. Influence of topography on forest reflectance using Landsat Thematic Mapper and digital terrain data//Photogram. Eng. and Rem. Sens. 1988. V. 54. № 4. P. 491—496.
10. Paradella W. R., Bruce W. D., Hornsby J. K. et al. A Background Geobotany model applied to geologic exploration in tropical forest environments: first results from Landsat-TM and DTM for the Pojuca Cu-Zn deposits, Carajas province, Brazil//IGARSS'89. Remote Sensing: An Economic Tool for the Nineties: Proc. 12th Canad. Symp. Remote Sens., 10—14 July, 1989. Vancouver. V. 4. Vancouver: IEEE, 1989. P. 2511—2513.

11. *Evans J. S.* An integrated system of terrain analysis and slope mapping//*Z. Geomorphologie*. 1980. Suppl. Bd. 36. P. 274—295.
12. *Horn B. K. P.* Hill shading and the reflectance map//*Proc. of the IEEE*. 1981. V. 69. № 1. P. 14—47.
13. *Шарый П. А., Курякова Г. А., Флоринский И. В.* О международном опыте применения методов топографии в ландшафтных исследованиях (краткий обзор)//*Геометрия структур земной поверхности*. Пущино: ПНИЦ АН СССР, 1991. С. 16—29.
14. *Sinai G., Zaslavsky D., Golany P.* The effect of soil surface curvature on moisture and yield — Beer Sheba observations//*Soil Sci.* 1981. V. 132. № 5. P. 367—375.
15. *Курякова Г. А., Флоринский И. В., Шарый П. А.* О корреляции между почвенной влажностью и некоторыми топографическими величинами//*Современные проблемы географии и картографии почв*. Матер. Всесоюз. конф. 24—26 сент. 1991 г. М.: Почвенный ин-т им. Докучаева, 1992. С. 70—71.

Подмосковный филиал
Всероссийского института
механизации сельского хозяйства,
Игумново
Факультет почвоведения
Московского государственного
университета им. М. В. Ломоносова
Институт математических проблем
биологии РАН, Пущино Московской
области

Поступила в редакцию
9.07.93

T. B. KULAGINA, Yu. L. MESHALKINA, I. V. FLORINSKIY

**THE EQUATION OF THE TOPOGRAPHY INFLUENCE
ON THE DISTRIBUTION OF THE LANDSCAPE RADIATION
TEMPERATURE**

*All-Russian Institute of Agricultural
Mechanization, Moscow Region Branch, Igumnovo;
Moscow University;
Institute of Mathematical Problems of Biology,
Russian Academy of Sciences, Pushchino of Moscow region*

The evaluation of the topography influence on the landscape radiation temperature distribution is carried out by statistical processing of digital models of elevation, gradient, aspect, horizontal, vertical and mean landsurface curvatures and the infrared thermal scene generated by Thermovision 880 system. Significant linear correlation coefficients between the landscape radiation temperature and elevation, gradient, aspect, vertical and mean landsurface curvatures are ascertained — 0.57, 0.38, 0.26, 0.15, 0.13 correspondingly. The equation of the topography influence on the distribution of the landscape radiation temperature is defined.