

Эмпирическая модель зависимости радиационных температур растительного покрова в диапазоне 8-14 мкм от метеорологических условий в летний период

А.В.Марков, С.А.Пономарев, Л.И.Чапурский

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, 197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13. e-mail: psamail@mail.ru, chlispb@yandex.ru

В докладе рассматриваются вопросы, связанные с получением количественных значений излучательных характеристик элементов ландшафта в интересах информационного обеспечения систем дистанционных исследований Земли, работающих в инфракрасном диапазоне 8-14 мкм. С использованием результатов авиационных и наземных радиометрических и метеорологических измерений разработана и представлена модель суточного хода зависимости радиационных температур растительных покровов от температуры воздуха и скорости ветра для Северо-Западного региона России в разные периоды лета.

The article considers the problems of taking of the optical characteristics of the elements of the landscape in the interests of information support systems of the Earth remote sensing, operating in the infrared range of 8-14 microns. Using the results of measurements of the radiation temperature of the elements of the landscape and meteorological parameters were developed and submitted to the model of the diurnal motion of the dependence of the radiative temperature of the plant cover on the air temperature and wind speed to the North-West region of Russia in the different periods of the summer.

В ВКА имени А.Ф.Можайского накоплен достаточно большой массив экспериментальных данных по отражательным и излучательным характеристикам (ОИХ) различных объектов и фонов, которые были получены в результате выполнения лётно-экспериментальных работ (ЛЭР) в интересах:

- формирования систем исходных данных по ОИХ различных объектов и фонов для информационного обеспечения космических и авиационных комплексов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на всех этапах их жизненного цикла [1, 2];
- экологического мониторинга территорий военные и промышленных объектов [2, 3];
- моделирования изображений сцен на различных участках электромагнитного спектра излучений [4, 5, 6];
- калибровки бортовой аппаратуры авиационных и космических систем ДЗЗ в полёте по наземной тестовой мишенной обстановке [2, 7].

В настоящее время отражательные свойства растительных покровов (РП) изучены достаточно полно [8] и разработаны соответствующие модели формирования потоков излучения в видимом и ближнем ИК участках спектра от 0,4 до 1,7 мкм [9, 10]. Однако излучательные характеристики растений в спектральном интервале 8...14 мкм в зависимости от времени года и метеорологических условий в разных ландшафтных зонах мало исследованы, так как при моделировании излучений от РП необходимо учитывать, что в данном случае восходящие лучистые потоки формируются в полупрозрачной рассеивающей среде, биофизические свойства, структура и размеры элементов которой изменяются в течение фенологического периода развития растений, зависят от видового состава растительных сообществ, от типов почв, на которых они произрастают, а также от воздействия метеорологических и биологических факторов.

Поэтому в настоящее время синтез тепловых моделей и их верификация осуществляются с использованием физико-статистических характеристик геофизических параметров и экспериментальных данных по излучательным свойствам объектов, полученным в разные сезоны года и время суток [12, 13].

На основе анализа результатов многолетних измерений температурного режима внутри растительных покровов травяных и древесных пород различных видов в разное время года и суток было показано, что величина восходящих лучистых потоков над РП зависит от температуры воздуха, режима облачности и скорости ветра [14, 15].

Авторами был выполнен анализ материалов более чем 70 этапов ЛЭР, полученных в период 1987- 2009 годов. При этом была установлена зависимость суточного хода РТ РП от температуры воздуха, облачности и скорости ветра в разные фенологические периоды лета, характерные для северо-западной части таёжной зоны России. Даты смены периодов в Ленинградской области представлены в работе [13].

Так как космическая и воздушная съёмки земной поверхности проводятся при безоблачной и малооблачной погоде, то при установлении функциональной зависимости РТ от температуры воздуха использовались экспериментальные данные, полученные именно в таких условиях.

Для Северо-Западной части России календарное лето (с 1 июня по 31 августа) практически совпадает с фенологическим, которое, согласно многолетним наблюдениям, начинается 6 июня и заканчивается 26 августа. В пределах данного сезона по фенологическому календарю выделено 5 подсезонов.

Каждый из этих подсезонов характеризуется определенными значениями среднесуточной температуры воздуха и активного слоя почвы, а также значениями ночных минимумов температуры воздуха. Отступления от среднесезонных фенологических дат могут достигать, в зависимости от характера развития атмосферных процессов, 5 дней и более [13].

В соответствии с использованной классификацией подсезонов фенологического календаря для луговой травы, не скашиваемой в течение лета, и для отавы травы получены 5 регрессионных зависимостей, описывающих суточный ход разности РТ травы и температуры воздуха. Для лесной растительности построены радиационные модели только для двух периодов лета: начала лета и остальной его части, так как в разгар, вершину и конец данного сезона не наблюдается четких отличий в суточном ходе разности температуры воздуха и РТ в диапазоне 8...14 мкм.

Влияние ветра на радиационные модели РП учитывается посредством введения специальной экспериментально определенной функции, позволяющей рассчитать зависимость разности РТ и T_A с увеличением скорости ветра (данная разность практически равна 0 при ветре силой более 13 м/с).

Суточная и внутрисезонная изменчивость РТ луговой травы.

В эмпирической модели зависимости РТ РП от температуры воздуха используется обобщенный параметр - разность РТ РП и температуры воздуха: $\Delta t = t_{РП} - t_{\text{воздуха}}$. В результате обработки данных получены сведения о суточном ходе значений Δt разнотравного луга для пяти фенологических периодов лета:

- начало лета (исходные данные 3..5 июня, которые фактически соответствуют конечному этапу весны по фенологическому календарю);
- разгар лета (исходные данные 3, 4, 9 и 10 июля);
- вершина лета (исходные данные 17, 18 и 19 июля);
- спад лета (исходные данные 1, 2, 4, 5 и 6 августа);
- конца лета (исходные данные за 9, 10 и 22...24 августа и с 28 августа по 1 сентября, отличающиеся высокими для данного периода значениями температуры воздуха).

В суточном ходе значений Δt для пяти выделенных периодов лета отражены следующие закономерности:

– возрастание ночных разностей РТ травы и t воздуха в первую половину лета и убывание во вторую половину лета;

– полученные ночные разности для начала лета (фактически использовались исходные данные, соответствующие конечному этапу весны по фенологическому календарю, холодная почва) превышают таковые для конца лета, зарегистрированные при теплой погоде (вторая половина августа), при влиянии излучения прогретой почвы;

– немонотонное убывание дневных разностей РТ травы и t воздуха от начала к концу лета;

– переход от отрицательных значений Δt к положительным, зависящий от угла высоты Солнца и температуры почвы, зарегистрирован утром в период между 7:15 и 8:15 часами среднего местного времени (СМВ). Переход от положительных к отрицательным значениям разностей зарегистрирован между 13:30 и 15:50 СМВ.

Весьма близкие значения суточного хода параметра Δt получены для периодов разгара лета и спада лета, начиная со второй половины дня, вечером и утром до 7:00 СМВ, а также для периодов вершины лета и ее окончания в дополуденное время с 9:00 до 12:00 СМВ.

Модельные данные по суточной и внутрисезонной изменчивости разностей РТ луговой травы и t воздуха приведены в таблице 1.

Таблица 1. Суточный ход значений разности РТ луговой травы и t воздуха в разные подсезоны лета

Подсезоны (этапы) лета	Среднее местное время, час											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Начало	-6,2	-6,0	-5,6	-5,1	-4,7	-4,0	-2,9	0,5	3,0	4,9	6,3	6,8
Разгар	-2,8	-2,9	-2,8	-2,5	-1,8	-0,8	0,6	2,5	4,0	5,1	5,3	4,8
Вершина	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,3	0,2	0,9	1,9	3,7	4,8	5,1	5,0
Спад	-2,7	-2,8	-2,9	-2,7	-1,9	0,9	0,3	1,5	3,0	3,8	4,0	3,8
Конец	-4,0	-4,1	-4,1	-4,2	-3,7	-3,2	-0,4	1,1	2,5	3,2	3,4	2,8

Продолжение таблицы 1.

Подсезоны (этапы) лета	Среднее местное время, час											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Начало	6,6	6,0	4,3	1,6	-0,5	-2,2	-3,3	-4,4	-5,1	-5,3	-5,6	-6,0
Разгар	3,7	2,4	1,1	-0,1	-0,8	-1,3	-1,7	-2,1	-2,4	-2,6	-2,7	-2,8
Вершина	4,5	3,4	1,8	0,9	0,4	0,0	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8
Спад	3,3	2,2	0,8	0,0	-0,8	-1,2	-1,5	-1,8	-2,1	-2,3	-2,4	-2,6
Конец	1,4	-0,1	-0,9	-1,5	-2,2	-2,6	-3,1	-3,5	-3,7	-3,0	-3,9	-4,0

Суточная и внутрисезонная изменчивость РТ отавы.

Выше были описаны закономерности суточного хода не скашиваемой луговой травы, высота которой к середине лета достигает 40...60 см. Применительно к отаве травы высотой до 20 см результаты исследований суточного хода РТ показали, что при высотах Солнца более 10° РТ отавы травы на 1...2°С град больше, чем РТ не скашиваемой луговой травы, а при высотах Солнца менее 5 градусов РТ отавы на 1°С меньше РТ не скашиваемой травы. Поэтому при расчете модельных данных значений РТ отавы необходимо вносить соответствующие поправки. При высотах Солнца от 5 до 10° РТ травы и отавы совпадают.

Суточная и внутрисезонная изменчивость РТ деревьев.

Предварительный анализ результатов измерений разностей РТ леса и температуры воздуха показал, что нет чётких различий в суточном ходе этой величины во все фенологические периоды лета, за исключением начала лета, когда еще не закончилось формирование листьев у осины, берез и ольхи, а у хвойных начался прирост молодых побегов. При этом, к началу июля листва всех деревьев приобретает свои обычные летние формы и цвета. Значимых различий в суточном ходе РТ крон сосен и елей не выявлено. В модели суточного хода значений РТ для леса представлены данные для двух периодов: для начала и разгара лета, а также средние значения этих величин.

Модельные данные по суточной изменчивости разностей РТ деревьев и t воздуха приведены в таблице 2.

Таблица 2. Суточный ход значений разности РТ деревьев и t воздуха в разные подсезоны лета и в среднем для всего лета

Подсезоны Лета	Среднее местное время, час											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1...20.06	-2,4	-2,5	-2,4	-2,2	-2,1	-2,0	-1,7	-0,8	0,4	1,2	1,6	1,8
21.06...31.08	-2,4	-2,3	-2,2	-2,1	-2,0	-1,9	-1,6	-0,9	0,4	1,5	1,7	1,6
Средние Δt	-2,4	-2,4	-2,3	-2,2	-2,1	-1,9	-1,6	0,9	0,4	1,4	1,7	1,7

Продолжение таблицы 2

Подсезоны Лета	Среднее местное время, час											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1...20.06	1,4	0,5	-0,2	-0,7	-1,1	-1,5	-1,8	-2,0	-2,2	-2,1	-2,3	-2,4
21.06...31.08	1,5	0,7	0,0	-0,5	-0,7	-0,9	-1,2	-1,4	-1,5	-1,7	-2,0	-2,2
Средние Δt	1,5	0,6	-0,1	-0,6	-0,9	-1,1	-1,4	-1,6	-1,8	-1,9	-2,1	-2,4

Зависимость РТ РП от скорости ветра.

Исследования РТ РП выполнялись при скорости ветра до 10 м/с. Материалы исследований свидетельствуют об уменьшении величины Δt с увеличением скорости ветра, медленном при скоростях 1...4 м/с и быстром при скоростях 4...10 м/с. При этом установлено, что при скоростях ветра более 13 м/с $\Delta t=0$. Учет влияния ветра на величину Δt предлагается осуществлять через коэффициент K_f .

Значения этого коэффициента при разных скоростях ветра ff приведены в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость значений K_f от скорости ветра ff

$Ff, \text{ м/с}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
K_f	1	0,98	0,95	0,90	0,78	0,62	0,48	0,30	0,20	0,13	0,09	0,07	0,06	0,05

Несмотря на невысокую статистическую обеспеченность экспериментальными данными, которые не в полной мере удовлетворяли требованиям по части режима облачности при экспериментах, полученные зависимости суточного хода РТ РП в разные периоды сезона лета достаточно точно отражают существующие закономерности излучательных свойств вегетирующего РП во взаимодействии с метеорологическими полями.

Литература

1. Маров М.Н. Сущность и основы фонолевого обеспечения военно-технических систем. Труды войсковой части 41513. Вып.1, МО РФ, 1995. С. 3-7.

2. Чапурский Л.И., Марков А.В., Мочалов В.Ф., Ясинский Г.И.. Проблемы информационного обеспечения оптических космических систем экологического назначения. // Оптический журнал. 2000, Т.67. №7. -С.111-117.
3. Бровкина О. В., Мочалов В. Ф., Чапурский Л. И. Мониторинг свалок по разномасштабным аэрокосмическим данным.//Международный экологический форум. Программа 8 международной конференции – дискуссии «Управление отходами». СПб: «Ленэкспо», 19-20 марта 2008. – С.163-164.
4. Остриков. В.Н., Гудым А.В. Моделирование тепловых изображений трёхмерных сцен в задачах формирования ФЦО в ИК диапазоне. Труды войсковой части 41513. Вып.1. МО РФ, 1995. С. 47-50.
5. Мельканович А.Ф., Самонова Г.Н. Моделирование трёхмерных сцен и их изображений в видимом диапазоне. Труды войсковой части 41513. Вып.1, МО РФ, 1995. - С. 51-53.
6. Марков А.В. Учёт влияния снежного покрова при расчёте годовых изменений температуры фоновых образований. Труды войсковой части 41513. Вып.3, МО РФ, 1998. - С. 17-20.
7. Бровкина О. В., Григорьева О. В., Груздев В. Н., Захаров С. В., Пономарев С. А., Чапурский Л. И., Чиков К. Н. Аппаратура, методики и результаты использования материалов видеоспектральной и тепловой аэросъёмки для экологического мониторинга территорий и акваторий.//Сборник научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Вып. 4, Т.1, М, ООО «Азбука-2000», 2007. - С. 209-215.
8. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. Ч. 1, МО СССР, 1986. – 160 с.
9. Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. – Л., Гидрометеиздат, 1975. – 342 с.
10. Выгодская Н.Н., Горшкова И.И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Л., Гидрометеиздат,, 1987. – 246 с.
11. Schott J. R., Raqueno R., Salvaggio C. Incorporation of time-dependent thermodynamic model and a radiation propagation model into infrared three-dimensional synthetic image generation. // Optical Engineering, 1992. V.32. №7. - P. 1505-1516.
12. Марков А.В., Чапурский Л.И. Проблемы планирования экспериментов по созданию баз данных в интересах информационного обеспечения систем дистанционного зондирования. // Труды войсковой части 41513. Вып. 4, МО РФ, 1999. - С.12-17
13. Чапурский Л.И., Тимофеев В.И. Состояние и перспективы использования физико-статистической и оперативной информации для прогнозирования отражательных и излучательных характеристик растительного покрова. // Научно-технический сборник: Методы и средства получения, обработки и применения фоноцелевой информации. (Труды 2 НИЦ 4 ЦНИИ МО РФ) Вып. 6, Санкт-Петербург, 2005, - С.100 -113.
14. Шенников А. П. Экология растений. “Советская наука”, М.: 1950. – 375 с.
15. Сельскохозяйственная метеорология / Под общ. ред. А. В. Федорова. Л.-М.: ГИМИЗ, 1938. – 232 с/.