

Моделирование радиояркой температуры почвенного покрова

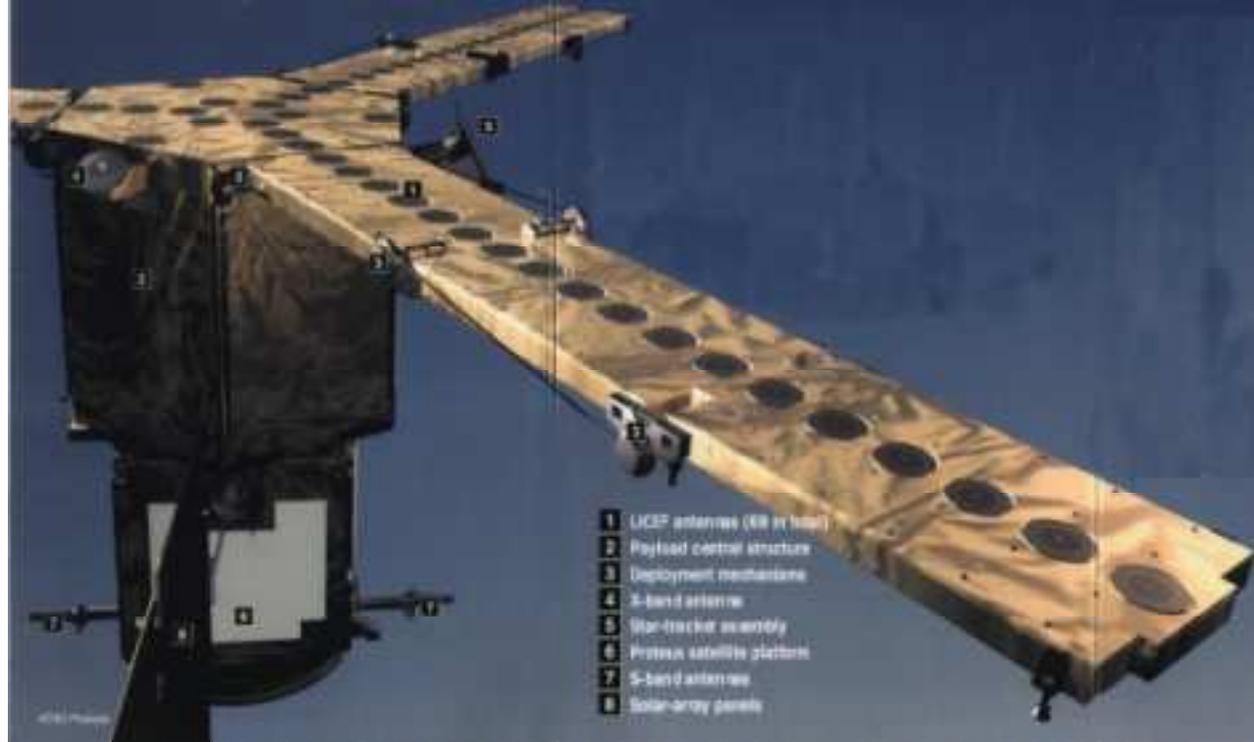
В.Л.Миронов, А.А.Богданов, А.С.Комаров, С.А.Комаров

*Лаборатория радиофизики дистанционного зондирования,
Институт физики им. Киренского КНЦ СО РАН,
Красноярск, Россия, тел./факс.: +7-3912-49 46 89;
email: rsdvm@ksc.krasn.ru*

SMOS

The Soil Moisture and
Ocean Salinity Mission

- 1 L1CSP antennas (6R at head)
- 2 Payload central structure
- 3 Deployment mechanisms
- 4 S-band antenna
- 5 Star-tracker assembly
- 6 Proseus satellite platform
- 7 S-band antennae
- 8 Solar-array panels



Цели исследований

- ☑ Разработка математической модели расчета сезонных и суточных изменений радиояркостной температуры почвенного покрова в зависимости от метеоусловий на поверхности земли и в приповерхностном слое почвы.
- ☑ Моделирование суточных вариаций радиояркостной температуры поверхности почвы с учетом сезона и географического положения (Красноярский край), сравнение с экспериментальными данными
- ☑ Восстановление эффективной влажности приповерхностного слоя почвы по данным радиометрического эксперимента, сравнение с экспериментальными данными

Радиояркость температура

$$T_{bH,V}(\theta) = [1 - R_{H,V}(\theta)] T_{eff}$$

θ - угол визирования антенны

$R_{H,V}(\theta)$ - коэффициент отражения от плоскослоистой среды на вертикальной и горизонтальной поляризациях

T_{eff} - эффективная температура

$$T_{eff} = \int_0^{\infty} 2k_0 \kappa(z) \sec \vartheta(z) T(z) \exp \left\{ - \int_0^z 2k_0 \kappa(z') \sec \vartheta(z') dz' \right\}$$

$$\sec \vartheta(z) = \frac{n(z)}{\sqrt{n^2(z) - \sin^2 \theta}} \quad \text{-секанс угла преломления}$$

$n(z)$ $\kappa(z)$ - коэффициенты преломления и поглощения

рабочая частота радиометра 6.9 ГГц

Диэлектрические свойства почвы

Рефракционная модель

Комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) смеси задается рефракционной моделью с учетом содержания связанной воды в почве

$$\sqrt{\epsilon_c} = \begin{cases} \sqrt{\epsilon_d} + (\sqrt{\epsilon_b} - 1)W & W < W_t \\ \sqrt{\epsilon_d} + (\sqrt{\epsilon_b} - 1)W_t + (\sqrt{\epsilon_w} - 1)(W - W_t) & W > W_t \end{cases}$$

ϵ_d - диэлектрическая проницаемость сухого грунта

W - объемное содержание влаги

W_t - объемное содержание связанной воды

$$\epsilon_b = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{b0} - \epsilon_\infty}{1 - i\omega\tau_b} + \frac{i\sigma_b}{\omega\epsilon_0} \quad \text{- КДП связанной воды (модель Дебая)}$$

$$\epsilon_w = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{w0} - \epsilon_\infty}{1 - i\omega\tau_w} + \frac{i\sigma_w}{\omega\epsilon_0} \quad \text{- КДП свободной воды (модель Дебая)}$$

Параметры модели Дебая были взяты из экспериментальных данных по конкретному типу почвы на испытательном полигоне «Погорелки», г. Красноярск

Моделирование температурно-влажностного режима почвы

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} = -\nabla \vec{q}_m \qquad \frac{\partial Q_h}{\partial t} = -\nabla \vec{q}_h$$

Q_h – количество теплоты в единице объема, Дж/м³;

Q_m – масса влаги в единице объема, кг/м³;

\vec{q}_h – вектор плотности потока тепла, Дж/м²с;

\vec{q}_m – вектор плотности потока влаги, кг/м²с;

t – время, с.

Функции пространственных координат и времени $Q_{h,m}$, $\vec{q}_{h,m}$ могут быть связаны с температурой T и влажностью θ_l почвы через параметры материальной среды. Полученная система нелинейных уравнений решается численно.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{MY - NX}{MF - EN} \\ \frac{\partial \theta_l}{\partial t} &= \frac{FX - EY}{MF - EN} \end{aligned} \right\}$$

$$X = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial q_m}{\partial z} \quad Y = -\frac{\partial q_h}{\partial z}$$

$$q_m = -\rho_l \left(D_T \frac{\partial T}{\partial z} + D_\theta \frac{\partial \theta_l}{\partial z} + K \right)$$

$$q_h = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + L\rho_l \left(D_{T_l} \frac{\partial T}{\partial z} + D_{\theta_l} \frac{\partial \theta_l}{\partial z} + K \right) - \rho_l (L + c_l(T - T_0)) \left(D_T \frac{\partial T}{\partial z} + D_\theta \frac{\partial \theta_l}{\partial z} + K \right)$$

$D_T = D_{T_l} + D_{T_v}$ - температурный коэффициенты диффузии воды

$D_\theta = D_{\theta_l} + D_{\theta_v}$ - изотермический коэффициенты диффузии воды

K - влагопроводность почвы

λ - теплопроводность влажной почвы

ρ_l - плотность жидкой воды

$L = L_0 - (c_l - c_p)(T - T_0)$ - удельная теплота парообразования

c_p, c_l - удельные массовые теплоемкости водяного пара и воды

M, N, E, F - известные коэффициенты системы уравнений

Задание начальных профилей температуры и влажности

Метод Ньютона-Рафсона для нахождения температуры и влажности на поверхности

Метод прогонки решения СЛАУ с матрицей специального вида

точность достигнута?

нет

да

$t := t + dt$

Профили температуры и влажности

Модель КДП почвы

Вычисление радиояркостной температуры

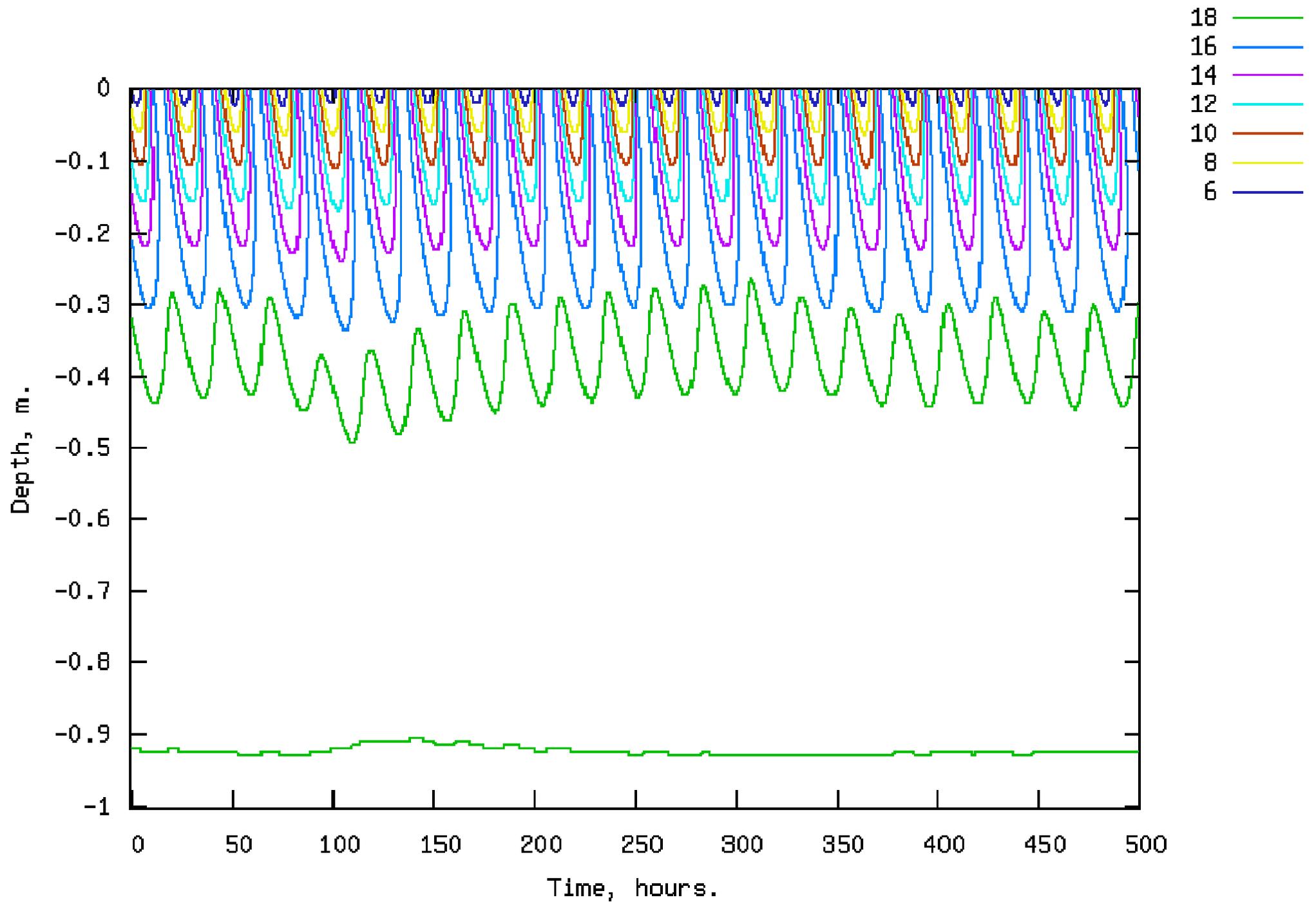


Рис. 1. Модельные изолинии температуры в период 1-20 сентября

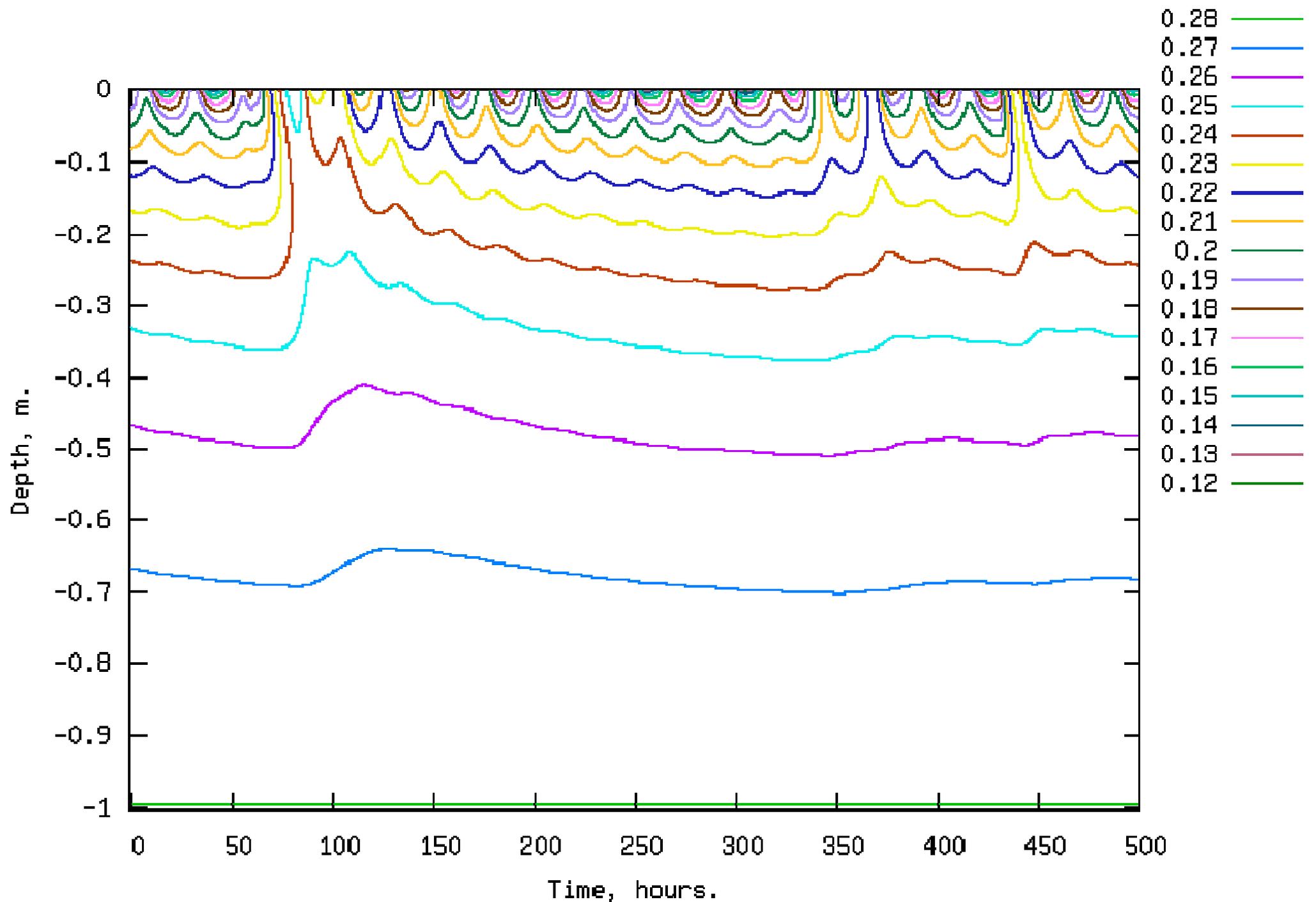


Рис. 2. Модельные изолинии объемной влажности в период 1-20 сентября

Эксперимент

Радиометрический комплекс «МИРК»



Двухволновый (1,42ГГц и 6,9ГГц) радиометрический комплекс «МИРК» разработан и изготовлен по заказу ИФ СО РАН в Институте космических исследований РАН.

Флуктуационная чувствительности радиометров составляет 0.3 К при $\tau = 1$ с. Диапазон измеряемых радиояркостных температур - от 100 до 400 Кельвин. Возможен прием двух ортогональных поляризаций.

Коэффициент рассеяния антенны радиометра составляет $0,22 \pm 0,02$ и $0,25 \pm 0,02$ для частот 1,42 и 6,9 ГГц, соответственно.

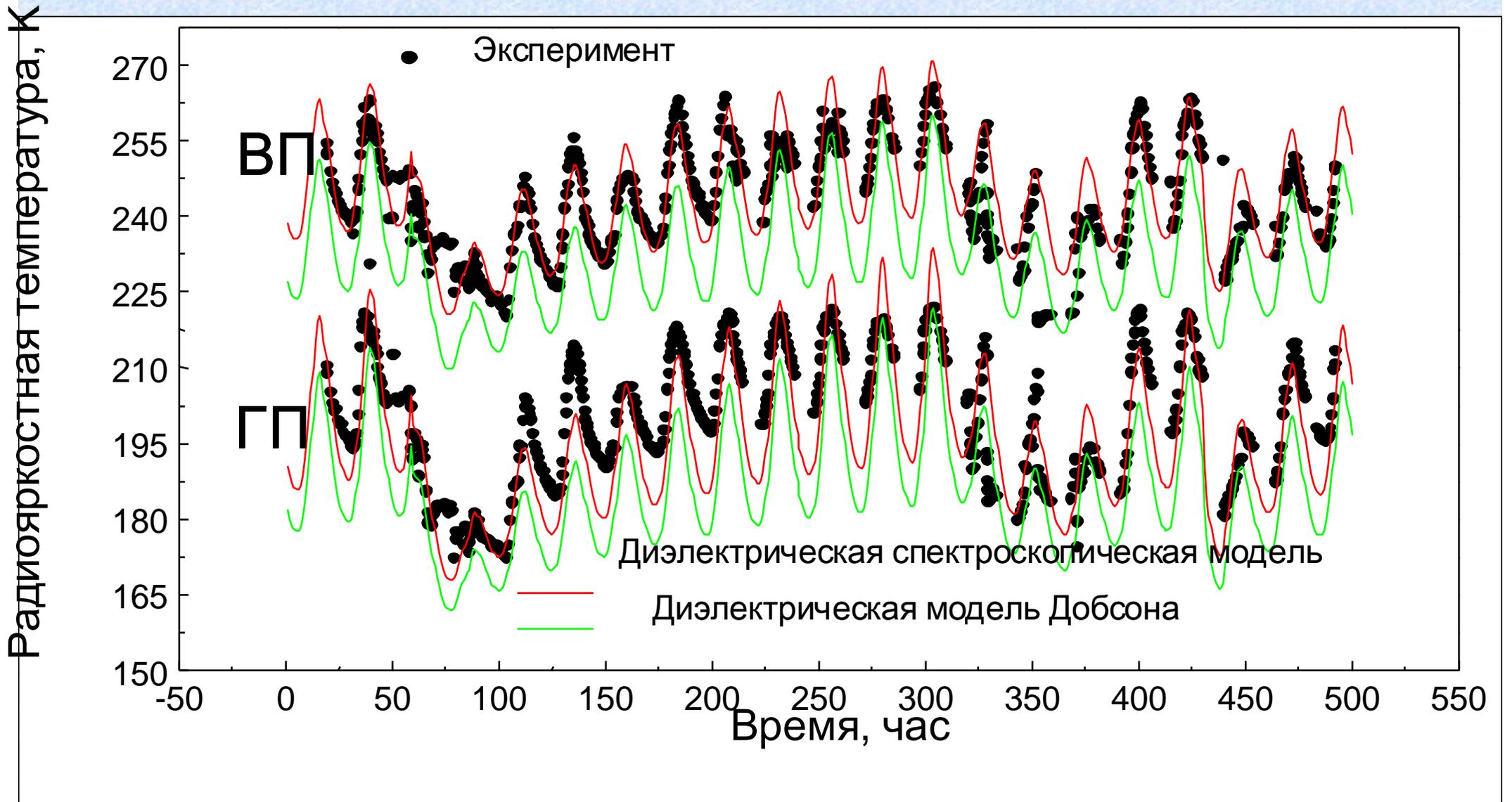


Рис.3. Сравнение модельных расчетов и экспериментальных данных для радиояркой температуры

Восстановление влажности

В простейшем варианте обратная задача может быть представлена как решение трансцендентного уравнения относительно объемного содержания влаги в приповерхностном слое:

$$T_{bH,V}(\theta, W_{eff}) = \left(1 - |R_{H,V}(\theta, W_{eff})|^2\right) T_{eff}(\theta, W_{eff})$$

W_{eff} - эффективная влажность

Полагая, что среда однородная, коэффициенты отражения запишутся, как

$$R_V(\theta) = \frac{\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}, \quad R_H(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}$$

ε - КДП однородной влажной почвы описывалась двумя моделями (рефракционная и модель Добсона)

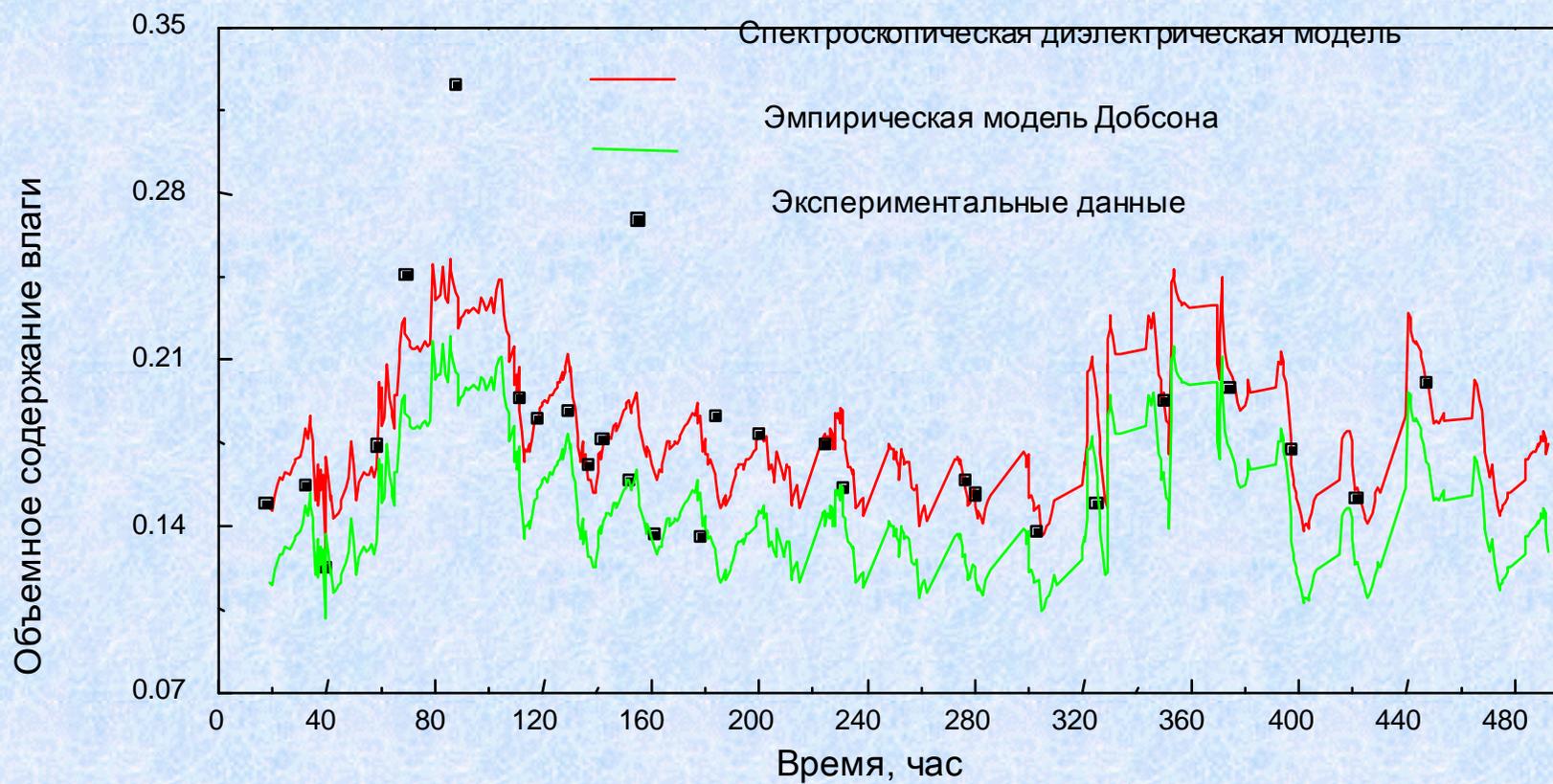


Рис.4. Суточные изменения восстановленной влажности и сравнение с экспериментом

Выводы

- Построена модель тепло- и влагопереноса в почве
- Получены суточные вариации радиояркостной температуры для условий проведения радиометрического эксперимента (1-20 сентября 2006 г., г. Красноярск). Отмечено хорошее соответствие между экспериментальными и модельными данными в случае применения рефракционной модели КДП почвы.
- Проведено восстановление эффективной влажности по экспериментальным радиометрическим данным. Сравнение с прямыми измерениями влажности приповерхностного слоя показывает хорошее соответствие в случае применения рефракционной модели.
- Рефракционная модель КДП почвы предпочтительнее модели Добсона при интерпретации данных дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне.