

## АНАЛИЗ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ MODIS TERRA

Голюков А.С.,

научный руководитель канд.биол.наук Федотова Е.В.

*Сибирский Федеральный Университет*

Температура поверхности является хорошим индикатором энергетического баланса поверхности Земли, потому что она является одним из ключевых параметров в физических процессах на поверхности на региональном и глобальном уровнях. Она объединяет результаты взаимодействия поверхность-атмосфера и энергетических потоков между атмосферой и поверхностью. Этот параметр необходим в широком круге климатических, гидрологических, экологических и биохимических исследований. Долговременные наборы данных о температуре поверхности, полученные по спутниковым наблюдениям, например, с системы MODIS, могут использоваться в исследованиях по глобальному изменению климата, оценке теплового излучения, температуры почвы, оценке теплового баланса между Землей и атмосферой.

Рассмотрим понятие эффективной температуры. Эффективная температура  $T_E$  - параметр, характеризующий светимость (полную мощность излучения) объекта, то есть это температура абсолютно чёрного тела с размерами, равными размерам небесного тела и излучающего такое же количество энергии в единицу времени. В соответствии с законом Стефана — Больцмана светимость  $L$  сферического абсолютно чёрного тела с радиусом  $R$ , то есть площадью излучающей поверхности  $4\pi R^2$ :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_E^4$$

где  $\sigma$  — это постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>).

Таким образом, эффективная температура объекта равна температуре абсолютно чёрного тела, с единицы поверхности которого в единицу времени излучается энергия  $L/4\pi R^2$ .

В случае небесных тел, окружённых атмосферами, эффективная температура определяется температурой внешнего излучающего слоя атмосферы с оптической толщиной  $\tau \approx 1$  — верхними слоями атмосфер. Эффективная температура ниже температуры поверхностей планет.

Земля освещена Солнцем с одной стороны, поэтому величина падающего потока излучения будет равна:  $J_0 = \pi R^2 \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — это солнечная постоянная. Вследствие того, что Земля отражает часть излучения, с учётом среднего по всему спектру альбедо Земли поток энергии, поглощённой планетой будет равен:  $J_1 = \pi R^2 \varepsilon (1 - a)$ , где  $a$  — геометрическое альбедо Земли. В равновесии поток поглощённой энергии равен потоку излучающей (выражающийся из закона Стефана-Больцмана), получаем равенство:  $\pi R^2 \varepsilon (1 - a) = 4\pi R^2 \sigma T_E^4$

откуда следует, что

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon(1-a)}{4\sigma}}$$

где  $\sigma$  — это постоянная Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>).

Откуда численное значение эффективной температуры Земли равно 249 К, или  $-24$  °С. Реальное значение средней температуры земной поверхности выше, благодаря парниковому эффекту.

Температуру поверхности планеты можно оценить путем модификации расчета эффективной температуры учитывая ее излучение и вариации температуры. Область

планеты, которая поглощает энергию от звезды -  $A_{abs}$ , является некоторой частью от общей площади поверхности  $A_{total} = 4\pi r^2$ , где  $r$ -радиус планеты. Эта область перехватывает часть энергии, которая распространяется по поверхности сферы радиусом  $D$ . Планета отражает некоторое падающее излучение, это будет учитываться параметром альbedo  $a$ . Альbedo равно 1 означает, что все излучение отражается, альbedo равно 0 означает, что вся энергия поглощается. Выражение для поглощаемой энергии:

$$P_{abs} = \frac{LA_{abs}(1-a)}{4\pi D^2} \quad (1)$$

Хотя вся планета не при той же температуре, она будет излучать энергию как тело с температурой  $T$  с площади  $A_{rad}$ , которая будет некоторой долей от общей площади планеты. Существует также фактор  $\epsilon$ , коэффициент излучения и представляет собой атмосферные воздействия.  $\epsilon$  колеблется от 1 до 0; значение 1 соответствует абсолютно черному телу и излучает всю падающую энергию. Закон Стефана-Больцмана позволяет выразить мощность излучения планеты:

$$P_{rad} = A_{rad}\epsilon\sigma T^4 \quad (2)$$

Приравняв и перегруппировав эти два выражения, можно получить выражение для температуры поверхности:

$$T = \left( \frac{A_{abs} L(1-a)}{A_{rad} 4\pi\sigma\epsilon D^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Стоит обратить внимание на соотношение двух областей. Общие допущения для этого отношения являются 1/4 для быстро вращающегося тела и 1/2 для медленно вращающегося тела. Это соотношение будет 1 для подсолнечной точки, точки на планете прямо под солнцем и дает максимальную температуру планеты.

Земля имеет альbedo  $a = 0.367$ . Излучательная способность зависит от типа поверхности и во многих климатических моделях установлено значение излучательной способности Земли до 1. Однако более реалистичным является значение 0,96. Земля является довольно быстро вращающимся телом, поэтому отношение площадей можно оценить как 1/4.

Другие переменные постоянны. Этот расчет дает нам эффективную температуру Земли 252К или  $-21^\circ \text{C}$ . Средняя температура Земли 288К или  $15^\circ \text{C}$ . Одной из причин разницы между этими двумя значениями является парниковый эффект, который увеличивает среднюю температуру поверхности Земли. Это уравнение принимает во внимание только эффект от внутреннего нагрева планеты, не рассматривая другие, например, такие как радиоактивный распад, а также полученные от трения в результате приливных сил [2].

Данные о температуре поверхности Земли доступны после обработки результатов измерения в нескольких каналах спектрометра MODIS на базе платформы Terra. Спектрорадиометр MODIS имеет высокую радиометрическую чувствительность с радиометрическим разрешением 12 бит в 36 спектральных каналах в интервале длин волн от 0,4 до 14,4 мкм. Данные MODIS по всей поверхности Земли поступают со спутника TERRA каждый день в 36 спектральных зонах (в диапазоне 0.405-14.385 мкм) с разрешением 250-1000 м, что обеспечивает моделирование в глобальном и региональном масштабе.

Полное название линейка продуктов с температурой поверхности, MODIS MOD11. Всего предоставляется 7 продуктов, с разным пространственным и временным разрешением. Продукт MOD11\_L2 имеет пространственное разрешение - 1км на надир и временное разрешение - сена. Следующий продукт MOD11A1 имеет пространственное разрешение - 1km (actual 0.928km) и временное разрешение -

ежедневный. Далее идет продукт MOD11B1, с пространственным разрешением - 6km (actual 5.568km) и временным – ежедневно. Продукт MOD11A2 L2 имеет пространственное разрешение - 1km (actual 0.928km) и временное разрешение – 8 дней. Оставшиеся 3 продукта: MOD11C1, MOD11C2, MOD11C3 поставляются с пространственным разрешением в  $0.05^\circ$  by  $0.05^\circ$  и временным - MOD11C1 ежедневно, MOD11C2 – 8 дневный и MOD11C3 – месяц. В любом из продуктов есть слои с: радиационной температурой поверхности (Land surface temperature, LST), показателями качества (QA), ошибками определения температуры, коэффициентами излучения в каналах 31 и 32 MODIS (или 20, 22, 23, 29, и 31 - 33), зенитный угол и время, широту и долготу (каждый комплект широты и долготы на каждые 5 строк и 5 столбцов), локальные атрибуты и глобальные атрибуты.

Три типа методов существуют для оценки LST из космоса:

- метод одного ИК канала;
- метод расщепления окна, который используется в различных многоканальных алгоритмах;
- день/ночь метод по данным MODIS и использованием уникальных особенностей аппаратуры этой системы.

Первый метод требует знания излучения поверхности и точной модели передачи излучения в атмосфере и знание атмосферного профиля. Второй метод делает коррекцию излучения поверхности и атмосферы на основе знания излучения поверхности, которое получается на различном поглощении в расщепляющихся окнах. Третий метод использует соотношение день/ночь в шести тепловых каналах MODIS для непосредственной оценки температуры поверхности и среднего по каналам излучения без знаний температуры атмосферы и профиля водяного пара.

Точность оценки LST по данным MODIS -  $1^\circ\text{K}$  при пространственном разрешении 1км в условиях чистого неба. Эти измерения могут быть проверены с помощью полевых измерений на плоских однородных поверхностях. После калибровки данных MODIS в тепловых каналах (TIR) возможно достичь точности  $0.5^\circ\text{K}$  для плоских поверхностей при условии сухой атмосферы.

Данные о температуре поверхности находятся в свободном доступе.

Для примера взят продукт MODC3, содержащий среднемесячные температуры, выбранный участок – Сахара, время года июль. Данные взяты с сайта <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Формат продукта .hdr, работа производится с помощью ПО ENVI 4.8. Выделенный участок представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Сахара, LST

Используя классификацию без обучения K-mean, мы получили следующие изображение (рисунок 2).

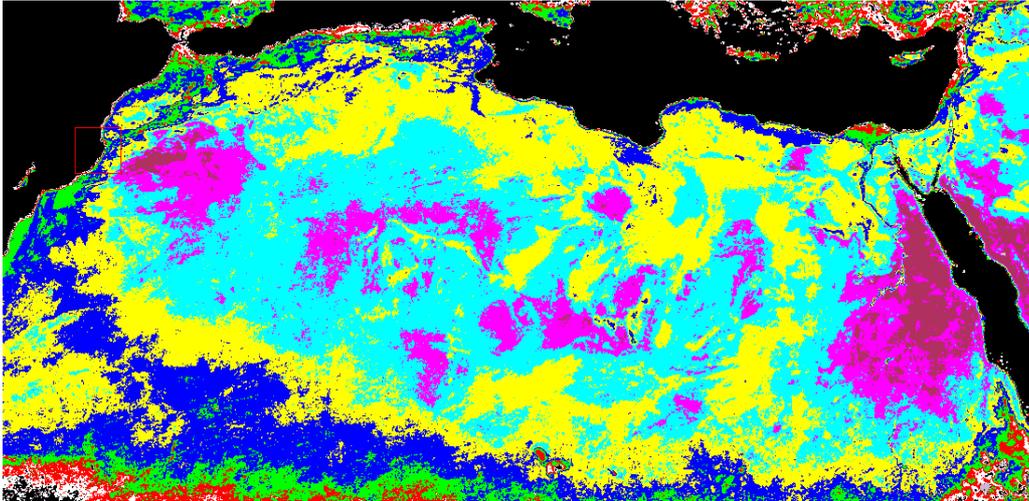


Рисунок 2 – Сахара, лето, кластеризация K-means

Чтобы узнать значение температуры, использовалась простая формула, бралось значение пикселя из исходного слоя с температурой поверхности (к примеру 12000), множилось на смещение (0.02), мы получаем результат в кельвинах 240, остается перевести в градусы ( $1 \text{ K} = -272.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и получим – 33 градуса. В итоге получилось 13 кластеров, самая высокая среднемесячная температура поверхности 53-58 градусов, на снимке данный класс окрашен в бордовый цвет (■). Самая низкая среднемесячная температура поверхности в данное время года 25-28 градусов, это кластер окрашен в темно-коричневый цвет (■) и находится эта зона вдоль побережья.

Так же используя продукты MODIS MOD11 можно проанализировать, как менялась температура за весь год, или за несколько лет. К примеру, на рисунке 3, вы можете наблюдать результат кластеризации данных за весь 2012 год по Сибири. Если проанализировать такие данные за несколько лет, то можно будет узнать, что происходит с вечной мерзлотой на данной территории.

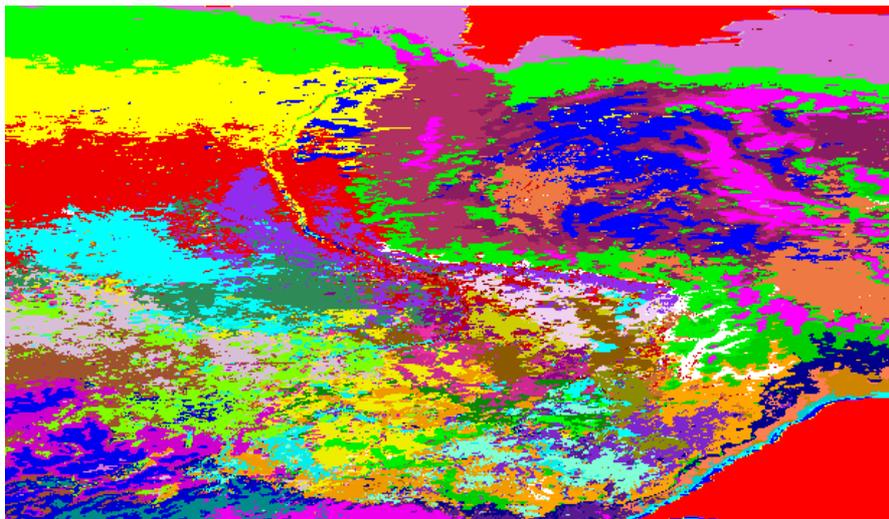


Рисунок 3 – Якутия, классификация K-means

Есть факторы, которые сказываются на качестве данных, к примеру – облачность или кластеры с малым количеством пикселей. Поставщик предоставляет QA данные контроля качества, далее можно провести дальнейшую обработку снимка, для получения более точного результата.