

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ
РАДИАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
НА ПРИМЕРЕ МЕТЕОСТАНЦИЙ ДИКСОН, ТУРУХАНСК**

Аннотация. В статье представлено математическое описание процесса формирования температуры воздуха и восстановление средних месячных температур января и июля за последнюю тысячу лет.

Ключевые слова: математическое моделирование, радиационный баланс, температура воздуха, Западная Сибирь.

Введение

В настоящее время известно, что в прошлом на Земле наступали теплые и холодные климатические периоды [1]. В своей работе Смутьский [2] решил задачу об изменении количества тепла на верхней границе атмосферы за последние 20 млн. лет, получив значительные колебания инсоляции. В настоящей статье поставлена задача оценки влияния солнечной радиации на изменение температуры воздуха в приземном слое атмосферы и реконструкция палеотемператур за последнюю тысячу лет на примере северных метеостанций Диксон (73.5 с.ш., 80.4 в.д.) и Туруханск (65.78 с.ш., 87.93 в.д.).

Температура воздуха является ключевым метеорологическим параметром, определяющим состояние мерзлых пород. Поэтому для прогноза изменения температур воздуха и состояния мерзлоты, необходимо вычислить значения палеотемператур в прошлом и оценить их влияние на мерзлоту.

В основе математической модели расчета температур воздуха лежит уравнение теплового баланса, в котором радиационный баланс представляет

зависимость от температуры и солнечной радиации. В среде MathCad разработан программный комплекс для вычисления составляющих радиационного баланса и температур воздуха.

Уравнение теплового баланса представляет схему теплообмена Земли и является частным случаем закона сохранения энергии

$$R + P + B + L \cdot M = 0, \quad (1)$$

где R – радиационный баланс земной поверхности, P – турбулентный теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой, B – теплообмен поверхности с грунтом, а $L \cdot M$ – это произведение скрытой теплоты испарения L на количество испаряемой влаги M [3].

В настоящей работе в качестве переменной будем рассматривать только радиационный баланс R , который представляет взаимосвязь солнечной радиации и температуры воздуха. Остальные величины положим как константы

$$R = \text{const.}$$

Радиационный баланс представляет собой сумму коротковолнового баланса R_1 (длина волны $\lambda = 0.01-4$ мкм) солнечной радиации и длинноволнового баланса R_2 ($\lambda = 4-100$ мкм) земной радиации

$$R = R_1 + R_2 = Q - D - E_e, \quad (2)$$

где Q – это суммарная солнечная радиация, достигающая поверхности Земли, D – отраженная солнечная радиация, а E_e – эффективное излучение земной поверхности.

Рассмотрим схему формирования радиационного баланса (рис. 1). Удельное количество солнечного тепла, приходящее на верхнюю границу атмосферы Земли за сутки определяется широтой местности, а также годовым и суточным движением Земли и может быть определено с помощью формул из [4]. При переходе через атмосферу около 22% отражаются обратно в космическое пространство, 20% поглощаются облаками, а оставшиеся 58% достигают Земли в виде прямой и рассеянной радиации, из которых 9% отражаются земной поверхностью [5]. Т.е. треть солнечной энергии,

приходящей на верхнюю границу атмосферы, отражается обратно, и только половина (49%) поглощается земной поверхностью и идет на нагревание.

Величину коротковолнового баланса можно записать в виде нескольких соотношений

$$R_1 = Q - D = Q - A \cdot Q = Q \cdot (1 - A), \quad (3)$$

где Q – сумма прямой и рассеянной радиации, D – отраженная радиация, а A – альbedo земной поверхности. Величину R_1 также называют поглощенной радиацией.

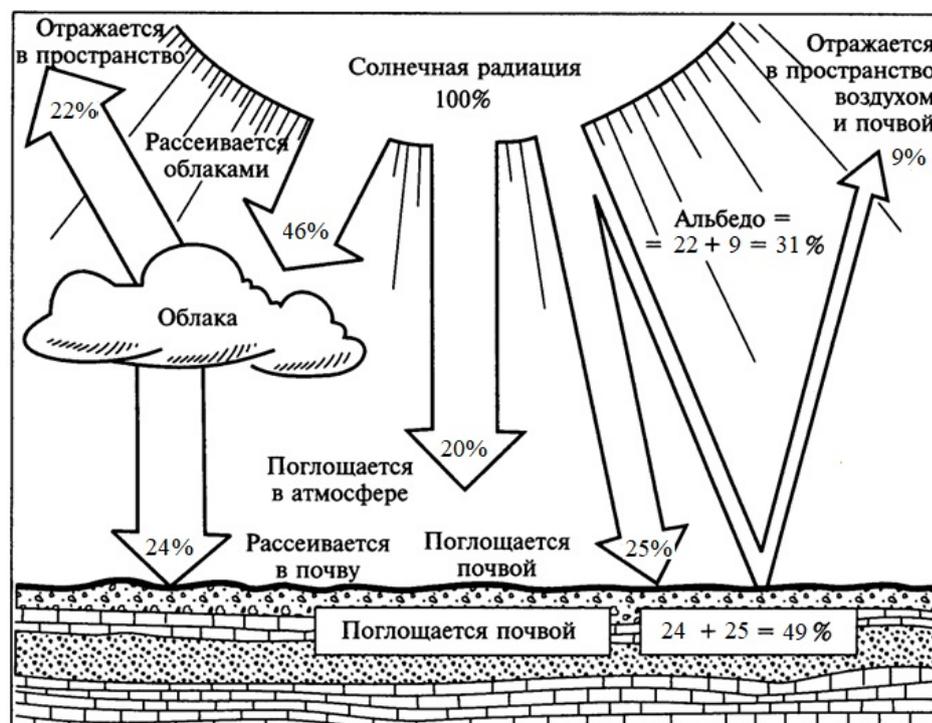


Рис. 1. Схема формирования коротковолнового радиационного баланса земной поверхности.

Поглощая коротковолновую солнечную радиацию, земная поверхность нагревается и становится источником длинноволнового излучения

$$E_{e,0} = E_s - \delta \cdot E_a. \quad (4)$$

Поток теплового излучения подстилающей поверхности, направленный в сторону атмосферы обозначают E_s и вычисляют по формуле Стефана-Больцмана для серого тела [6]

$$E_s = \delta \cdot \sigma \cdot T_0^4, \quad (5)$$

где $\delta = 0.95$ – относительная излучательная способность поверхности, T_0 – абсолютная температура поверхности в К, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана. Вычисление противоизлучения атмосферы проводится по полуэмпирическим формулам, например по формуле Д. Брента [6]

$$E_a = \sigma \cdot T^4 \cdot (a' + b\sqrt{e}), \quad (6)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – абсолютная температура воздуха, e – парциальное давление водяного пара в гПа, $a' = 0.61$, $b = 0.05$.

С учетом влияния облачности эффективное излучение будет равно

$$E_e = E_{e,0} \cdot (1 - c \cdot n), \quad (7)$$

где $E_{e,0}$ – эффективное излучение при безоблачном небе, n – облачность в долях от единицы, $c = 0.69$.

Для вычисления радиационного баланса использованы основные параметры: суммарная радиация Q (МДж/м²), альbedo местности A (%), температура воздуха T (°С), температура поверхности T_0 (°С), парциальное давление водяного пара e (гПа) и облачность n (баллы). Данные по суммарной радиации для двух метеостанций Диксон и Туруханск получены на сайте Мирового центра радиационных данных и хранятся в виде таблиц суточных данных [7]. Дополнительно использованы многолетние данные по суммарной радиации и отражательной способности поверхности из справочников по климату СССР 1980 года [8]. Остальные метеорологические параметры получены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД) в срочном разрешении [9].

Программный комплекс. Для вычисления составляющих радиационного баланса был разработан программный комплекс, состоящий из трех блоков (рис. 2). Первый блок программы отвечает за сбор и подготовку первичных данных. Программы первого блока выполняют задачи по восстановлению пропущенных сроков, поиску и заполнению пустых ячеек единым значением – «-999.9» и преобразованию данных в единый формат.

Каждая из программ работает со своим типом данных: RadTblInDay.mcd – с табличными данными по радиации, SrokInDay.mcd – со срочными данными, DayInTable.mcd – с ежедневными данными. Программа Ins2bd.mcd рассчитывает количество солнечного тепла на верхней границе атмосферы [4].

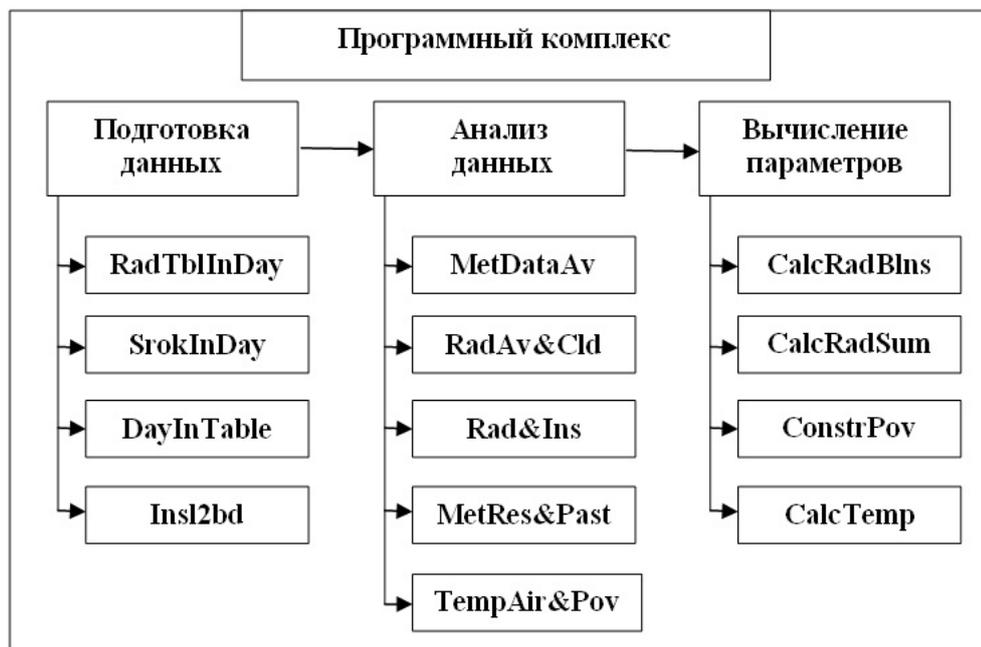


Рис. 2. Блок-схема программного комплекса.

Второй блок программы отвечает за анализ метеорологических данных. Он состоит из нескольких программ, которые отвечают за свои функции. Например, программа MetDataAv.mcd строит графики и вычисляет многолетние средние значения для заданного метеорологического параметра. Программы RadAv&Cld.mcd, Rad&Ins и TempAir&Pov.mcd предназначены для сравнения двух параметров: первая для радиации и облачности, вторая для радиации и инсоляции, а третья – для температуры воздуха и температуры поверхности.

Третий блок отвечает за вычисление составляющих радиационного баланса и температуры воздуха. Программа CalcRadBlns.mcd вычисляет радиационный баланс и отдельные его составляющие для заданной метеостанции. Программа ConstrPov.mcd строит сеточные данные (по широте и долготе) выбранного метеорологического параметра для будущей реконструкции температур по северу Западной Сибири. И, наконец,

программа CalcTemp.mcd вычисляет палеотемпературы для заданной метеостанции.

Вычисление составляющих радиационного баланса. Анализ метеорологических данных демонстрирует существенные колебания по суммарной радиации, температурам воздуха и поверхности, облачности и другим параметрам, в то время как величина инсоляции на верхней границе атмосферы остается практически неизменной (<1%). Поэтому составлены многолетние ряды данных для каждого метеорологического параметра по метеостанциям, на которых имеются результаты актинометрических наблюдений.

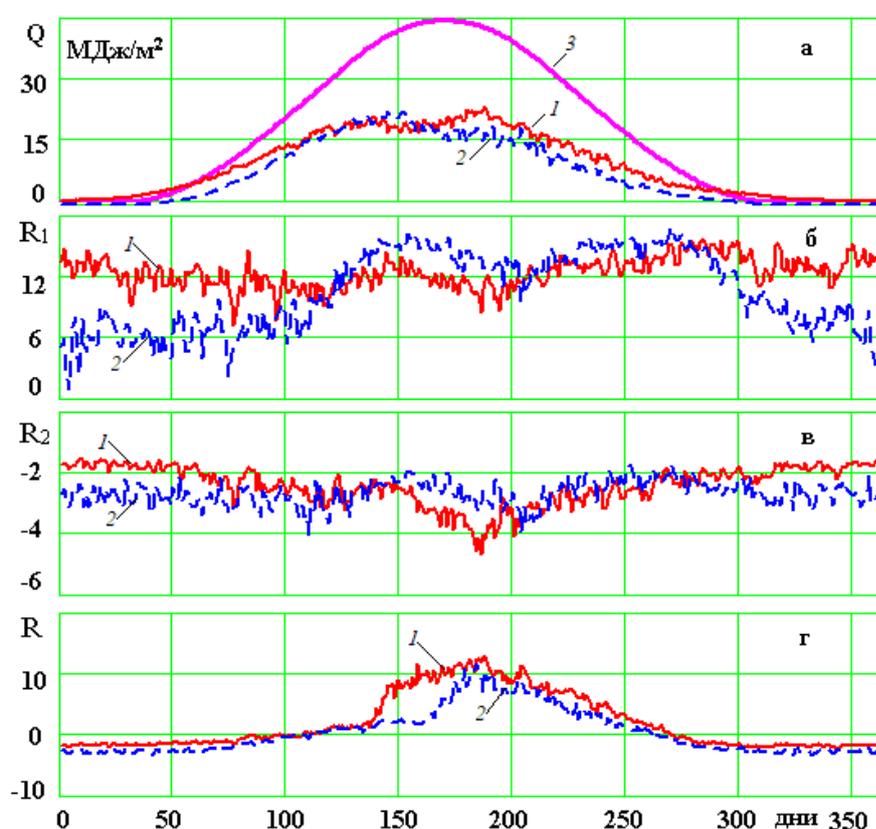


Рис. 3. Изменение многолетних данных в течение года: а) суммарной солнечной радиации (Q), б) поглощенной радиации (R_1), в) эффективного излучения (R_2) и г) радиационного баланса (R) для двух метеостанций Туруханск (линия 1), Диксон (линия 2) в $\text{МДж}/\text{м}^2$; линия 3 – инсоляция на верхней границе атмосферы для широты Туруханска (65.78° с.ш.).

По многолетним данным были рассчитаны составляющие радиационного баланса: поглощенная радиация (R_1), эффективное излучение

($R_2 = -E_e$) и непосредственно сам радиационный баланс (R). Результаты вычислений приведены на рис. 3 для двух северных метеостанций – Туруханска (линия 1) и Диксона (линия 2). В качестве сравнения на рис. 3а линией 3 приведено изменение солнечной радиации на верхней границе атмосферы на широте Туруханска (65.78° с.ш.).

Значение радиационного баланса (рис. 3г) в течение всего года выше для более южной метеостанции Туруханск, чем для метеостанции Диксон.

Реконструкция температуры воздуха проведена с помощью уравнения радиационного баланса. С помощью преобразований формулы (2), подставляя зависимости (3) и (7) и выражая T , была получена формула для вычисления температуры воздуха

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q \cdot (1-A) - R - \delta \cdot \sigma \Delta T^4 \cdot (1-c \cdot n)}{\delta \cdot \sigma \cdot (a - b \cdot \sqrt{e}) \cdot (1-c \cdot n)}} \quad (9)$$

где $Q = I \cdot k$, I – инсоляция на верхней границе атмосферы, k – средний коэффициент проникновения радиации через атмосферу, R – радиационный баланс, $\Delta T^4 = (T_0 - T)^4$ – разница между температурой поверхности T_0 и температурой воздуха T .

С помощью формулы (9) были рассчитаны среднемесячные температуры воздуха и отклонения этих температур от среднего значения современной эпохи

$$\Delta T_{i,j} = T_{i,0} - T_{i,j}, \quad (10)$$

где $T_{i,0}$ – средняя температура месяца i в настоящую эпоху, а $T_{i,j}$ средняя температура месяца в момент времени j , $i = 1..12$, $j = 0..-1000$ (шаг $h = 10$ лет).

Первые расчеты (для станции Туруханск) показали прямую зависимость значений короткопериодных колебаний инсоляции и температуры воздуха; расчётные летние температуры воздуха и сумма инсоляции понизились за последнюю тысячу тыс. лет; расчётные зимние температуры и инсоляции повысились. Расчеты математической модели показали, что при сохранении постоянства всех метеорологических параметров на уровне современных, и равномерном уменьшении инсоляции,

современная летняя температура воздуха уменьшилась на 4°C , а современная зимняя температура незначительно повысилась.

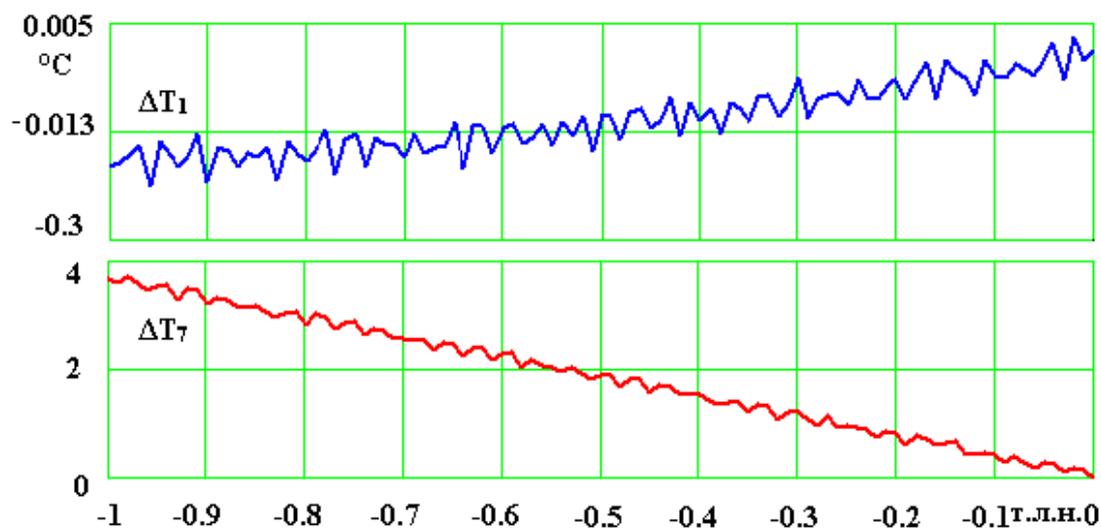


Рис. 4. Рассчитанные значения отклонений температуры воздуха от современных значений по метеостанции Туруханск: ΔT_1 – для января и ΔT_7 – для июля в $^{\circ}\text{C}$ за последнюю тысячу лет.

Полученные значения палеотемператур отличаются от известных палеореконовструкций по геологическим, геофизиологическим и ботаническим данным [1]. Следовательно, модель требует доработки для более объективной оценки палеотемператур.

Заключение

Разработанный программный комплекс позволяет вычислять составляющие радиационного баланса и восстановить температуру воздуха в прошлом.

Первые результаты вычислений для метеостанции Туруханск показали прямую зависимость температуры от радиации и достаточно большие изменения температуры воздуха (4°C для июля) при сохранении остальных метеорологических параметров на уровне современных значений. Для увеличения объективности математической модели необходимо разбить интервал на более короткие отрезки – основные рубежи голоцена, учесть взаимовлияние метеорологических параметров и, используя уравнение

теплового баланса, вывести новую формулу для вычисления палеотемператур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Гидрометеиздат, Ленинград 1980, 352 с.
2. Смульский И.И. Основные положения и новые результаты астрономической теории изменения климата / Институт криосферы Земли СО РАН. – Тюмень, 2014. Рус. Деп. в ВИНТИ РАН 30.09.2014, № 258-B2014
3. Общее мерзлотоведение (геокриология): учебник – 2-е изд. / В.А. Кудрявцев. – М.: Изд-во МГУ, 1978, 464 с.
4. Смульский И.И., Кротов О.И. Новый алгоритм расчета инсоляции Земли / Институт криосферы Земли СО РАН. – Тюмень, 2013. – Рус. Деп. в ВИНТИ 08.04.2013, № 103-B2013.
5. Метеорология и климатология: учебник. – 7-е изд. / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – М.: Изд-во Моск. Ун-та: Наука, 2006, 582 с.
6. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Гидрометеорологическое издательство. Ленинград, 1956 г.
7. Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова – Мировой центр радиационных данных. URL: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/>
8. Научно-прикладной справочник по климату СССР, серия 3, выпуски 17, 21, многолетние данные, Гидрометеиздат, 1990-1998 гг.
9. Всероссийский научно_исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИГМИ_МЦД). URL: <http://meteo.ru/data>.