

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КЛИМАТА БЕЛАРУСИ

О.П.Мешик

Политехнический институт
Брест, Республика Беларусь

В работе приводятся методики исследования и моделирования той части солнечной энергии, которая активно участвует в процессах тепло-влагообмена на деятельной поверхности земли. Даются расчетные зависимости для оценки в эколого - мелиоративных целях суточных значений суммарной радиации, инсоляции при отсутствии земной атмосферы, величин отраженной радиации и эффективного излучения, положительного и скомпенсированного радиационного баланса, максимально возможного испарения и др.

СОЛНЦЕ, СУММАРНАЯ, КОРОТКОВОЛНОВАЯ, РАДИАЦИЯ,
ИНСОЛЯЦИЯ, РАДИАЦИОННЫЙ, БАЛАНС, МАКСИМАЛЬНО, ВОЗМОЖНОЕ,
ИСПАРЕНИЕ

Солнце является основным источником теплоэнергетических ресурсов климата на Земле. Изменения наклона земной оси (сезонные колебания) по отношению к плоскости орбиты (эклиптики) и вращение (суточные колебания) Земли вокруг оси определяют интенсивность солнечного излучения на земную поверхность. Интенсивность солнечного излучения для реального пункта исследуемой территории можно представить функцией его географических координат - широты (φ) и долготы (λ), высоты (h) местности и времени (t): $Q=f(\varphi, \lambda, h, t)$. Количество солнечной радиации, приходящее на верхнюю границу атмосферы, перпендикулярную к солнечным лучам, и приведенное к среднему расстоянию между Солнцем и Землей, принято называть солнечной постоянной (Q_0). Согласно рекомендациям Международной комиссии по радиации, уточненное значение солнечной постоянной (Q_0) составляет $1,37 \text{ кВт/м}^2$. В дальнейших исследованиях нами используется именно соотношение - $Q_0 \approx 1,37 \text{ кВт/м}^2$.

В распределении солнечной энергии и превращениях ее в атмосфере, на деятельной поверхности участвует множество факторов. Основные из них: состояние облачности; профили температуры, водяного пара и озона; наличие пыли и дымки в атмосфере; спектральные свойства подстилающей поверхности; концентрация в атмосфере CO_2 ; атмосферное давление на уровне поверхности Земли и др. Существующие модели оценки поступающей

солнечной энергии, основанные на учете этих факторов, как правило, громоздки и сложны для практического использования. Нами предлагается относительно простая методика поэтапного моделирования суточных величин коротковолновой радиации (Q_i), поступающей на земную поверхность. На первом этапе определяется суточная инсоляция (Q_i), при отсутствии земной атмосферы, по зависимости [1]

$$Q_i = \frac{2Q_0}{(r_i / r_0)^2} \left[t_{oi} \sin \varphi \sin \delta_i + \frac{\Pi}{2\pi} \cos \varphi \cos \delta_i \sin \left(\frac{2\pi}{\Pi} t_{oi} \right) \right], \quad (1)$$

где $Q_0 = 1,37 \text{ кВт/м}^2$ - солнечная постоянная; $r_0 = 149597870 \text{ км}$ - среднегодовое расстояние между Землей и Солнцем; r_i - расстояние между Землей и Солнцем в i -сутки, км; t_{oi} - момент восхода (захода) Солнца в i -сутки, час; $\Pi = 24$ часа - продолжительность солнечных суток; φ - географическая широта местности, °; δ_i - геоцентрическое склонение Солнца в i -сутки, °.

Решение уравнения (1), как видно, связано с предварительным нахождением параметров - r_i , t_{oi} и δ_i , непостоянных во времени. В течение года расстояние между Землей и Солнцем незначительно изменяется ($\pm 1,65\%$ от r_0) и при эксцентриситете земной орбиты (e), равном 0,017, составляет в афелии - $r_a \approx r_0(1+e)$ около 152 млн.км, в перигелии - $r_n \approx r_0(1-e)$ около 147 млн.км., изменение суточной инсоляции может достигать 7%, т.е. практически значимой величины. Расчеты соответствующих расстояний между Землей и Солнцем (r_i) выполняются, согласно законам Кеплера по уравнениям эллиптической орбиты Земли.

Наиболее весомый вклад в величину суточной инсоляции (Q_i) вносит изменение во времени геоцентрического склонения Солнца (δ_i) - угла между линией: Солнце - Земля и плоскостью экватора. Расчеты величины (δ_i) нами выполняются по методике, изложенной в работе [2]. При этом, весь процесс моделирования поступающей на земную поверхность коротковолновой радиации осуществляется, исходя из того, что полный годовой период составляет 360° , а его начало - 1 марта. Таким образом, можно обойти проблему високосного года и упростить вычисления. Некоторый годовой угол Y_i в сутки (i), исходя из того, что в день весеннего равноденствия (21

марта) $Y_i=0^\circ$, будет определяться как

$$Y_i = \left(i - \frac{21}{365} \right) \cdot 360^\circ \quad (2)$$

С учетом зависимости (1), величину геоцентрического склонения Солнца (δ_i) для любых (i) суток года определяем по эмпирической формуле [2]

$$\begin{aligned} \delta_i = & 0,38092 - 0,76996 \cos Y_i + 23,26500 \sin Y_i + 0,36958 \cos 2Y_i + \\ & + 0,10868 \sin 2Y_i + 0,01834 \cos 3Y_i - 0,16650 \sin 3Y_i - 0,00392 \cos 4Y_i + \\ & + 0,00072 \sin 4Y_i - 0,00051 \cos 5Y_i + 0,00250 \sin 5Y_i + 0,00442 \cos 6Y_i. \quad (3) \end{aligned}$$

Солнечная радиация поступает на земную поверхность от восхода ($-t_{0i}$) до захода ($+t_{0i}$) Солнца и в зависимости от географической широты местности (ϕ), солнечного склонения (δ_i) соответствующего времени года. Момент восхода (захода) Солнца нами приурочен к местному полдню и определен из соотношения: $\pm t_{0i} = D/2$, где D - долгота дня, рассчитанная как разность истинного солнечного времени между заходом (З) и восходом (В) Солнца. Время восхода (захода) Солнца в любые сутки (i) нами определяется линейной интерполяцией с использованием величин (В) и (З), приведенных на середину каждого месяца в [3]. При этом, погрешность вычислений составила $\pm (2...5)$ мин. Впервые расчеты суточной инсоляции (Q'_i) по формуле, подобной (1), выполнялись М. Миланковичем. Вместо моментов восхода ($-t_{0i}$) и захода ($+t_{0i}$) Солнца использовались часовые углы этих моментов $\pm \psi_{0i}$, найденные по формуле [1]

$$\cos \psi_{0i} = - \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg} \delta_i \quad (4)$$

Среднесуточные величины инсоляции при отсутствии атмосферы (Q'_i) - зависимость (1), и суммарной коротковолновой радиации (Q_i), полученные способом полиномиальной интерполяции из измеренных в реальных атмосферных условиях среднесуточных значений (Q_i) [3] для пункта Минск, приведены на графике (рисунок 1).

Сравнение суточных величин Q'_i и Q_i (рисунок 1) показывает, что в разрезе года среднесуточная суммарная коротковолновая радиация (Q_i) следует синхронно инсоляции без учета влияния атмосферы (Q'_i). В холодный период превышение Q'_i над Q_i практически постоянно (около $4...5 \text{ мДж/м}^2$), хотя в теплый период эта разность увеличивается до $6...18 \text{ мДж/м}^2$.

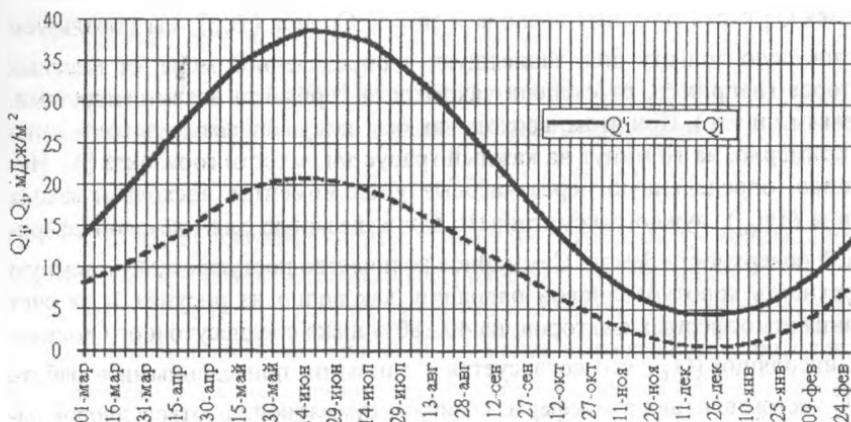


Рисунок 1 Среднесуточное количество инсоляции без учета влияния атмосферы (Q_i) и суммарной коротковолновой радиации (Q_i) в пункте Минск.

Различными авторами величины суточной инсоляции (без влияния атмосферы) - Q_i определяются с различной точностью, хотя в цитируемых источниках используются, можно сказать, идентичные методики (таблица 1).

Таблица 1 Сравнение суточных величин инсоляции без учета влияния атмосферы (Q_i) по пункту Минск

Литературные источники	Суточная инсоляция (Q_i) по календарным датам, мДж/м ²							
	21.III	13.IV	6.V	29.V	22.VI	15.VII	8.VIII	31.VIII
М.Миланкович [1]	22,2	29,4	35,8	40,2	41,9	40,0	35,4	29,1
Согласно [4]	21,5	29,0	33,9	37,3	38,6	36,7	32,2	26,8
Автор	19,5	26,4	32,7	37,0	38,6	37,4	32,5	26,3

Литературные источники	Суточная инсоляция (Q_i) по календарным датам, мДж/м ²							
	23.IX	16.X	8.X	30.XI	22.XII	13.I	14.II	26.II
М.Миланкович [1]	22,0	15,2	9,8	6,4	5,3	6,5	9,9	15,4
Согласно [4]	20,5	13,3	8,2	5,5	5,0	7,3	12,8	15,1
Автор	19,5	13,2	8,3	5,5	4,6	5,5	10,4	13,2

Примечание: Данные источников [1] и [4] нами приведены к 53,9°сш (Минск).

Величины инсоляции, полученные нами, несколько занижены, т.к., определяя Q'_i через моменты восхода и захода Солнца ($\pm t_{0i}$), мы используем фактическую долготу дня, зависящую, в определенной мере, от местных факторов (например, от степени закрытости горизонта возвышенностями, деревьями и т.п.). При этом, восход, как бы, наступает позже, заход - раньше, примерно, на 10 минут на каждый градус закрытости горизонта [3]. Инсоляцию, определенную через часовые углы моментов восхода и захода Солнца ($\pm \psi_{0i}$), нужно рассматривать как возможную для идеально сферической поверхности Земли. Суммарное количество поступающей на земную поверхность коротковолновой радиации, как видно из рисунка 1, за счет влияния атмосферных факторов, на 40...80% ниже среднесуточного количества инсоляции (Q'_i), что согласуется с данными, приведенными в работе [4]. С учетом влияния атмосферы, величина суммарной коротковолновой радиации на земной поверхности (Q_i) может рассчитываться по уравнению [5]

$$Q_i = \frac{Q_0}{(r_i / r_0)^2} \int_{-t_{0i}}^{t_{0i}} p \cdot (\sin \varphi \sin \delta_i + \cos \varphi \cos \delta_i \cos \psi_{0i}) dt \quad (5)$$

где p - коэффициент прозрачности атмосферы, - неизвестная величина, отличающаяся неравномерным пространственно-временным распределением.

Большинством авторов суммарная коротковолновая радиация оценивается с использованием эмпирических и полуэмпирических связей (Q_i) с продолжительностью солнечного сияния ($T_{\text{исолн}}$) и баллом облачности (O_i). Используя экспериментальные данные по суммарной коротковолновой радиации (п. Минск, 1936...1952 гг.) и продолжительностям солнечного сияния ($T_{\text{исолн}}$), приведенные к суточным значениям, мы получили зависимость

$$Q_i = Q_{\text{мин}} + 1,649 T_{\text{исолн}} \quad (6)$$

где $Q_{\text{мин}} = 0,207 \text{ МДж/м}^2$ - величина суммарной коротковолновой радиации при отсутствии солнечного сияния ($T_{\text{исолн}} = 0$), сформированная, главным образом, за счет рассеянной коротковолновой радиации ($Q_{\text{ирас}}$).

По уравнению (6) можно рассчитывать суточные величины суммарной коротковолновой радиации (Q_i), поступающей в реальные годы на территорию Беларуси (коэффициент корреляции этой связи $r = 0,97 \pm 0,01$).

Исследование связей среднесуточных характеристик радиационного режима подстилающей поверхности с облачностью (O_i) дало возможность ус-

тановить соответствующие зависимости:

для суммарной коротковолновой радиации -

$$Q_i = a + bO_i, \text{ при } r = -0,89 \pm 0,01 ; \quad (7)$$

для радиационного баланса подстилающей поверхности -

$$R_i = a_1 + b_1 O_i, \text{ при } r = -0,90 \pm 0,01 , \quad (8)$$

где $a, b; a_1, b_1$ - коэффициенты уравнений регрессии; r - коэффициенты корреляции (приведены для актинометрического пункта Минск).

Влияние облачности (O_i) на суточные величины отраженной радиации ($R_{\text{отр}}$) и эффективного излучения ($E_{\text{эф}}$) менее выражено. Внутригодовому распределению среднесуточного количества облачности ($O_{\text{р,балл}}$) свойственно большое количество гармоник. В связи с этим, приближение аппроксимирующей функции к значениям общей облачности, заданной дискретным множеством точек, осуществляется многочленами по типу рядов Фурье. Однако, необходимо считаться с тем, что среднее значение облачности - непоказательно, т.к. не преобладает в период осреднения и находится в градации количества облаков наименее вероятным. Визуальная оценка количества облаков по доле закрытости неба - субъективна, а инструкция метеослужбы по составлению наблюдателями отчетов - неопределенна. Определять среднесуточное количество суммарной коротковолновой радиации (Q_i) по среднему баллу облачности было бы некорректно. Следовательно, необходим комплексный параметр, отражающий в целом пропускную способность атмосферы.

В связи с изложенным, на втором этапе моделирования среднесуточного количества суммарной коротковолновой радиации (Q_i), нами установлена зависимость между величинами Q_i и Q'_i . Для Минска она имеет вид

$$Q_i = a + bQ'_i, \text{ при } r = 0,997 \pm 0,001 , \quad (9)$$

где $a = -1,542, b = 0,575$ - коэффициенты уравнения регрессии, как комплексные параметры, отражающие в реальных условиях пропускную способность атмосферы.

Данные коэффициенты имеют небольшую пространственно - временную изменчивость в пределах территории Беларуси. Отмечается тенденция к некоторому уменьшению коэффициента (a) в сторону низких широт. Уравнение (9) рекомендуется использовать при оценке среднесуточного

количества суммарной коротковолновой радиации (Q_i) в любом пункте Беларуси. График сравнения измеренных ($Q_{i\text{изм}}$) и рассчитанных ($Q_{i\text{р}}$) среднесуточных величин суммарной коротковолновой радиации представлен на рисунке 2 (актинометрический пункт Василевичи). При этом, измеренные суточные величины получены по экспериментальным месячным данным способом полиномиальной интерполяции, а рассчитанные - моделированием с использованием формул (1), (9).

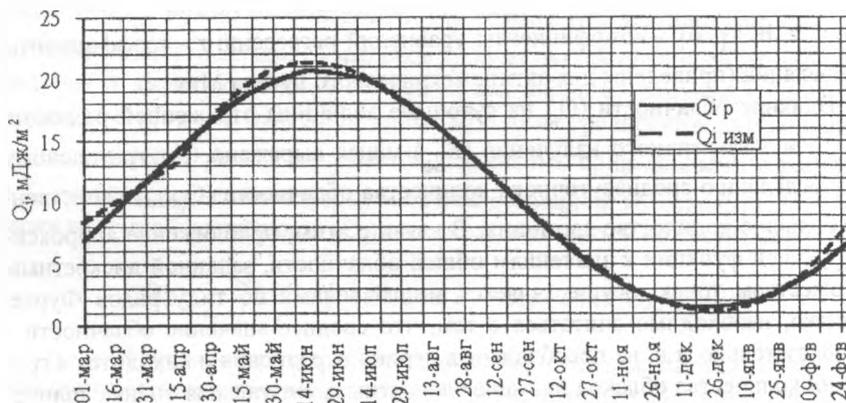


Рисунок 2 График связи измеренных ($Q_{i\text{изм}}$) и рассчитанных ($Q_{i\text{р}}$) по формулам (1), (9) среднесуточных величин суммарной коротковолновой радиации (Q_i) в актинометрическом пункте Василевичи.

Хорошая сходимость измеренных и рассчитанных величин (Q_i) указывает на перспективность используемой методики.

Суточное значение скомпенсированного радиационного баланса (R_i), как результирующая суммарной коротковолновой радиации (Q_i), отраженной радиации ($R_{i\text{отр}}$) и эффективного излучения ($E_{i\text{эф}}$) определяется по уравнению

$$R_i = Q_i - R_{i\text{отр}} - E_{i\text{эф}} \quad (10)$$

Непосредственный расчет величин радиационного баланса (R_i) по уравнению (10) возможен при наличии данных по отраженной радиации ($R_{i\text{отр}}$) и эффективному излучению ($E_{i\text{эф}}$). Отраженная радиация ($R_{i\text{отр}}$) функционально связана с альбедо (A_i) - отражательной способностью подстилающей поверхности, и определяется как

$$R_{\text{ютр}} = A_i I_i \quad (11)$$

Среднесуточные значения альбедо (A_i), для пункта Минск, получены из среднемесячных величин [3] способом полиномиальной интерполяции. Существующая в настоящее время методика определения среднего суточного значения альбедо, как среднего арифметического по данным срочных наблюдений, проводимых метеослужбой через каждые 3 часа, не всегда адекватна динамично изменяющимся реальным условиям. В основном, это касается летнего периода, когда велика продолжительность светового дня и влажность испаряющего почвенного слоя может существенно колебаться в интервале между этими сроками. Более точным является расчет (A_i) по данным непрерывной регистрации. При отсутствии материалов наблюдений за величиной A_i , необходимо пользоваться данными, полученными эмпирическим путем и характеризующими сезонное изменение альбедо различных поверхностей и растительных покровов [6].

Недостаточность опытных данных по излучению земной поверхности (E_{i3}) и противоизлучению атмосферы (E_{ia}) не позволяет непосредственно определять величину ($E_{i\text{эф}}$). Здесь уместно использовать косвенные методы, базирующиеся на связях эффективного излучения с массовыми метеорологическими характеристиками. Анализ экспериментальных данных позволил установить наиболее тесные связи среднесуточных величин эффективного излучения ($E_{i\text{эф}}$) со среднесуточными температурами поверхности почвы ($t_{\text{почв}}$) и воздуха ($t_{\text{возд}}$). Для метеопункта Минск эти зависимости имеют вид:

$$E_{i\text{эф}} = \exp(0,766 + 0,048 t_{\text{почв}}) \quad (12)$$

$$E_{i\text{эф}} = \exp(0,781 + 0,056 t_{\text{возд}}) \quad (13)$$

Для уравнений (12) и (13) характерны высокие коэффициенты корреляции; соответственно, $r_{12} = 0,97 \pm 0,01$ и $r_{13} = 0,95 \pm 0,01$. Разработанные нами методики определения среднесуточных величин коротковолновой радиации (Q_i) и радиационного баланса (R_i) успешно апробированы при оценке естественного радиационного режима больших территорий (на материалах большинства метеопунктов Беларуси). На рисунке 3 представлены измеренные и рассчитанные по системе формул (1), (9), (11), (12), (10) величины среднесуточного радиационного баланса (R_i) в пункте Василевичи.

Отмечая хорошую сходимость измеренных и рассчитанных величин

(R_i), необходимо признать, что в точках перегиба аппроксимирующей функции имеет место занижение рассчитанных значений среднесуточного радиационного баланса (R_i) на $0,4...0,8 \text{ мДж/м}^2$ (июнь) и их завышение на $0,2...0,4 \text{ мДж/м}^2$ (конец декабря...начало января). Функция полиномиальной интерполяции величин радиационного баланса каждого месяца, при получении в эти периоды конкретных среднесуточных значений, не столь плавно описывает места перегибов кривой, здесь имеет место искажение фактических значений радиационного баланса (R_i). Более точные результаты, на данном направлении исследований, можно получить при использовании в расчетах среднесуточных значений радиационного баланса каждой декады (пентады).

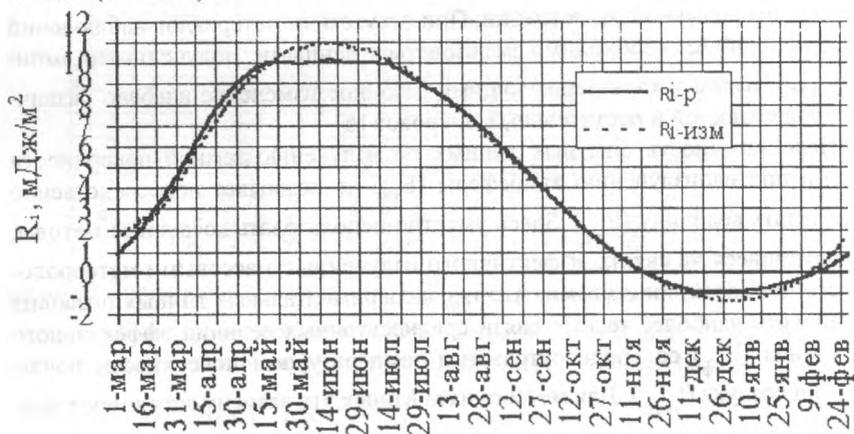


Рисунок 3 График сравнения измеренных и рассчитанных по системе формул (1), (9), (11), (12), (10) среднесуточных величин радиационного баланса (R_i) в пункте Василевичи.

Количественное распределение радиационного баланса по территории Беларуси подчиняется закону широтной зональности. Наибольшие значения (R_i) отмечаются на юге и юго-западе исследуемой территории, наименьшие - на севере. Выполненное исследование дает возможность количественно оценить ту часть приходящей на земную поверхность солнечной энергии, которая с определенной закономерностью распределяется по исследуемой территории и активно участвует в процессах тепловлагомассообмена на деятельной поверхности.

Суточные значения максимально возможного испарения (Z_{mi}) можно определять в ходе решения уравнения теплоэнергетического баланса. Однако, недостаточная изученность суточного и внутрисуточного хода величин турбулентного потока приземной атмосферы (P) и теплообмена в почве (B) ограничивает практическое использование принятой методики. Среднесуточные значения турбулентного потока приземной атмосферы и теплообмена в почве, полученные, скажем, из декадных или месячных норм, а затем использованные в балансовых уравнениях оказывают влияние на точность расчетов нормы Z_{mi} . Уравнение теплоэнергетического баланса пригодно для оценки максимально возможного испарения (Z_{mi}) в реальные годы, по реальным данным P и B , и за большие интервалы времени. Постановка вопроса о прямом вычислении суточных норм турбулентного теплообмена приземной атмосферы и теплообмена в почве преждевременна, вследствие невозможности получения репрезентативного периода, когда искомое среднесуточное значение исследуемой характеристики становится устойчиво постоянным. Виной тому является значительная амплитуда колебаний суточных значений P и B , которые в одни и те же годовые периоды могут иметь различные знаки.

В связи с изложенным, Z_{mi} определяем с использованием косвенных зависимостей. Например, для Минска они имеют вид:

$$Z_{mi} = -0,202 + 0,108Q_i', \text{ при } r = 0,99 \pm 0,001; \quad (14)$$

$$Z_{mi} = 0,106 + 0,186Q_i, \text{ при } r = 0,98 \pm 0,002; \quad (15)$$

$$Z_{mi} = 0,763 + 0,291R_i, \text{ при } r = 0,99 \pm 0,001. \quad (16)$$

Для оценки среднесуточных значений максимально возможного испарения (Z_{mi}) используем базовое уравнение (16), общего для территории Беларуси вида

$$Z_{mi} = a + bR_i, \quad (17)$$

где a, b - эмпирические коэффициенты.

Исследования показали, что в целом для территории Беларуси, коэффициенты (a) и (b) в уравнении (17) изменяются на 25...100% (таблица 2).

Таблица 2 Значения коэффициентов (a) и (b) уравнения (17) для территории Беларуси

Коэффициент	Северная часть	Центральная часть	Южная часть
a	0,50...0,65	0,65...0,84	0,84...0,99
b	0,26...0,28	0,28...0,31	0,31...0,33

Сравнение рассчитанных по формулам (1), (9), (11), (12), (10), (17) и полученных из среднемесячных значений Z_{mi} (способом полиномиальной интерполяции) среднесуточных значений максимально возможного испарения (пункт Василевичи) представлено на рисунке 4.

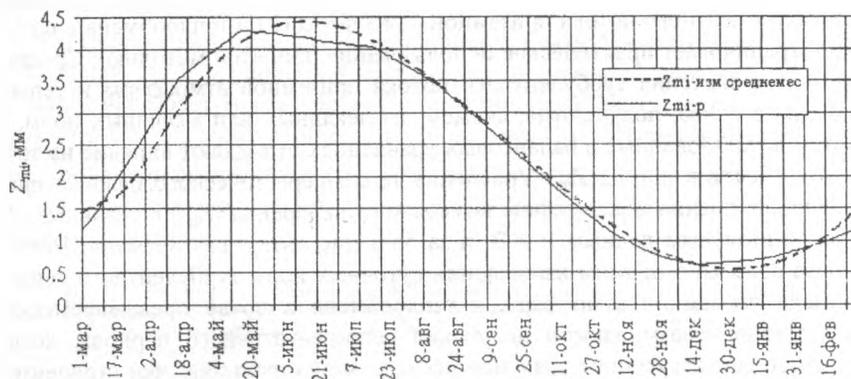


Рисунок 4 График сравнения среднесуточных величин (Z_{mi}) полученных различными способами для пункта Василевичи.

Суммирование величин Z_{mi} , определенных по системе формул (1), (9), (11), (12), (10), (17), позволяет получать декадные, месячные, годовые значения, практически соизмеримые с нормами максимально возможного испарения, полученными по интегральным зависимостям для соответствующих периодов.

Литература

1. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли.-Л.: Гидрометеоздат, 1991.-295с.
2. Франс Дж., Торнли Дж.Х.М. Математические модели в сельском хозяйстве / Под ред. Ерешко Ф.И.-М.: Агропромиздат, 1987.-400с.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР.-Сер.3.-Части 1-6, Вып.7.-Л.: Гидрометеоздат, 1987.-302с.
4. Климатология / Под ред. Дроздова О.А., Кобышевой Н.В.-Л.: Гидрометеоздат, 1989.-568с.
5. Кондратьев К.Я. Актинометрия.-Л.: Гидрометеоздат, 1965.-691с.
6. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Дьяченко Л.Н. и др. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков.-Л.: Гидрометеоздат, 1981.-232с.