

## РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС И ИСПАРЕНИЕ С ПОЛИГОНАЛЬНЫХ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

**Москвин Юрий Павлович**

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник,  
Государственный гидрологический институт  
25.00.27  
yrmosk@gmail.com

**Аннотация.** На основании данных многолетних экспедиционных наблюдений, разработаны формулы для расчета радиационного баланса и испарения с полигональных болот. Приведены результаты наблюдений и дана оценка применимости различных методов определения испарения в зоне распространения многолетней мерзлоты. Выполнен анализ изменчивости указанных величин для различных микроландшафтов полигональных болот на Крайнем Севере Западной Сибири.

**Ключевые слова:** Полигональные болота, многолетняя мерзлота, водный и тепловой режим болот, испарение, радиационный баланс.

## RADIATION BALANCE AND EVAPORATION FROM POLYGONAL BOGS OF WESTERN SIBERIA

**Moskvin Iurii Pavlovich**

Ph.D. of Geographical Sciences, Senior Research Fellow  
National Institute of Hydrology

**Abstract.** Formulae for calculating radiation balance and evaporation from polygonal bogs were developed based on long-term expeditionary observation data. Results of observations and feasibility assessment for various methods of calculating evaporation in permafrost zone are given. Variability of the abovementioned values for different polygonal bog microtopes of the far north of Western Siberia is analyzed.

**Key words:** Polygonal bogs, permafrost, water and thermal regime of bogs, evaporation, radiation balance.

Радиационный баланс является основой энергетических ресурсов деятельного слоя почво-грунтов. Большая часть радиационного баланса затрачивается на испарение – основную расходную составляющую как теплового, так и водного баланса болот. Поэтому определение радиационного баланса и испарения представляет большой интерес при решении целого ряда научных и практических задач.

Настоящая работа выполнена по результатам комплексных водно-тепlobалансовых исследований Государственного гидрологического института проведенных в 1982-91г. г. на полуострове Ямал в южной (бассейн р. Пяседей-Яха) и северной (бассейн р. Пухуце-Яха) его частях [1].

Результаты наблюдений за радиационным балансом зоны полигональных болот представлены в таблице 1.

Суммы радиационного баланса за теплый период года по данным наблюдений изменялись в относительно широких пределах: на севере Ямала от 49 до 70 кДж/см<sup>2</sup>, на юге – от 71 до 101 кДж/см<sup>2</sup>.

Выводы о пространственной изменчивости радиационного баланса, в силу пестроты подстилающей поверхности, нуждаются в уточнении. По предварительной оценке, величины радиационного баланса повышенных элементов мезорельефа на полигонально-мочажинных и полигонально-трещиноватых комплексах практически равны, а для поймен-

Таблица 1

Радиационный баланс, кДж/см<sup>2</sup>

Год	июнь	июль	август	сентябрь	Σ сезон
южный стационар					
1982	32,4 (23)	33,9	12,5	5,7 (26)	84
1983	24/9 (21)	35,6	17,6	5,1	83
1984	25,5 (21)	33,1	16,9	4,7	80
1985	39,3	32,0	13,8	5,2	90
1986	29,0	29,1	14,3	3,1 (20)	76
1987	13,8(13)	40,1	13,5	4,0 (21)	71
1988	36,8	34,5	15,7	5,0	92
1989	40,0	39,2	18,5	3,7 (22)	101
1990	40,5	40,4	14,8	2,8 (14)	99
северный стационар					
1987	4,7(5)	35,4	11,7	2,6 (20)	54
1988	21,2 (20)	32,9	14,0	1,7 (14)	70
1989	18,6 (20)	30,0	14,3	1,0 (15)	64
1990	18,1 (20)	35,4	13,6	2,4 (15)	70
1991	7,3 (5)	10,5	11,2	3,1	49

Примечание: в скобках указано количество дней наблюдений.

ных травяно-моховых микроландшафтов на 20-25% больше.

Анализ сезонного хода радиационного баланса показывает, что в течение теплого периода происходят значительные его изменения. На юге Ямала наибольшие значения радиационного баланса наблюдаются в последней декаде июня при средней интенсивности 1,4 кДж/(см<sup>2</sup>сут) и отдельных суточных максимумах до 2,0-2,2 кДж/(см<sup>2</sup>сут). На севере Ямала наибольшей интенсивности в 1,5 кДж/(см<sup>2</sup>сут) при суточных максимумах 2,1-2,3 кДж/(см<sup>2</sup>сут) величины радиационного баланса достигают в первой декаде июля. В дальнейшем отмечается плавное уменьшение радиационного баланса, вплоть до отрицательных значений в конце сентября. Распределение месячных величин

радиационного баланса в долях от его суммы за теплый период, по данным наблюдений следующее:

Таблица 2

**Распределение месячных величин радиационного баланса в долях от его суммы за теплый период**

Месяц	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Юг Ямала	0,36	0,40	0,17	0,06
Север Ямала	0,24	0,52	0,21	0,03

Полученные данные наблюдений позволили разработать методику расчета декадных величин радиационного баланса полигональных болот при отсутствии наблюдений.

Уравнение радиационного баланса, представляющего собой сумму коротковолновой и длинноволновой радиации, обычно записывается в следующем виде:

$$B = Q(1 - A) - I_{эф}, \quad (1)$$

где  $B$  – радиационный баланс, Дж/(см<sup>2</sup>сут),  $Q$  – суммарная солнечная радиация, Дж/(см<sup>2</sup>сут),  $A$  – альbedo в долях единицы,  $I_{эф}$  – эффективное излучение, Дж/(см<sup>2</sup>сут).

Расчет составляющих радиационного баланса встречает ряд трудностей, и, как правило, выполняется по зависимостям вида  $B = f(Q)$ . Однако, учитывая, что величина эффективного излучения определяется разностью температур воздуха и подстилающей поверхности болот, соотношение которых, в свою очередь, зависит от продолжительности светлого и темного времени суток, по данным наблюдений получены зависимости отношения  $B/Q$  как функции от светлого времени суток ( $T_{св}$ ), которые аппроксимируются следующими уравнениями:

для южной части полуострова Ямал

$$B/Q = 0,035T_{св} - 0,22 \quad (2)$$

для северной части полуострова Ямал

$$B/Q = 0,034T_{св} - 0,28 \quad (3)$$

Средние ошибки в определении радиационного баланса при расчете его с использованием наблюденных величин суммарной солнечной радиации составляют 3-5% за сутки и 1-2% за декаду.

Следует отметить, что единственный пункт наблюдений за суммарной солнечной радиацией находится в г. Салехард. Поэтому для определения суточных величин суммарной солнечной радиации на полуострове Ямал, использовалась методика, предложенная ГГО [2], в которой рассчитываются коэффициенты отношения сумм суммарной радиации при безоблачном небе в зависимости от средних значений балла общего количества облаков и

балла облаков нижнего яруса. Указанные значения отношений суммарной радиации при облачном и безоблачном небе рассчитаны по данным многолетних наблюдений ГГИ, выполненных на полуострове Ямал [1]. Средние ошибки в определении декадных значений радиационного баланса по данным наблюдений за облачностью составляют 6%, максимальные 26%.

Сложность определения испарения с болот зоны многолетней мерзлоты связана с наличием многолетней мерзлоты и значительной пестротой влажности поверхностного слоя почво-грунтов.

На основе материалов многолетних комплексных исследований (актинометрические, теплобалансовые, воднобалансовые и градиентные наблюдения) проведено сравнение различных методов определения величин испарения, на болотах зоны многолетней мерзлоты [2]. Результаты этого исследования показали, что использование испарителей ГГИ-Б1000 на мерзлых полигонах и буграх нарушает тепловой режим торфяной залежи и способствует более интенсивному, чем на болоте, протаиванию самого монолита. Это приводит к некоторому несоответствию составляющих теплового баланса торфяного монолита в испарителе и болота.

Метод теплового баланса, совместно с методом турбулентной диффузии, рекомендуемый Руководством [3], является наиболее приемлемым для определения испарения с болот зоны многолетней мерзлоты, поскольку позволяет определить испарение за любой промежуток времени и не связан с существенными нарушениями естественного покрова болот. Однако при исследовании режима испарения с полигональных болот встречаются некоторые трудности, связанные в основном с измерениями метеорологических характеристик в приземном слое в условиях большой пестроты болотных микроландшафтов, а также с частым чередованием болот (торфяная залежь) и обводненных тундровых урочищ, зачастую также имеющих полигональную структуру поверхности. Формирование профилей влажности и

температуры воздуха в приземном слое воздуха происходит на достаточно больших площадях и, при существенной пестроте подстилающей поверхности, испарение, рассчитанное методом теплового баланса, будет являться результирующей величиной, где доля испарения с болотного микроландшафта, занимающего наибольшую площадь, превалирует, но в некоторой степени искажена испарением с других элементов ландшафтов. Методика проведения теплобалансовых наблюдений на болотах зоны многолетней мерзлоты предусматривала организацию ежечасных “серийных” наблюдений в отдельные сутки [1]. Полученное таким образом испарение за отдельные сутки по методике, предложенной Романовым В.В. [4], увязывалось с основным определяющим фактором – радиационным балансом:

$$E = \alpha B + C, \quad (4)$$

где  $E$  – испарение, мм;  $\alpha$  – коэффициент, выведенный на основе анализа эмпирических связей  $E = f(B)$  и зависящий от влагообеспеченности подстилающей поверхности и фазы развития растений. Свободный член уравнения ( $C$ ) определяет испарение за счет других источников тепла.

Обобщенные данные наблюдений за испарением с полигональных болот Ямала, в виде сезонных сумм представлены в табл. 3.

полигональных болот. Роль адвективного теплопереноса в процессе испарения практически ничтожна. Затраты тепла на испарение с полигональных болот составляют в среднем 57% от радиационного баланса.

Распределение месячных сумм испарения в долях от его суммы за теплый период, по данным наблюдений, показано в табл.4.

Таблица 4

**Распределение месячных сумм испарения в долях от его суммы за теплый период**

Месяц	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Юг Ямала	0,36	0,41	0,18	0,05
Север Ямала	0,24	0,52	0,21	0,03

При этом наибольшая интенсивность испарения наблюдается в третьей декаде июня и составляет в среднем 2,8-3,6 мм/сут при суточных максимумах до 4,4 мм/сут.

С учетом испарения за холодный период, рассчитанного по формуле Кузьмина П.П. [5], среднее годовое испарение с полигональных болот на юге Ямала оценивается в 220 мм, на севере Ямала – в 185 мм.

Для изучения пространственной изменчивости испарения в зоне полигональных болот использовался метод испарителей. Сравнение

Таблица 3

**Суммарное испарение за теплые периоды лет наблюдений (мм)**

Годы	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	среднее
Юг Ямала	188	186	180	202	168	159	205	226	220		194
Север Ямала						126	161	148	160	113	142

Анализ материалов наблюдений показывает на определяющую роль радиационного баланса в процессе испарения с поверхности

данных параллельных наблюдений за испарением теплобалансовым и весовым методами показало на их высокую сходимость. Так,

для месячных величин испарение, полученное методом испарителей на юге Ямала на 2%, на севере – на 8% больше рассчитанного по тепловому балансу.

На различных болотных микроландшафтах Ямала площади пониженных форм мезорельефа составляют от 30% (в полигонально-трещиноватых микроландшафтах) до 90% (в травяных и мохово-травяных микроландшафтах). Доля испарения с пониженных элементов мезорельефа составляет на юге Ямала – 71%; на севере Ямала – 87% от испарения в целом с полигональных болот.

По предварительным данным, травяная растительность увеличивает испарение в среднем на 26%, а лишайниковая уменьшает более чем в 2 раза по сравнению с мохово-кустарничковой.

По результатам многолетних серийных наблюдений в зоне полигональных болот были получены устойчивые зависимости испарения от радиационного баланса. В частности, для юга Ямала подобная зависимость описывается формулой:

$$E = 2,23 B - 0,03, \quad (5)$$

где  $E$  – испарение, мм/сут;  $B$  – радиационный баланс, кДж/см<sup>2</sup>сут.

Аналогичная формула для севера Ямала:

$$E = 2,31 B - 0,08. \quad (6)$$

Наблюдение за испарением в различных элементах мезорельефа методом испарителей позволили получить расчётные зависимости для определения испарения с различных микроландшафтов в зоне полигональных болот.

Упомянутые зависимости отличаются только значениями коэффициента  $\alpha$ , величины которого приведены в таблице 5.

Таблица 5  
**Значения коэффициента  $\alpha$  в формуле (4) для различных микроландшафтов в зоне полигональных болот**

Микроландшафт	$\alpha$ , мм см <sup>2</sup> /кДж
Юг Ямала	
Полигонально-трещиноватый	1,76
Полигонально-мочажинный	2,23
Полигонально-бугристо-топяной	2,19
Мохово-травяные (талые)	2,37
Север Ямала	
Полигонально-трещиноватый	2,31
Полигонально-бугристо-топяной	2,49
Полигонально-валиково-топяной (пойма)	2,60
Травяные, мохово-травяные (талые)	2,66

Среднее годовое испарение с Южно-Ямального ландшафта составляет 180 мм. Согласно наблюдениям ГГИ, среднегодовое значение нормы осадков для этой зоны 435 мм, норма стока 280 мм, следовательно, норма испарения в водном балансе рассматриваемой территории составляет 155 мм. Таким образом, невязка среднегодовых значений элементов водного баланса равна 25 мм или менее 6% приходной части уравнения.

**Список литературы**

1. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Под редакцией С.М.Новикова. – СПб ВВМ. 2009. 536 с.
2. Романов В.В. Гидрофизика болот. – Л.:Гидрометеиздат, 1961. – 359
3. Руководство по теплобалансовым наблюдениям. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 149 с.
4. Москвин Ю.П. Водно-тепловой режим бугристых болот Западной Сибири и его расчет. – Автореферат на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук. – Л.: 1985. – 16 с.
5. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 178 с.