

ГИДРОЛОГИЯ И МЕЛИОРАЦИЯ ТОРФЯНЫХ БОЛОТ

УДК 556.562.048

И. Л. Калиужный, К. Д. Романюк

ИСПАРЕНИЕ С БОЛОТНЫХ МАССИВОВ ЗОНЫ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ

Рассматриваются результаты многолетних стационарных инструментальных наблюдений за испарением с болотных массивов. Показано, что средние многолетние величины испарения в зоне олиготрофных болот изменяются от 178 до 420 мм, а их коэффициенты вариации – от 0.1 до 0.3. Анализируются основные факторы, обуславливающие процесс испарения с болот, а также закономерности изменения среднемесячных величин испарения с отдельных микроландшафтов, а в пределах их – по формам микрорельефа.

Ключевые слова: *испарение, олиготрофные болота, вегетационный период, солнечная радиация, комплексный микроландшафт, неориентированный микрорельеф, уровень болотных вод, статистические характеристики.*

Испарение является основной составляющей частью водного и теплового баланса болотных массивов. Знание величин испарения необходимо для решения многих теоретических и практических вопросов, возникающих при проведении природоохранных мероприятий и хозяйственного освоения болот. Наиболее полные многолетние систематические наблюдения за испарением с олиготрофных болотных массивов были организованы в конце 50-х гг. прошлого столетия и проведены на болотных гидрологических стационарах Гидрометслужбы. В основу организации сети этих наблюдений были положены работы К. Е. Иванова, В. В. Романова, Н. М. Топольницкого, Л. Г. Бавиной и др.

Испарение с болотных массивов состоит из двух компонент: физического испарения воды, содержащейся в свободном или в связанном состоянии в их деятельном слое, и транспирации болотной растительности. Отсюда и приборы, применяемые для определения испарения с поверхности болот, должны фиксировать обе эти составляющие. Основными приборами для измерения величин испарения являются болотные весовые испарители ГГИ-Б-1000 [1] с площадью испаряющей поверхности 1000 см² и высотой монолита в испарителе, равной толщине деятельного слоя. Испарители позволяют определять величины испарения в болотных микроландшафтах с ориентированным и неориентированным в плане микрорельефом. Модифицированный их вариант, испаритель ГГИ-Б-1000М [1], предназначен для измерения испарения с поверхности мочажин, а испаромер ГГИ-3000 применяется для измерения испарения с открытой водной поверхности болотных массивов.

Наблюдения проводились по единой методике, изложенной в [1], с применением однотипных при-

боров, что упрощает систематизацию и сравнение полученных результатов в разных климатических зонах.

Пункты наблюдений располагались на болотах европейской части России и странах Балтии в следующих болотных провинциях [2]:

- 1) Финско-Кольской провинции северной тайги и лапландских аапа на Пулозерском болоте;
- 2) Прибеломорской провинции олиготрофных болот северной тайги на Иласском болоте;
- 3) провинции средней тайги и выпуклых болот юго-восточной Финляндии и Карельского перешейка на болотном массиве Ламмин-Суо;
- 4) Ладожско-Ильменско-Западнодвинской провинции широколиственных лесов и выпуклых грядово-мочажинных болот на болотном массиве Эндла (Эстония) и на Ширинском болоте;
- 5) Эстонско-Литовской провинции выпуклых болот и широколиственно-хвойных лесов на болотном массиве Тирели.

Наблюдения показывают, что процесс испарения с поверхности болота начинается практически сразу после схода снежного покрова, при переходе температуры воздуха через +5 °С и оканчивается осенью при наступлении заморозков. Он охватывает весь период вегетации болотной растительности. В зависимости от широты местности период вегетации в зоне олиготрофных болот изменяется от 110–115 сут в северной части зоны олиготрофных болот до 200 сут в юго-западной. Между среднемноголетней величиной испарения и средней величиной вегетационного периода существует определенная зависимость: с увеличением продолжительности периода вегетации увеличивается и среднемноголетняя величина испарения за сезон. Эта зависимость для микроландшаф-

Таблица 1

Характеристики испарения с поверхности болотных массивов (по данным наблюдения сети болотных станций)

Болотный массив	Микроландшафт*	Период наблюд.	Стат. хар-ки**	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Сезон
Пулозерский	1	1961 – 1990	Е _{ср.} у Сх		3 12.8 0.5	31 22.4 0.7	63 19.2 0.3	46 11.5 0.2	28 11.9 0.4	7 4.4 0.7		178 46.4 0.3
	2	1952 – 1970	Е _{ср.} у Сх			41 23.7 0.6	81 23.2 0.3	57 17.6 0.3	42 17.7 0.4			221 60 0.3
	3	1961 – 1990	Е _{ср.} у Сх		26 12.8 0.5	62 19 0.4	68 15.6 0.2	48 9.4 0.2	24 6 0.3	5 3.5 0.7		233 46.8 0.2
Ламмин-Суо	2	1956 – 1976	Е _{ср.} у Сх	36	69 21.6 0.3	96 15.4 0.2	78 16.2 0.2	55 10.7 0.2	34 14.4 0.4	8 2.5 0.3		376 70.8 0.2
	4	1956 – 1990	Е _{ср.} у Сх	19 8.1 0.4	70 19.1 0.3	85 22.4 0.3	82 14.2 0.2	57 11.4 0.2	28 5.9 0.2	8 4 0.5	1	350 64.6 0.2
Эндла	2	1951 – 1987	Е _{ср.} у Сх	24 13.5 0.6	77 20 0.3	87 15.8 0.2	78 14.4 0.2	62 9.9 0.2	34 8.7 0.3	15 6.8 0.5	3 2 0.6	379 56.3 0.2
	3	1960 – 1987	Е _{ср.} у Сх	19 14.2 0.7	79 18.9 0.2	90 14.6 0.2	81 11.4 0.1	63 8.7 0.1	35 7.8 0.2	17 7.4 0.4	3	387 44.4 0.1
Ширинский	4	1957 – 1990	Е _{ср.} у Сх	28	65 30.1 0.5	87 33.5 0.4	93 20.2 0.2	69 13.9 0.2	38 15.9 0.4	12 7.2 0.6	3	395 94.1 0.3
	5	1957 – 1986	Е _{ср.} у Сх	21	65 28.6 0.7	93 23 0.3	96 15.9 0.2	72 14.9 0.2	44 16.4 0.4	16 10.5 0.6	7	414 59.2 0.2
Тирели	6	1958 – 1987	Е _{ср.} у Сх	28	77 27.7 0.4	91 16.2 0.2	80 15.9 0.2	62 13 0.2	38 8.7 0.3	20 5.2 0.3	8	404 82.2 0.2
	2	1959 – 1980	Е _{ср.} у Сх	31	86 24.5 0.3	107 13 0.1	89 15.5 0.2	69 11.4 0.2	43 7.1 0.2	19 6.6 0.4	9	420 54.4 0.1

Примечание: * Микроландшафты: 1 – кустарничково-лишайниковый с моховой растительностью; 2 – грядово-мочажинный комплекс; 3 – грядово-озерковый комплекс; 4 – сфагново-кустарничково-пушицевый, облесенный сосной; 5 – сфагново-пушицево-кустарничковый; 6 – сфагново-пушицевый. ** Размерности статистических характеристик: Е_{ср.} (мм), у (мм), Сх (в долях единицы).

тов с ориентированным и неориентированным микрорельефом аппроксимируется уравнением $E = 0.0023\phi^2 + 1.6586\phi$, где E – среднееголетняя величина испарения с центральных частей болотных массивов, мм; ϕ – продолжительность вегетационного периода, сутки. Ко-

эффициент корреляции равен 0.88. Существование этой зависимости обусловлено тем, что основным фактором, влияющим на испарение, является приходящая солнечная радиация, общее количество которой зависит от продолжительности вегетационного периода, облачности и широты местности.

Согласно результатам наблюдений на стационарных пунктах за многолетний период (табл. 1) установлено, что среднемноголетние значения испарения за вегетационный период на рассматриваемых болотных массивах в зоне олиготрофных болот изменяются в значительных пределах – от 178 до 420 мм. Наименьшая его величина за многолетний период (178 мм) отмечена в северной части зоны олиготрофных болот в кустарничково-лишайниковом микроландшафте Пулозерского болотного массива. При этом средняя за сезон величина испарения на этом болотном массиве, но в различных микроландшафтах изменяется от 178 до 221 мм. Максимум испарения за сезон в северной части зоны олиготрофных болот составляет 233 мм (грядово-озерковый комплекс Иласского болотного массива). В южных провинциях зоны средние за сезон величины испарения составляют от 350 (сфагново-кустарничково-пушицевый, облесенный сосной микроландшафт болота Ламмин-Суо) до 420 мм (грядово-мочажинный комплекс болотного массива Тирели).

Сравнение сезонных величин испарения в пределах конкретного болотного массива за равные интервалы времени показывает, что испарение с комплексных микроландшафтов всегда больше, чем с микроландшафтов с неориентированным микрорельефом. Грядово-мочажинные комплексы (болотные массивы Пулозерский, Ламмин-Суо, Эндла, Тирели) испаряют на 15–25 % больше, чем другие микроландшафты. Так, с кустарничково-лишайниковых микроландшафтов Пулозерского болотного массива величина испарения составляет 74–85 %, а со сфагново-пушицевого микроландшафта болотного массива Тирели – в среднем 87 % от испарения с грядово-мочажинных комплексов этих болотных массивов. Такая разница в величинах испарения объясняется более высокой влагообеспеченностью комплексных микроландшаф-

тов, обусловленную наличием микроозерков и мочажин, часто с открытой водной поверхностью.

Однако наличие их в грядово-мочажинном и грядово-озерковом комплексе приближает величины испарения с комплекса к испарению с водной поверхности только при высоких уровнях болотных вод в диапазоне от –10 до –25 см (табл. 2). В этом диапазоне уровней величина отношения испарения с комплекса к испарению с водной поверхности (z) в среднем равна 0.85 (85 %). Далее, с понижением уровня болотных вод z уменьшается и в диапазоне уровня от –30 до –60 см изменяется в небольших пределах (0.54–0.68). Уменьшение z при уровнях болотных вод, равных –30 см и ниже обусловлено возникающим дефицитом влаги в условиях, когда капиллярные свойства верхних горизонтов торфяной залежи не обеспечивают притока воды к испаряющей поверхности [3].

Аналогичную зависимость мы наблюдаем и в условиях неориентированного микрорельефа, в частности, в сфагново-пушицевом микроландшафте (табл. 2) болотного массива Тирели, где в диапазоне уровней от –5 до –20 см величина z в среднем равна 0.60–0.62, а на нижней границе деятельного слоя снижается до 0.40–0.45. Значительное изменение z наблюдается также на рубеже –30 см от поверхности болота. В этих сравнениях использовались результаты многолетних наблюдений за испарением с водной поверхности по испаромерам ГГИ-3000, установленным на ближайшей к болоту метеостанции. Таким образом, результаты наблюдений однозначно показывают, что испарение с болотных массивов практически всегда меньше, чем испарение с открытой водной поверхности.

Для сравнения в табл. 3 приведено распределение внутри вегетационного сезона месячных величин испарения с грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов, расположенных в северных и южных

Таблица 2

Отношение декадных величин испарения с болотных микроландшафтов к испарению с водной поверхности (z) в различном диапазоне уровня болотных вод

Диапазон уровня болотных вод, см от поверхности болота	Болото Эндла, грядово-озерковый комплекс		Болото Тирели, сфагново-пушицевый микроландшафт	
	z , доли	среднеквадратическое отклонение, доли	z , доли	среднеквадратическое отклонение, доли
- 5 ч -10			0.60	0.13
- 10 ч -15			0.62	0.08
-15 ч - 20	0.86		0.62	0.08
- 20 ч - 25	0.84	0.35	0.57	0.09
- 25 ч -30	0.81	0.28	0.54	0.07
- 30 ч -35	0.68	0.19	0.46	0.05
- 35 ч - 40	0.59	0.12	0.45	0.02
- 40 ч - 45	0.57	0.14	0.40	
- 45 ч - 50	0.64	0.15	0.44	0.06
- 50 ч - 55	0.54	0.06	0.50	0.14
- 55 ч - 60	0.56		0.48	0.08
- 60 ч -70			0.41	

Таблица 3

Внутрисезонное распределение испарения (% от сезонной величины) с поверхности грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов олиготрофных болот

Микроландшафт	Период наблюдений, годы	Месяцы								
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Провинция Финско-Кольской северной тайги и лапландских аапа, Пулозерский болотный массив										
Грядово-мочажинный комплекс	1952 – 1970	—	—	18.6	36.6	25.8	19	—	—	—
Прибеломорская провинция олиготрофных болот северной тайги, Иласский болотный массив										
Грядово-мочажинный комплекс	1958 – 1989	—	7.7	28.1	29.4	21.7	10.4	2.7	—	—
Грядово-озерковый комплекс	1961 – 1990	—	11.2	26.6	29.2	20.6	10.3	2.1	—	—
Провинция средней тайги и выпуклых болот юго-восточной Финляндии и Карельского перешейка, болотный массив Ламмин-Суо										
Грядово-мочажинный комплекс	1956 – 1976	9.6	18.4	25.5	20.8	14.6	9	2.1	—	—
Ладожско-Ильменско-Западнодвинская провинция широколиственных лесов и выпуклых грядово-мочажинных болот, болотный массив Эндла										
Слабовыраженный грядово-мочажинный комплекс	1951 – 1987	6.3	19.5	22.9	21.1	16.4	9	4	0.8	0.8
Грядово-озерковый комплекс	1960 – 1987	4.9	20.4	23.3	20.9	16.3	9	4.4	0.8	0.8

районах зоны. В северной части зоны наибольшие месячные величины испарения (56–80 мм) наблюдаются в июне, в южной они смещаются во времени на июль и равны 95–112 мм, что составляет в процентах от испарения за вегетационный период соответственно около 40 и 20–27 %. В южных болотных провинциях распределение месячных величин испарения происходит более равномерно, чем в северных. При этом наибольшие среднемесячные величины не выходят за пределы 24 %. Распределение испарения в однотипных болотных микроландшафтах (грядово-мочажинный и грядово-озерковый комплексы) практически идентичны, а в неоднотипных разница может достигать 1–3 %. Некоторое различие наблюдается в северной зоне при наличии в отдельных микроландшафтах значительных покрытий лишайниками.

Зависимость между среднемноголетней величиной испарения за вегетационный сезон E (мм) и наибольшей среднемесячной величиной испарения $E_{\text{мес}}$ (% от величины за сезон) аппроксимируется выражением $E_{\text{мес}} = 554.56 E^{-0.5298}$ при $R^2 = 0.8857$, где R^2 – квадрат коэффициента корреляции.

Своеобразие испарения с комплексных микроландшафтов обусловлено наличием в них двух различных испаряющих поверхностей (гряд и мочажин), различающихся между собой по произрастающей растительности, водообеспеченности, воднофизическим и тепловым свойствам.

Изменения уровня болотных вод при одном и том же радиационном балансе в мочажинах и на грядах оказывают меньшее влияние на величины испарения первых, поскольку капиллярные свойства деятельного слоя гряд не обеспечивают достаточного подтока влаги к испаряющей поверхности уже при уровнях болотных вод ниже корневой системы мхов на грядах. Падение уровня болотных вод до глубины ниже 20–25 см изменит на значительную величину испаре-

ние с гряд, но не уменьшит испарение с мочажин. Значительно влияет на испарение с гряд и на соотношение величин испарения с гряд и мочажин превышение гряд над водной поверхностью мочажин. С увеличением превышения гряд над мочажинами величина испарения с гряд уменьшается. В среднем испарение с гряд в южной части зоны олиготрофных болот составляет 80–85 % от испарения с мочажин.

В северной части зоны (болотный массив Пулозерский), где испарение в основном лимитируется приходом тепла к испаряющей поверхности, различие в испарении с гряд E_g и мочажин E_m существенно уменьшается. Так, на болоте Пулозерском соотношение этих характеристик за вегетационный сезон определяется равенством $E_m = 1.011E_g$ при $R^2 = 0.959$; на болоте Тирели (южная часть зоны олиготрофных болот) – уравнением $E_m = 1.1113E_g$ при $R^2 = 0.552$. Если в первом случае эти различия в отношении сезонных величин испарения незначительны, то во втором случае они в среднем достигают 10 %. Причем уменьшается и степень тесноты связи, так как коэффициент корреляции снижается от 0.98 до 0.74. Это обусловлено тем, что в южной части зоны испарение в середине вегетационного сезона в связи с падением уровня к нижней границе деятельного слоя лимитируется только притоком воды к испаряющей поверхности. Приток тепла к испаряющей поверхности в этот период здесь достаточно большой и не может быть лимитирующим фактором.

Теснота связи с повышенных и пониженных элементов микрорельефа для микроландшафтов с неориентированным микрорельефом на болотных массивах Ширинское и Тирели очень высокая для месячных ($RI = 0.9$) и для сезонных величин испарения ($R^2 = 0.7–0.8$). Для этих же элементов микрорельефа на болотах Иласское и Пулозерское она значительно меньше ($RI \approx 0.6$).

Вариация величин испарения с гряд в большинстве случаев меньше, чем с мочажин. Средний коэффициент вариации месячных величин испарения с гряд равен 0.53 при изменении его в диапазоне от 0.48 до 0.61; с мочажин – 0.55 при изменении от 0.51 до 0.62. В микроландшафтах с неориентированным микрорельефом явной закономерности в отношении коэффициента вариации месячных величин испарения с повышенных и пониженных элементов микрорельефа не прослеживается, однако вариация сезонных величин испарения с понижений меньше, чем с кочек или сфагновых подушек.

Коэффициент вариации сезонных величин испарения с грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов северных болотных массивов Финско-Кольской провинции северной тайги и лапландских аапа (Пулозерский болотный массив) и Прибеломорской провинции олиготрофных болот северной тайги (Иласский болотный массив) несколько выше, чем для верховых болот северо-запада России и Прибалтики. В первом случае он составляет 0.2–0.3, во втором – 0.1–0.2, что объясняется климатическим фактором, т. е. расхождением в сроках перехода среднесуточной температуры через 5 °С в начале и конце вегетационного сезона, приводящим к различиям в продолжительности вегетационного периода каждого конкретного года.

Вариация внутрисезонных величин испарения (месячных) отличается несколько больше. В северных болотных провинциях коэффициент вариации месячных величин испарения изменяется в диапазоне 0.2–0.9, в южных – 0.1–0.7. Месячные величины испарения характерны внутрисезонным ходом изменений. Их коэффициенты вариации имеют большую изменчивость в начале и конце вегетационного периода (0.4–0.9) и существенно меньшую в середине сезона (0.1–0.3). Причем в южных болотных провинциях коэффициенты вариации в середине сезона снижаются до величин 0.1–0.2.

Анализ результатов наблюдений однозначно показывает, что испарение с болотных массивов зависит от двух основных факторов: обеспечения произрастающей растительности влагой, что было показано ранее, и приходом тепла к поверхности болота. В. В. Романовым впервые было показано, что испарение с болот зависит от величины притока солнечной энергии к поверхности болота. В качестве предиктора этой зависимости он использует радиационный баланс [3]. Однако радиационный баланс всегда зависит от физических свойств подстилающей поверхности и ее влагообеспеченности. Чтобы избежать зависимости от этих характеристик, используем приток тепла только за счет суммарной солнечной радиации [4]. Зависимости вида $E = vQ + d$ для месячных величин испарения построены для ряда болотных массивов (табл. 4), где Q – суммарная солнечная радиация в ккал/(см²·месяц) (использована размерность, применяемая при проведении комплекса наблюдений за испарением); v и d – соответственно, угловой коэффициент и свободный член уравнения.

Коэффициент корреляции для северо-западной части зоны олиготрофных болот довольно высок и изменяется в пределах 0.90–0.96, для северной части зоны он ниже и составляет 0.70–0.84. Угловой коэффициент изменяется в небольших пределах (4.56–6.79), и в среднем он равен 6.22. Характерно, что для центральных частей болотных массивов угловые коэффициенты близки между собой; например, для болот Ламмин-Суо и Тирели они равны соответственно 6.75 и 6.79. Коэффициент имеет тенденцию уменьшаться от центра к периферии болота.

Свободный член уравнения определяет дополнительный приток или отток тепла к испаряющей поверхности. Под влиянием этого процесса дополнительная величина испарения может достигать 10 мм/мес. Адвекция тепла может наблюдаться как со стороны суходолов, так и за счет притоков от соседних микроландшафтов.

Таблица 4
Зависимость месячных величин испарения от суммарной радиации для ряда микроландшафтов олиготрофных болот

Болотный массив, микроландшафт	Уравнение связи	Коэффициент корреляции
Ламмин-Суо, сфагново-кустарничково-пушицевый, редко облесенный сосной	$E = 6.75 Q - 3.82$	0.90 ± 0.051
Тирели, сфагново-пушицево-кустарничковый; гряда, грядово-мочажинный комплекс; сфагново-пушицевый	$E = 6.79 Q + 1.28$	0.96 ± 0.048
	$E = 6.41 Q + 1.37$	0.95 ± 0.024
	$E = 6.35 Q - 0.87$	0.96 ± 0.031
Эндла, слабовыраженный грядово-мочажинный	$E = 5.93 Q + 2.56$	0.95 ± 0.043
Иласский, гряда, грядово-мочажинный; гряда, грядово-озерковый комплекс	$E = 4.56 Q + 9.23$	0.84 ± 0.065
	$E = 6.72 Q + 4.28$	0.78 ± 0.100

Примечание: E – испарение, мм/мес.; Q – суммарная солнечная радиация, ккал/(см²·месяц).

Список литературы

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Вып. 8. Л., 1990. 360 с.
2. Кац Н. Я. Болота Земного шара. М., 1971. 296 с.
3. Романов В. В. Гидрофизика болот. Л., 1961. 357 с.
4. Калюжный И. Л. Испарение с болотных массивов различных болотных провинций СССР // Труды ГГИ. 1974. Вып. 222. С. 21–57.

Калюжный И. Л., кандидат технических наук, зав. гидрофизической лабораторией.

Государственный гидрологический институт.
ВО, 2 линия, 23, г. Санкт-Петербург, Россия, 199053.
E-mail: hfl@mail.ru

Романюк К. Д., ведущий инженер гидрологической лаборатории.

Государственный гидрологический институт.
ВО, 2 линия, 23, г. Санкт-Петербург, Россия, 199053.
E-mail: romanyuk23@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 15.07.2008

I. L. Kalyujnyi, K. D. Romanyuk

EVAPORATION FROM SWAMP TRACT OF OLIGOTROPH SWAMP ZONE

Consider results of many years permanent tool observations after evaporation from swamp tract. This research demonstrated changing average of many years evaporation variable of oligotroph swamp zone from 178 to 420 mm, and their coefficient of variation from 0,1 to 0,3. Analysing mains conditionings factors of swamp evaporation process, as well as law changes monthly evaporation variable from certain microlandscape, and from certain microrelief forms.

Key words: evaporation, oligotroph swamp, vegetation period, solar radiation, complex microlandscape, nonoriented microrelief, swamp water level, statistics.

Kalyujnyi I. L.

State Hydrological Institute.
VO, 2 line, 23, Saint-Petersburg, Russia, 199053.
E-mail: hfl@mail.ru

Romanyuk K. D.

State Hydrological Institute.
VO, 2 line, 23, Saint-Petersburg, Russia, 199053.
E-mail: romanyuk23@yandex.ru