

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

© В. И. БАТУЕВ, И. Л. КАЛЮЖНЫЙ

**ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ
ОБВОДНЕНИИ ТОРФЯНИКОВ**

Ежегодно на территории Центральной России возникает опасная природная ситуация — пожары на торфяниках¹ и естественных болотных массивах. Летописи Древней Руси неоднократно отмечали катастрофические пожары на болотах и в лесах в 1092, 1162, 1223, 1371 гг. и др. В летописи 1162 г. приведено достаточно полное описание как причины, так и следствия этой природной катастрофы: «...стоя все лето ведром и пригоре все жито, и всякое обилие и озера и реки засохша, болота же выгореша, и леса и земля гореша» [1]. Характерно, что и летописи Западной Европы отмечают пожары на болотах в Польше, Германии, Чехии и других странах, зачастую одновременные.

Пожары на болотах могут охватывать огромные территории, представляют большую опасность для населенных пунктов и инфраструктуры, наносят значительный материальный ущерб экономике. Но особую опасность представляют пожары на торфяниках в силу специфики горения глубоких слоев торфяной залежи и трудностей при пожаротушении. В наше время наиболее явно и в чрезвычайной форме это проявилось в летние периоды 1972 и 2010 гг. в Московской и смежных с ней областях.

Пожароопасная обстановка на естественных болотных массивах возникает при понижении уровня болотных вод на 40 см и более от средней поверхности микроландшафта. При возникновении пожара сгорают, как правило, весьма локализованные участки мохово-кустарничкового очеса. На осушенных болотных массивах аналогичная ситуация нередко приводит к возгоранию нижних, более плотных слоев торфяной залежи. Капиллярное поднятие влаги не обеспечивает ее длительного интенсивного притока к поверхности торфяника. Основным фактором возникновения и распространения пожаров на болотах и торфяниках является образование значительного дефицита влаги в зоне аэрации.

Ликвидация дефицита влаги осуществляется двумя способами. Сущность первого способа состоит в том, что в результате регулирования стока на осушен-

¹ Под термином «торфяник» подразумевается болотный массив с нарушенным верхним горизонтом торфяной залежи и измененным гидрологическим режимом, вне зависимости от типа болота и целей дальнейшего его использования.

ном болотном массиве повышается уровень болотных вод до пределов, необходимых для поддержания торфяной залежи в пожаробезопасном состоянии. Если дальнейшее использование торфяника не предусматривается, то уровни воды повышаются до значений, при которых начинается интенсивное заболачивание. Восстанавливается основная функция болотного массива — накопление торфа, и торфяник со временем снова становится болотом. Повышение уровня болотных вод достигается за счет регулирования стока по дренажной сети с помощью простейших гидротехнических сооружений, которые поднимают уровень воды не более чем на 25—30 см. При таком подъеме уровня воды образующиеся сплавины, как и сами каналы, хорошо зарастают сфагновыми мхами [2, 13].

Наиболее приемлемым по срокам реализации является второй способ — искусственное обводнение торфяников, при котором пожароопасная обстановка ликвидируется в относительно короткое время. Способ применяется также для тушения уже возникших пожаров и предполагает наличие необходимых водных ресурсов. При этом существующая дренажная сеть также должна обеспечивать регулирование стока. Способ особенно эффективен для применения на выработанных или частично выработанных торфяниках и заключается в том, что вода из источника подается по проложенным трубопроводам. Поля (карты) выработанного торфяника, образовавшиеся при добыче торфа, являются достаточно надежной емкостью для удержания в них водной массы. Это объясняется низкими коэффициентами фильтрации оставшейся торфяной залежи на дне и боковых перемычках полей добычи торфа.

Реализация программы по обводнению конкретного торфяника (или его части) с использованием указанных приемов нуждается в гидрологическом обосновании необходимых объемов воды. Методика расчета объема воды должна учитывать атмосферные осадки, инфильтрационный расход воды, грунтовый приток воды на торфяник, расход влаги на испарение. При этом подаваемый на торфяник объем воды должен заполнить свободные поры торфяной залежи до уровня, обеспечивающего его пожаробезопасное состояние.

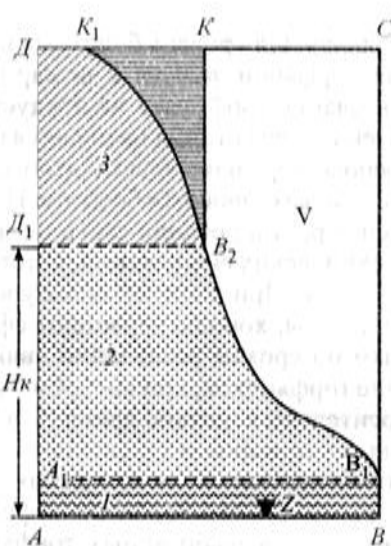
На рисунке схематично показано распределение влаги в элементарной колонке торфа. По величине влагосодержания выше уровня болотных вод (AB), в зоне аэрации, обычно выделяются три горизонта: 1-й — зона капиллярного насыщения, 2-й — зона убывающей влажности и 3-й — зона наименьшей влагоемкости. Эпюра $ABCD$ определяет полную влагоемкость торфяной залежи при конкретном уровне болотных вод Z . Эпюра BB_1B_2KDA характеризует полную полевую влагоемкость при этом уровне, ограниченную равновесной кривой распределения влаги BB_1B_2K в зоне аэрации. В табл. 1 приведены результаты определения равновесной влаги на торфяниках, используемых в сельском хозяйстве.

Анализ этих данных показал, что послойная изменчивость влагосодержания при одном и том же уровне болотных вод незначительна. На разных мелиоративных системах при длительном антропогенном воздействии формируются близкие между собой распределения сухого вещества в торфе, которые обусловили схожие водно-физические свойства и равновесное распределение влаги в торфяной залежи.

Осредненная зависимость послойного влагосодержания от уровня болотных вод выражается уравнением вида:

$$V_{PAB} = 7.5Z + 11.5, \quad (1)$$

где V_{PAB} — содержание влаги при равновесном распределении, в мм слоя; Z — глубина залегания болотных вод от поверхности, см.



Распределение влаги в зоне аэрации торфяной залежи.

1 — зона капиллярного насыщения, 2 — зона убывающей влажности, 3 — зона наименьшей влагоемкости, H_k — высота капиллярного поднятия.

Уравнение (1) может быть применено для приближенной оценки водонасыщения низинных торфяников, используемых в сельскохозяйственном производстве. Объем воды, заполняющий свободные поры сверх равновесного содержания влаги, определяется по разности между полной полевой влагоемкостью торфяной залежи и соответствующим значением равновесной кривой распределения влаги при уровне болотных вод Z .

Водовместимость V (см. рисунок) в мм слоя воды равна:

$$V = V_{ВП} - V_{РАВ}, \quad (2)$$

где $V_{ВП}$ — полная водовместимость (эпюра $ABCD$); $V_{РАВ}$ — равновесное влагосодержание (эпюра ABB_1KD).

Таблица 1
Послойные значения равновесного распределения влаги (мм)
в торфяной залежи мелиорированных низинных болот

Слой до уровня болотных вод, см	Осушительные системы			Среднее
	Совкинская	Луинская	Ново-Видговская	
0—10	78	79	79	79
0—20	155	158	159	157
0—30	235	237	239	237
0—40	316	316	319	318
0—50	396	364	396	395
0—60	741	468	470	470
0—70	544	539	545	543
0—80	609	610	620	613
0—90	674	679	689	681
0—100	737	745	760	747

Расходная часть водного баланса торфяной залежи в период отсутствия осадков определяется в основном стоком и испарением. В табл. 2 приведены результаты определения водовместимости залежи сверх равновесного распределения влаги на естественных болотных массивах в зависимости от уровня воды. В течение первых 2—3 лет освоения эти болотные массивы сохраняют свои водно-физические свойства и могут быть аналогами торфяников для соответствующих климатических зон.

Характеристики водовместимости на сельскохозяйственных полях и полях добычи торфа в Среднеднепровско-Припятской провинции хвойно-широколиственных лесов, евтрофных и олиготрофных сосново-сфагновых болот приведены в табл. 3. Они показывают, что на торфяниках водовместимость при равновесном влагосодержании существенно меньше (в среднем до 100 мм), чем на сельскохозяйственных полях, при залегании уровня болотных вод на 100 см ниже поверхности это различие может достигать 100 мм. Объясняется это тем, что на торфопредприятиях торфяная залежь выработана до нижних горизонтов с высокой степенью разложения торфа и, следовательно, обладает меньшей водовместимостью.

На полях добычи торфа значения водовместимости торфяной залежи при равновесном влагосодержании в пределах одной болотной провинции близки между собой. Так, на торфянике «Редкий Рог» упомянутой болотной провинции торфяная залежь сложена тростниковым торфом со степенью раз-

Таблица 2

Послойные значения водовместимости торфяной залежи (в мм слоя воды) сверх равновесного распределения влаги в микроландшафтах естественных болотных массивов олиготрофных, евтрофных и мезотрофных болот России

Уровень от средней поверхности микроландшафта, см	Олиготрофные болота					Евтрофные и мезотрофные болота		
	сфагново-пушицевый	сфагново-кустарничково-пушицевый, редко облесенный сосной		грядово-мочажинный комплекс		гипново-осоковый	осоково-гипновый, мозаичный	вейниково-осоково-тростниковый
		$\Delta h^* = 15 - 20$ см	$\Delta h < 15$ см	$\Delta h = 15 + 2$ см	Гряд 70 %			
20	35	45	52	40	32	50	48	48
15	62	75	102	87	64	100	94	92
10	86	105	152	130	99	150	137	127
5	109	136	198	172	136	187	172	151
0	124	155	246	215	169	212	194	167
-5	136	170	287	255	204	228	208	177
-10	147	181	317	185	239	240	218	186
-15	155	193	340	310	275	249	227	192
-20	163	206	353	332	304	257	235	198
-25	170	218	363	350	334	264	242	203
-30	183	241	381	386	400	278	254	213
-40	195	261	398	424	460	290	264	223
-50	206	279	416	432	478	302	274	232
-60	217	297	432	440	496	312	282	241
-70	217	297	432	440	496	318	286	245
-80						318	286	245

Примечание. * Δh — характеристика микроландшафта болота: превышение средней поверхности повышенный над средней поверхностью пониженный.

ложения 45 %, а на торфянике «Усяж» торф осоково-тростниковый со степенью разложения 40 %, т. е. эти характеристики практически совпадают. Если глубины выработки торфяников близки между собой, то совпадают или близки и их водно-физические характеристики. В нашем случае (табл. 3) для торфопредприятий «Редкий Рог» и «Усяж» мы наблюдаем практически их полное совпадение. В итоге, имея данные по конкретному торфянику, можно использовать их для других торфяников в пределах одной болотной провинции.

Для торфяников, используемых в сельском хозяйстве (торф древесно-тростниковый со степенью разложения 40—45 %), к которым относятся болото «Дикий Никор» и болотный массив в бассейне р. Оресса (табл. 3), отличия более значительны. Они объясняются в основном различиями в способах обработки верхнего горизонта почвы в зависимости от выращиваемой сельскохозяйственной культуры. Водовместимость таких возделываемых горизонтов может отличаться в 2—3 раза. Но с увеличением глубины эти различия заметно уменьшаются. Близкие по значениям характеристики водовместимости наблюдаются и на тех участках, где применялись одинаковые агротехнические мероприятия и совпадает время начала освоения болота.

После установления на торфяниках равновесного содержания влаги она расходуется только на испарение (см. рисунок). Влажность верхних горизонтов (B_1, B_2, K_1) за счет этого становится меньше, чем при равновесном влагосодержании. На торфянике образуется аккумулялирующая емкость B_2, K, K_1 . Ее водовместимость равняется сумме послонных разностей между значениями влажности, снятыми с кривой равновесного влагосодержания и текущей влажностью на соответствующих глубинах. В табл. 4 приведена динамика формирования аккумулялирующей емкости в вегетационный период 1979 г. на торфянике Старосельской осушительной системы (Ленинградская обл.). Зависимость объема свободных пор в аккумулялирующей емкости A (мм слоя воды)

Таблица 3

Осредненные значения водовместимости (мм) при равновесном влагосодержании на сельскохозяйственных полях и полях добычи фрезерного торфа при уровне болотных вод Z (по материалам К. П. Лудина)

Уровень болотных вод Z , см	Торфопредприятия		Сельскохозяйственные поля	
	Редкий Рог	Усяж	Болото «Дикий Никор»	Болото в бассейне р. Оресса
10	6		22	3
20	12	8	40	10
30	19	17	48	19
40	27	27	49	30
50	38	38	50	42
60	46	49	53	56
70	57	60	63	72
80	69	72	83	90
90	82	84	119	109
100	97	96	174	130

Таблица 4
Формирование аккумулирующей емкости в вегетационный период на Старосельской осушительной системе (Ленинградская обл., 1979 г.)

Мощность слоя, см	Емкость аккумулирующего слоя, мм			
	31. VI	20. VII	31. VII	10. VIII
0—5	9	16	36	37
5—15	4	16	26	41
15—25	2	14	9	29
25—35	1	9	4	12
35—45	0	5	4	5
45—55		0	1	3
55—65			0	2
65—75				1
Аккумулирующая емкость, мм	16	60	80	128

от глубины залегания болотных вод Z (см) для данного торфяника аппроксимируется уравнением ($R = 0.94$):

$$A = 2.61 Z + 132.2 \quad (3)$$

Во внутригодовом ходе аккумулирующая емкость торфяника изменяется в широких пределах и зависит от положения уровня болотных вод, режима осадков и суммарного испарения. Согласно данным В. Ф. Шебеко [11], на Минской опытной станции в вегетационный период при глубине залегания болотных вод 80—100 см значение A близко к 170 мм и при дальнейшем снижении уровня продолжает увеличиваться. На освоенных болотных массивах аккумулирующие емкости могут поглощать все летние осадки не вызывая повышения уровня воды. С подъемом уровня болотных вод до 30—40 см от поверхности аккумулирующая емкость практически полностью исчезает. При таких уровнях капиллярный поток влаги компенсирует ее расход на суммарное испарение.

В теплый период года значение аккумулирующей емкости в торфяной залежи при отсутствии склонового стока, согласно работам [2, 10], может быть рассчитано по уравнению водного баланса:

$$A = E + I - X - K, \quad (4)$$

где A — аккумулирующая емкость зоны аэрации торфяной залежи (мм), E — испарение (мм), X — атмосферные осадки (мм), I — инфильтрация (мм), K — капиллярная подпитка (мм).

Оптимальное увлажнение торфяника для обеспечения его пожаробезопасного состояния должно соответствовать условиям выхода капиллярной каймы к поверхности болота ($B_2 D_1$). Слой воды, необходимый для приведения торфяника к этому состоянию, соответствует его полной влагоемкости ($V_{\text{пл}}$):

$$V_{\text{пл}} = A + V - E + X \pm f(I, K), \quad (5)$$

где V — влагоемкость ($B_1 CKB_2$), мм. Здесь все составляющие водного баланса определяются за календарный год. Последнее слагаемое правой части

уравнения водного баланса относится к холодному периоду года: при понижении уровня воды происходит инфильтрация, при повышении уровня — действует капиллярная подпитка.

Объем воды, который необходимо подать на торфяник для обеспечения его пожаробезопасного состояния, зависит от его площади и равен

$$W = V_{\text{вп}} \cdot F, \quad (6)$$

где W — объем воды, необходимый для обводнения торфяника, м³; F — площадь обводнения, м². Здесь полная водовместимость $V_{\text{вп}}$ приводится в метрах слоя воды.

Применение уравнения (5), как правило, затруднено вследствие отсутствия материалов о водно-физических свойствах залежи, аккумулирующей емкости, инфильтрации и капиллярной подпитке торфяной залежи. Для определения водно-физических свойств торфяной залежи конкретного торфяника целесообразно использовать метод дренирования высоких колонн торфа — «метод высоких колонн». Теоретические основы метода и описание лабораторных опытов изложены в работах [4, 8]. Для приближенной оценки водно-физических свойств торфяной залежи возможно использование уже имеющихся результатов, приведенных в табл. 1—3.

Использование «метода высоких колонн» с предварительным определением послойного содержания сухого вещества в исследуемом торфе [8, 9] позволяет получить распределение пористости по глубине залежи, послойного значения равновесного содержания влаги и рассчитать послойную водовместимость. Полная водовместимость торфяной залежи до уровня болотных вод равна сумме послойных ее значений до этого уровня.

Значения аккумулирующей емкости в момент времени, предшествующий обводнению торфяника, вычисляют как сумму разностей послойных величин влагозапасов в зоне аэрации, измеренных в натуральных условиях, и равновесного влагосодержания:

$$A = \sum_0^h \left(\frac{W_{\text{рав}} - W_{\phi}}{10\Delta H} \right), \quad (7)$$

где $W_{\text{рав}}$ и W_{ϕ} — послойные значения влажности торфа (% объема) в зоне аэрации мощностью h , снятые с профилей $W_{\text{рав}} = f(H)$ и $W_{\phi} = f(H)$ для слоя залежи толщиной H . Влажность торфа в зоне аэрации конкретного торфяника определяют термостатно-весовым методом [9]. В отдельных случаях после определения положения уровня болотных вод аккумулирующая емкость может быть рассчитана по уравнениям (3) или (4).

В холодный период года при наличии промерзшего слоя изменение аккумулирующей емкости торфяника является функцией от инфильтрации и капиллярной подпитки грунтовыми водами, а также миграции влаги к фронту промерзания. Миграция влаги к фронту промерзания происходит постоянно в зависимости от градиента температуры в почвогрунтах.

В процессе зарождения болотного массива его подпитка грунтовыми водами происходит за счет притока со стороны минеральных берегов и дна. Но при дальнейшем его развитии и снижении отметки базиса эрозии близлежащего водотока подпитка образовавшегося болота за счет грунтовых вод мо-

жет частично или полностью прекращаться. На болотном массиве могут одновременно происходить как отток, так и приток воды через разделяющий слой между торфяной залежью и минеральным грунтом. Этот разделяющий слой образуется в результате взаимодействия болотных вод, содержащих большое количество растворенного органического вещества, с минеральным грунтом.

Мощность разделяющего слоя составляет 20—50 см. Водопроницаемость его на 1—2 порядка меньше водопроницаемости подстилающих пород. Средние значения коэффициентов фильтрации разделяющего слоя составляют 0.02 мм/сут в случае супесчаной материнской породы, 0.4 мм/сут, если она представлена средне- и мелкозернистыми песками и 1.8 мм/сут, если пески крупнозернистые. Возможна его полная водонепроницаемость в пределах целого болотного массива.

Расход воды на инфильтрацию для торфяника в зимний период определяется по интенсивности падения уровня, когда отсутствует испарение воды, а сток и миграция влаги к слою промерзания минимальные [10]. Интенсивность инфильтрации (в мм/сут) определяется из выражения:

$$I = \frac{\mu \Delta (Z_k - Z_n)}{\tau}, \quad (8)$$

где μ — коэффициент водоотдачи; Z_n и Z_k — соответственно начальный и конечный уровни воды, см; τ — продолжительность периода, сут.

Поступающие на болотный массив атмосферные осадки и расход влаги на испарение с поверхности торфяника учитываются по данным наблюдений ближайшей метеорологической станции [7]. За период от даты начала обводнения и до конца календарного года их учет производится по среднемесячным значениям. Ввиду того что региональные наблюдения за испарением с болот крайне ограничены, можно использовать данные наблюдений за испарением с водной поверхности. Анализ результатов наблюдений за испарением с болот показывает [4], что для грядово-мочажинного и грядово-озеркового комплексов при высоких уровнях болотных вод от средней поверхности болота (от -10 до -25 см) [7] величины испарения с этих комплексов близки к испарению с водной поверхности и соотношение их в среднем равно 0.85. С понижением уровня испарение уменьшается и в диапазоне уровня от -30 до -60 см составляет 0.54—0.68 от испарения с водной поверхности.

В условиях изменения климата в северо-западной и центральной частях ЕТР наблюдаются рост атмосферных осадков [12] и одновременное снижение величин испарения с водной поверхности водоемов и болотных массивов [6]. Это говорит о том, что испарение с обводненных торфяников также должно снижаться. В результате этого повышенный климатический сток с болотных массивов может быть использован при обводнении. При этом часть этой добавки будет аккумулирована торфяной залежью, повышая среднесуточные уровни воды на болотах. Сложившиеся в настоящее время природные условия способствуют, таким образом, уменьшению как объема воды, требуемой для обводнения торфяников, так и ее доли, изымаемой из водных объектов.

Список литературы

- [1] *Борисенков Е. П., Пасецкий В. М.* Экстремальные природные явления в русских летописях XI—XVII веков. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 240 с.
- [2] *Войтехов М. Я.* Восстановление осушенных лесоболотных угодий (на примере Дубненского лесоболотного массива). М., 2009. 140 с.
- [3] *Воробьев П. К.* Исследование аккумулятивной емкости зоны аэрации торфяных залежей мелиорированных болот // Тр. ГТИ. Л.: Гидрометеониздат, 1988. Вып. 333. С. 99—133.
- [4] *Калюжный И. Л., Павлова К. К.* Теоретический анализ зависимости коэффициента водоотдачи от скорости изменения уровня грунтовых вод // Метеорология и гидрология. 1979. № 12. С. 83—90.
- [5] *Калюжный И. Л., Романюк К. Д.* Испарение с болотных массивов зоны олиготрофных болот // Вестн. ТГПУ. 2009. Вып. 3. С. 120—125.
- [6] *Калюжный И. Л., Романюк К. Д.* Изменение водного режима болот Севера и Северо-Запада России под влиянием климатических факторов // Метеорология и гидрология. 2010. № 7. С. 85—98.
- [7] Методические указания по расчетам стока с неосушенных и осушенных болот. СТО ФГБУ ГТИ 08.30-2011. СПб., 2011. 136 с.
- [8] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 360 с.
- [9] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Л.: Гидрометеониздат, 1973. 289 с.
- [10] *Романов В. В.* Некоторые приемы анализа режима грунтовых вод // Тр. ГТИ. Л.: Гидрометеониздат, 1969. Вып. 165. С. 148—153.
- [11] *Шебеко В. Ф.* Гидрологический режим осушаемых территорий. Минск: Урожай, 1970. 300 с.
- [12] *Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю.* Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. СПб.: Гидрометеониздат, 2007. С. 20—32.
- [13] *Frank Edom, Ingo Dittrich, Steffi Goldacker, Karin Kebler.* Die hydromorphologische begründete Planung der Moorreitalisierung im Erzgebirge. Praktischer Moorschutz im Naturpark Erzgebirge / Vogtland und Beispiele aus anderen Gebirgsregionen: Methoden, Probleme, Ausblick, 2008. P. 19—32.

Санкт-Петербург
batuevggi@mail.ru
Hfl@mail.ru

Поступила в редакцию
31 января 2012 г.