

## ОСНОВНЫЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОСУШЕННЫХ БОЛОТ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ И МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**С.А. Лавров, И.Л. Калюжный**

E-mail: hfl@mail.ru

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия*

**АННОТАЦИЯ:** Проведение мелиоративных мероприятий на болотах Республики Карелия и Мурманской области, последующее их освоение и вовлечение в сельскохозяйственное производство изменяет водно-физические свойства этих природных образований. Установлено, что потенциал почвенной влаги находится в функциональной зависимости от влажности и плотности торфа. Уплотнение сопровождается изменением потенциала почвенной влаги, определяющего энергию связи воды с почвой. С увеличением срока эксплуатации болотных массивов увеличивается плотность торфа и, как следствие, потенциал почвенной влаги.

Предложен метод и расчетная формула, аппроксимирующая зависимость потенциала от влажности во всем диапазоне ее изменения. Установлена зависимость влагопроводности от влажности (в диапазоне от 30 до 80 % объема), основанная на связи между коэффициентом влагопроводности и потенциалом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** осушенные болота, потенциал почвенной влаги, коэффициент влагопроводности, Республика Карелия, Мурманская обл.

При проведении мелиоративных мероприятий на переувлажненных торфяных почвах северных районов России и последующем их освоении значительно изменяется водный и тепловой баланс деятельного слоя и, соответственно, водно-физические свойства почв. Усадка торфа при понижении уровня болотных вод, различного рода механические и химические воздействия при сельскохозяйственном освоении не только значительно увеличивают плотность верхнего слоя (0–30 см), но также изменяют его структуру, величину и характер пористости, а значит и подвижность почвенной влаги.

На первом этапе после осушения болота (0,5–1,5 г.) происходит интенсивный сброс влаги переувлажненной почвы. Деятельный слой залежи уплотняется под повышенной нагрузкой, действием капиллярных сил и испарения. Процесс окисления органического вещества почвы незначителен и структура почвы не претерпевает заметных изменений, являясь при этом геометрически подобной. На втором этапе в почве преобладают сложные

© Лавров С.А., Калюжный И.Л., 2020

физико-химические и микробиологические процессы, роль которых возрастает по мере освоения осушенных болот. Следствием этих процессов является интенсивное изменение плотности сухого вещества, сопровождающееся изменением водно-физических характеристик деятельного слоя, в частности – потенциала почвенной влаги и коэффициента влагопроводности.

На неосушенных и осушенных болотах Карелии и Мурманской области эти характеристики не определялись, что препятствует использованию их в математических моделях тепло-влажнооборота и в практике расчета параметров мелиоративных систем Севера. Целью данной работы является определение этих характеристик на различных типах болот Карелии и Мурманской области.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в гидрофизической лаборатории ФГБУ «Государственный гидрологический институт» на монолитах торфа, отобранных на болотах Карелии и Мурманской области.

В табл. 1 приведены результаты определения плотности сухого вещества торфа по глубине торфяной залежи на неосушенных и осушенных болотах Карелии и Кольского полуострова. Анализ результатов определений показывает, что плотность сухого вещества деятельного слоя неосушенных болот невелика и не превосходит  $0,130 \text{ г/см}^3$ . Наименьшую плотность деятельного слоя ( $0,074 \text{ г/см}^3$ ) имеет сфагново-осоково-березовый микроландшафт (разрез 1а) мезоолиготрофного болота. Наибольшая плотность (до глубины 55 см) определена у сфагново-соснового, с примесью редкой березы, микроландшафта, в среднем –  $0,155 \text{ г/см}^3$ . Мохово-травяные микроландшафты, сфагново-осоковый (разрез 20а) и другие имеют более высокую плотность верхнего горизонта ( $0,130 \text{ г/см}^3$ ) и обладают меньшей изменчивостью по глубине. Во всех неосушенных болотах плотность сухого вещества увеличивается по глубине залежи, аналогично степени разложения торфа.

Все осушенные болота имеют плотность сухого вещества торфа существенно большую, чем однотипные неосушенные болота. Плотность сухого вещества торфа на осушенных болотах Карелии и Мурманской области в верхних горизонтах залежи изменяется от  $0,185$  до  $0,324 \text{ г/см}^3$  и, в основном, зависит от характера использования болота в отраслях экономики региона. Так, при 26-летнем периоде использования осушенного болота (разрез 1, М17) под посевы многолетних трав уплотнение залежи происходит преимущественно за счет понижения уровня болотных вод. Плотность сухого вещества в зоне аэрации (0–60 см) здесь составляет  $0,173 \text{ г/см}^3$ . Но интенсивное сельскохозяйственное освоение осушенных мезоолиготрофных и эвтрофных болот в течение 19–26 лет, сопровождающееся глубокой перепашкой, внесением минеральных удобрений, разложением органиче-

ского вещества (до степени разложения 25–40 %), увеличивает плотность верхних слоев до 0,220–0,320 г/см<sup>3</sup>. На осушенных болотах, в отличие от неосушенных, наблюдается уменьшение плотности сухого вещества торфа по глубине залежи до нижней границы зоны аэрации.

**Таблица 1.** Распределение плотности сухого вещества торфа (г/см<sup>3</sup>) по глубине торфяной залежи неосушенных и осушенных болот с различной продолжительностью их эксплуатации

Table 1. Distribution of the peat dry matter density (g/cm<sup>3</sup>) in the peat deposit depth of drained and undrained bogs with different terms of their exploitation

Глубина слоя, см	Естественные болота				Осушенные болота					
	M42, P1a, ЭК-0	M10, P8a, ЭК-0	M54, P12a, ЭК-0	M57, P20a, ЭК-0	M17, P1, ЭК-26	M29, P2, ЭК-25	M77, P3, ЭК-19	M78, P4, ЭК>26	M6, P5, ЭК-2	M44, P6, ЭК-1,5
0–10	0,075	0,106	0,089	0,130	0,194	0,324	0,232	0,212	0,185	0,262
10–20	0,070	0,086	0,144	0,147	0,175	0,316	0,215	0,258	0,153	0,316
20–30	0,059	0,103	0,189	0,145	0,170	0,256	0,155	0,305	0,162	0,286
30–40	0,097	0,113	0,183	0,138	0,180	0,162	0,161	0,228	0,175	0,184
40–50	0,180	0,115	0,181	0,121	0,146	0,140	0,158	0,158	0,168	0,185
50–60	0,269	0,093	0,167	0,125	0,117	0,126	0,218	0,148	0,158	0,156
60–70	0,243	0,087	0,194	0,153	0,110	0,154	0,153	0,170	0,170	0,157
70–80	0,267	0,089	0,187	0,158	0,092	0,152	0,147	0,155	0,139	0,124
80–90			0,227				0,159	0,130	0,156	0,128
90–100			0,389					0,128	0,172	0,141
100–110								0,167	0,141	

Примечание: М6–М78 – номер монолита; P1–P20a – разрез; ЭК0–ЭК26 – период эксплуатации.

Увеличение плотности на осушенных болотах происходит в первые 15–20 лет. При интенсивном сельскохозяйственном освоении болот среднее приращение плотности составляет от 0,007 до 0,01 г/см<sup>3</sup> за год и далее оно заметно снижается. При освоении болота свыше 30 лет существенного увеличения плотности не наблюдается.

Уплотнение торфяных почв сопровождается изменением энергетического состояния почвенной влаги: изменяется соотношение свободной и связанной воды. Важнейшей гидрофизической характеристикой почв, учитывающей эти соотношения, является потенциал почвенной влаги ( $\psi$ ) или эквивалентное давление, определяющее энергию связи воды с почвой. Потенциал почвенной влаги имеет размерность работы, может выражаться в единицах удельной энергии (Дж/кг), давления (Па, бар, атм.), гидравлического напора (мм вод. столба) и отрицательное значение. Ввиду этого его иногда называют сосущей силой почв.

Потенциал почвенной влаги или капиллярно-сорбционный потенциал не является константой, а находится в функциональной зависимости от влажности почвы  $\psi = f(W)$ . Известно, что зависимость капиллярно-сорбционного потенциала почвенной влаги от влажности ( $W$ ) является основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) почв. Информация об ОГХ особенно важна в смысле, что на ее основе можно получить сведения и о других водно-физических свойствах почв, например, о коэффициенте влагопроводности. К тому же, существует возможность систематизации почв различных типов и их механического состава именно по данным ОГХ. Все вышесказанное определяет актуальность получения этой зависимости для болот.

В практике гидрофизических исследований существуют различные экспериментальные методы определения ОГХ. Подробное описание большинства из них приведено в работе [1]. В рамках данного исследования для получения зависимости потенциала от влажности использовались следующие методы: в диапазоне изменения  $\psi$  от 0 до -15 Дж/кг потенциал измеряли с помощью капилляриметров; далее при значениях  $\psi$  от -15 до -80 Дж/кг применяли тензиометры, а при изменении  $\psi$  от -80 до -1500 Дж/кг – мембранные прессы. Основные результаты получены для процесса иссушения почвы.

Типы использованных в лабораторных исследованиях мембран (воронки Шота – в капилляриметрах, тонкопористые керамические датчики – в тензиометрах и целлофановая пленка – в мембранных прессах) отличаются давлением барбатирувания. Это предельное значение давления, после которого мембрана начинает пропускать воздух по своим порам: для воронки Шота 0,01–0,1 атм.; керамического датчика тензиометра 0,10–0,8 атм.; целлофановой пленки 0,8–16 атм. Для обеспечения надежности данных, полученных перечисленными методами, необходимо соблюдение высокой термостатичности помещения, поэтому все измерения проводились при постоянной температуре +20 °С на образцах ненарушенной структуры.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В гидрофизической лаборатории ГГИ для неосушенных низинных торфяных и низинных торфяно-глеевых болотных почв, а также осушенных низинных торфяных болотных почв севера Европейской территории России (Мурманская область и Республика Карелия) по 10-сантиметровым слоям определяли капиллярно-сорбционный потенциал в диапазоне давлений от 0,01 до 16 атм. (1–1600 Дж/кг). Полученные в ходе эксперимента зависимости потенциала от влажности  $\psi = f(W)$  для четырех неосушенных и восьми осушенных разрезов низинной болотной почвы приведены в табл. 2, табл. 3.

**Таблица 2.** Потенциал почвенной влаги осушенных болот Карелии и Кольского полуострова

Table 2. Potential of soil moisture of the drained bogs of Karelia and the Kola Peninsula

Осушенное низинное болото, 19 лет после осушения, Карелия, Корзинский стационар, монолит 77				
Слой, см	0–10	10–20	20–30	30–90
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,22	0,19	0,13	0,15
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества			
-1	370	420	657	594
-10	252	311	510	448
-20	207	252	410	362
-40	169	217	322	290
-70	146	194	263	239
-150	125	167	198	183
-300	110	145	160	144
-500	99	130	138	123
-1000	88	112	115	103
-1600	85	103	103	93

Осушенное низинное болото, 20 лет после осушения, г. Мурманск, монолит 17				
Слой, см	0–20	20–50	50–0	70–80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,17	0,15	0,105	0,06
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества			
-1	490	561	1156	1093
-10	380	450	574	751
-20	310	376	440	538
-40	253	298	344	383
-70	213	239	284	323
-150	166	188	230	257
-300	142	159	195	213
-500	127	140	173	191
-1000	110	118	145	158
-1600	101	107	130	147

Старая мелиоративная система, 25 лет после осушения, Карелия, пос. Лоухи, монолит 29					
Слой, см	0–10	10–20	20–30	30–40 и 40–70	70–80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,32	0,29	0,21	0,12	0,14
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества				
-1	–	295	381	750	644
-10	222	249	323	528	484
-20	194	218	278	428	389
-40	160	185	231	338	306
-70	139	164	204	272	249
-150	118	139	172	208	190
-300	100	116	152	173	157
-500	88	104	141	156	135
-1000	76	90	128	134	108
-1600	75	84	126	126	96

## Продолжение таблицы 2.

Осушенное низинное болото, 19 лет после осушения, Карелия, Корзинский стационар, монолит 77					
Слой, см	0–10	10–20	20–30	30–90	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,22	0,19	0,13	0,15	
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества				
-1	370	420	657	594	
-10	252	311	510	448	
-20	207	252	410	362	
-40	169	217	322	290	
-70	146	194	263	239	
-150	125	167	198	183	
-300	110	145	160	144	
-500	99	130	138	123	
Осушенное низинное болото, более 25 лет после осушения, г. Мурманск, монолит 64					
Слой, см	0–20	20–30	30–60	60–70	70–90
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,25	0,24	0,22	0,17	0,20
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества				
-1	331	359	394	512	465
-10	300	332	357	467	427
-20	282	308	332	430	402
-40	246	265	291	379	355
-70	209	220	247	323	296
-150	157	170	181	220	206
-300	128	135	142	170	155
-500	112	117	124	148	130
-1000	97	100	104	120	108
-1600	85	88	90	105	96

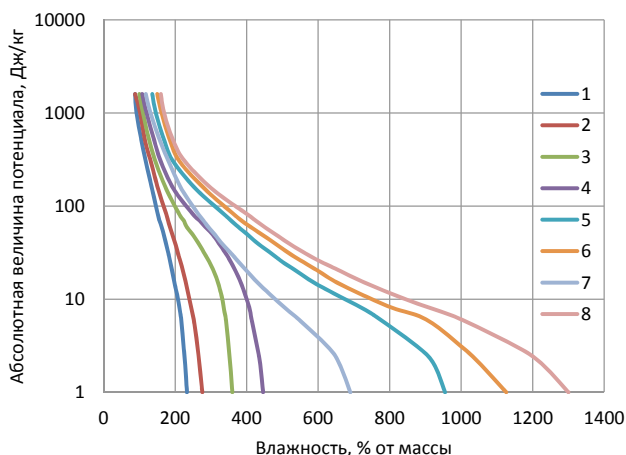
Анализ полученных результатов показывает, что потенциал влаги в торфе зависит от влажности, степени уплотнения и дисперсности торфа. Потенциал почвенной влаги от влажности как осушенных, так и неосушенных низинных торфяных почв значительно изменяется по глубине, если генетические горизонты различаются по плотности.

На рис 1. приведены сравнительные графики зависимостей  $|\psi| = f(W)$  для осушенного низинного болота (Корзинский стационар, 19 лет после осушения, зависимости 1–4) и неосушенного болота (г. Кандалакша, зависимости 5–8). Общий вид зависимостей отличается, прежде всего, диапазоном изменения влажности при изменении абсолютной величины потенциала от 1 до 1600 Дж/кг. Используемая в обобщениях величина весовой влажности характеризуется плотностью торфяника. На неосушенных болотах плотность ниже, чем на осушенных (табл. 3), поэтому весовая влажность и диапазон ее изменения значительно больше.

**Таблица 3.** Потенциал почвенной влаги неосушенных болот Карелии и Кольского полуострова

Table 3. Potential of soil moisture of the undrained bogs of Karelia and the Kola Peninsula

Низинное неосушенное болото, торфяно-глеевая почва, Карелия, Корзинский стационар, монолит 42				
Слой, см	0–10	10–20, 20–30, 30–40	40–50, 50–60, 60–70	70–80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,05	0,08	0,27	0,34
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества			
-1	1156	944	342	269
-10	574	522	240	182
-20	440	422	197	154
-40	344	340	162	125
-70	284	284	144	105
-150	230	230	124	86
-300	195	195	110	75
-500	173	173	102	69
-1000	145	145	95	64
-1600	130	130	94	63
Неосушенное низинное болото, г. Мурманск, монолит 54				
Слой, см	0–10	11–22, 22–33, 33–77	77–88	99–110
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,08	0,16	0,18	0,48
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества			
-1	944	561	490	148
-10	522	450	380	132
-20	422	376	310	121
-40	340	298	253	108
-70	284	239	213	95
-150	230	188	166	78
-300	195	159	142	69
-500	173	140	127	63
-1000	145	118	110	57
-1600	130	107	101	55
Неосушенное болото, г. Кандалакша, монолит 10				
Слой, см	0–10, 20–30, 50–70	10–20	30–50	70–80
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,09	0,08	0,12	0,066
Потенциал, Дж/кг	Влажность, % от массы сухого вещества			
-1	955	1126	690	1300
-10	675	750	480	844
-20	540	601	401	663
-40	430	478	330	517
-70	356	385	279	425
-150	260	285	219	306
-300	195	213	182	228
-500	170	186	158	195
-1000	146	162	131	169
-1600	136	150	118	160



**Рис. 1.** Экспериментальные зависимости потенциала торфяных почв от влажности для осушенного низинного болота, Корзинский стационар, 19 лет после осушения (зависимости 1–4) и неосушенного болота, г. Кандалакша (зависимости 5–8).  
**Fig. 1.** Experimental dependencies of the peat soils potential on humidity for a lowland swamp, Korzinskiy permanent establishment, 19 years after drainage (dependencies 1–4) and an undrained swamp, Kandalaksha (dependencies 5–8).

Информация об ОГХ почв представляет наибольший интерес при расчетах водного режима торфяников на основе модели, использующей следующее дифференциальное уравнение влагопереноса Ричардса:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial z} - K \right), \quad (1)$$

где  $W$  – влажность почвы;

$\psi$  – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги;

$K$  – коэффициент влагопроводности;

$t, z$  – время и вертикальная координата, при этом поверхность почвы совмещена с уровнем  $z = 0$ , а ось  $z$  направлена вниз.

Слабое внедрение методов математического моделирования связано не только с сложностью реализации дифференциальных уравнений влагопереноса, но и с отсутствием надежной информации об основных параметрах этих уравнений. К таким параметрам как раз и относятся потенциал почвенной влаги ( $\psi$ ) и коэффициенты влагопроводности ( $K$ ), а точнее зависимости этих характеристик от влажности.

Для аппроксимации экспериментальных данных предложено большое количество формул. В работах [2–4] анализируется применимость большинства из них. Как правило, различные формулы хорошо описывают экспериментальные зависимости  $\psi = f(W)$  не во всем диапазоне изменения влаж-



ности, обычно при низких или высоких ее значениях. Остается открытым вопрос определения входящих в расчетные формулы параметров. Большинство исследователей для этого применяют набор значений влажности ( $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  и  $P$ ), измеренных при фиксированных потенциалах почвенной влаги – обычно используются потенциалы  $\psi_1 = -33$  Дж/кг,  $\psi_2 = -1500$  и  $\psi_3 = -5000$  Дж/кг. Влажности при данных значениях потенциала близки по величине наименьшей влагоемкости (НВ), влажности завядания (ВЗ) и максимальной гигроскопичности (МГ) соответственно. Пористость почвы ( $P$ ) обычно соответствует потенциалу, близкому к нулю. На основе вышеперечисленных параметров была получена расчетная формула, аппроксимирующая зависимость потенциала от влажности во всем диапазоне ее изменения [5]:

$$\psi = \psi_2 \left\{ \frac{W_2[(1 + \beta(W - W_2))]}{W} \right\}^n \cdot \left( \frac{P - W}{P - W_2} \right), \quad (2)$$

где

$$\beta = \frac{(\psi_1/\psi_2)^{\frac{1}{n}} \frac{W_1}{W_2} \left( \frac{P - W_2}{P - W_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1}{(W_1 - W_2)}. \quad (3)$$

$$n = \frac{\ln(\psi_2/\psi_1)}{\ln(W_1/W_2)}. \quad (4)$$

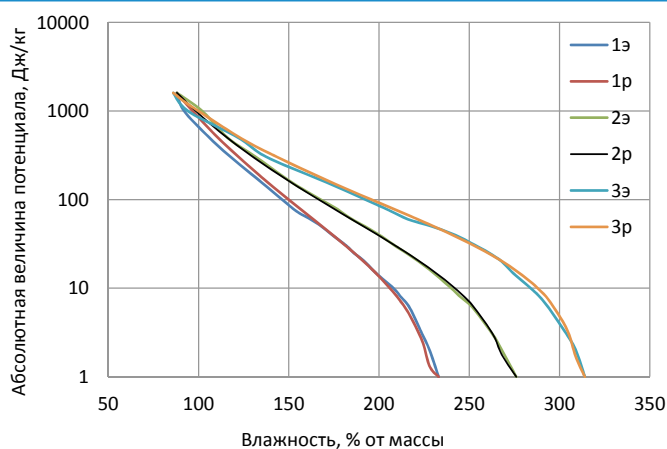
На рис. 2 представлены результаты сопоставления экспериментальных и расчетных по формуле (2) зависимостей  $\psi = f(W)$ , которые свидетельствуют о хорошей их сходимости во всем диапазоне изменения влажности. В работе [5] проведены сопоставления расчетов потенциала по формуле (2) с предложенными в ряде исследований, в т. ч. с формулой, полученной Ю.Г. Мотовиловым [4]. Сопоставления показали преимущества в точности расчетов по формуле [5]. Однако формула (2) имеет довольно сложную структуру и ее применение для практических расчетов затруднено. Целесообразно использовать более простые аппроксимационные выражения для расчета потенциала. Довольно точные результаты достигаются при расчете потенциала почвенной влаги по выражению

$$\psi = \psi_2 \left( \frac{W_2}{W} \right)^\lambda, \quad (5)$$

где

$$\lambda = \frac{\ln(\psi_2/\psi_1)}{\ln(W_1/W_2)}. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными значениями потенциала для всех приведенных в табл. 2 и табл. 3 данных лежит в диапазоне от 0,97–0,99, т. е. очень высокий.



**Рис. 2.** Экспериментальные и расчетные зависимости потенциала торфяных почв от влажности для осушенного низинного болота, Корзинский стационар, 19 лет после осушения.

Fig. 2. Experimental and calculated dependencies of the peat soils moisture potential on humidity for a drained lowland swamp, Korzinskiy permanent establishment, old melioration system, 19 years after drainage.

Практическое использование выражения (2) предполагает наличие экспериментальных данных о реперных значениях влажности  $W_1$ ,  $W_2$  и  $P$ , которые, как правило, определяются лабораторным путем.

Величину общей пористости можно рассчитать по выражению:

$$P = 1 - \frac{\rho_{\pi}}{d_{\pi}}, \quad (7)$$

где  $\rho_{\pi}$  – плотность сложения почвы;  $d_{\pi}$  – плотность твердой фазы почвы.

Для некоторых типов почв есть возможность определить зависимость  $\psi = f(W)$  на основе меньшего количества исходных характеристик. Так, при выполнении экспериментальных работ установлено, что для низинных неосушенных и осушенных болотных почв Карелии и Мурманской области в диапазоне изменения плотности от 0,07 до 0,45 г/см<sup>3</sup> значения  $W_1$  и  $W_2$  могут быть определены по следующим аппроксимационным выражениям:

$$W_1 = \frac{63}{\rho_{\pi}^{0,83}}, \quad (8)$$

$$W_2 = \frac{54}{\rho_{\pi}^{0,36}}, \quad (9)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  выражены в процентах от массы сухого вещества. Коэффициент корреляции  $R$  для выражения (8) составляет 0,86, для формулы (9)  $R = 0,91$ .

Подобные зависимости для минеральных почв получить практически невозможно, поэтому в данном случае параметры  $W_1$  и  $W_2$  необходимо определять экспериментальным путем.

Для экспериментального определения коэффициента влагопроводности от влажности  $K = f(W)$  использован метод тензиометров. В процессе измерения потенциала керамические зонды устанавливались на двух горизонтах почвенной колонки. Поэтому мы имеем сведения о градиенте потенциала. Одновременно весовым методом определялся поток влаги  $q$  из колонки в процессе ее испарения. Далее коэффициент влагопроводности рассчитывался по формуле:

$$q = K \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (10)$$

Наиболее разработанным методом определения зависимости коэффициента влагопроводности от влажности является подход, основанный на существовании связи между коэффициентом влагопроводности и потенциалом почвенной влаги. Многие из зависимостей  $K = f(W)$  получены на основе статистических интерпретаций пористого пространства почв. Одной из них является формула Муалена [6], имеющая вид:

$$K = K_0 \left( \frac{W}{P} \right)^{0.5} \left[ \frac{\int_0^W \frac{\partial W}{\psi}}{\int_0^P \frac{\partial W}{\psi}} \right]^2, \quad (11)$$

где  $K_0$  – коэффициент фильтрации.

Эта зависимость достаточно хорошо обоснована теоретически и проверена на большом количестве экспериментального материала. При аппроксимации  $\psi$  функцией степенного вида (5) выражение (11) принимает следующий вид:

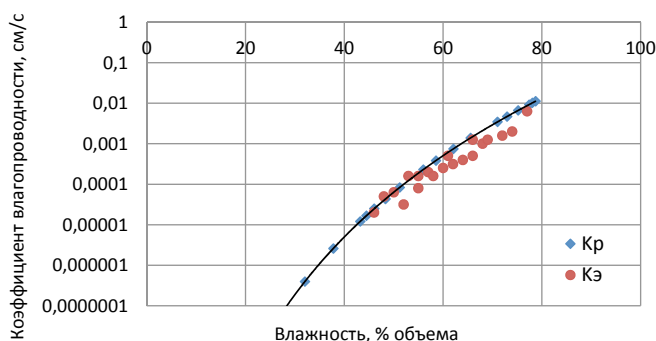
$$K = K_0 \left( \frac{W}{P} \right)^{2\gamma+2,5}. \quad (12)$$

Для расчета коэффициента фильтрации для торфяных почв предлагается формула [7]:

$$K_0 = 4,2 \frac{(P - W_1 - 0,04)^2}{W_1}, \quad (13)$$

где  $P$ ,  $W_1$  – в долях объема, а  $K_0$  – в см/ч.

Несмотря на простоту выражения (12), результаты расчета по этой формуле находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными о  $K$  в диапазоне изменения влажности от 0 до  $W_2$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Экспериментальные ( $K_{\text{э}}$ ) и расчетные ( $K_{\text{р}}$ ) зависимости коэффициентов влагопроводности торфяных почв от влажности для осушенного низинного болота, старая мелиоративная система, 25 после осушения, Карелия, пос. Лоухи.

Fig. 3. Experimental ( $K_{\text{э}}$ ) and calculated ( $K_{\text{р}}$ ) dependencies of the peat soils moisture conductivity coefficients on humidity for a drained lowland swamp, old melioration system, 25 years after drainage, Karelia Loukhi settlement.

### ВЫВОДЫ

Проведение мелиоративных мероприятий на болотах Республики Карелия и Мурманской области значительно влияет на их водно-физические и тепловые свойства. При этом увеличивается плотность верхнего слоя залежи, изменяется ее структура, пористость и, как результат, подвижность почвенной влаги. Уплотнение определенным образом влияет и на энергетическое состояние почвенной влаги. Изменяется соотношение свободной и связанной воды, т. е. эквивалентное давление (потенциал почвенной влаги), определяющее энергию связи воды с почвой.

В рамках проведенного исследования в лабораторных условиях определен потенциал почвенной влаги торфа для естественных и осушенных болот в диапазоне его изменения от 0 до -1500 Дж/кг. Установлено, что с увеличением срока эксплуатации болотных массивов увеличивается плотность торфа, и, как следствие, потенциал почвенной влаги. Таким образом, потенциал почвенной влаги находится в функциональной зависимости не только от влажности, но и от плотности торфа.

Для аппроксимации экспериментальных данных предложен метод и расчетная формула, аппроксимирующая зависимость потенциала от влажности во всем диапазоне ее изменения на основе реперных значений влажности ( $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  и  $P$ ), измеренных при фиксированных потенциалах почвенной влаги: обычно используются потенциалы  $\psi_1 = -33$  Дж/кг,  $\psi_2 = -1500$  и  $\psi_3 = -5000$  Дж/кг. Коэффициент корреляции между определенными и расчетными значениями потенциала лежит в диапазоне 0,97–0,99.

При обобщении полученных экспериментальных данных установлено, что для низинных неосушенных и осушенных болотных почв Карелии и

Мурманской области в диапазоне изменения плотности от 0,07 до 0,45 г/см<sup>3</sup> реперные значения влажности  $W_1$  и  $W_2$  имеют тесную связь с плотностью торфа. Предложены формулы для расчета  $W_1$  и  $W_2$ . Коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными величинами для  $W_1$  составляет 0,86, а для  $W_2$  – 0,91.

Установлена зависимость коэффициента влагопроводности от влажности, основанная на существовании связи между коэффициентом влагопроводности и потенциалом почвенной влаги. Результаты расчета по предложенной формуле соответствуют лабораторным определениям в диапазоне изменения влажности от 30 до 80 % от объема.

Представленные в данной работе результаты исследований являются информационной базой для математического моделирования водного режима осушенных и неосушенных болотных массивов и оценки влияния мелиоративных мероприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобус А.М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 355 с.
2. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 428 с.
3. Кучмент А.С., Демидов В.Е., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.: Наука, 1983. 216 с.
4. Мотовилов Ю.Г. Расчет основной гидрофизической характеристики почв по данным о почвенно-гидрологических константах // Метеорология и гидрология. 1980. № 12. С. 93–100.
5. Лавров С.А. Определение основной гидрофизической характеристики по данным о почвенно-гидрологических константах // Труды ГГИ. 1986. Вып. 308. С. 39–45.
6. Muallem Y. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Res. Res.V. 1976. No. 3. P. 513 – 522.
7. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. СПб.: Нестор-История, 2012. 615 с.

*Для цитирования:* Лавров С.А., Калюжный И.Л., Основные гидрофизические параметры осушенных болот Республики Карелия и Мурманской области // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 23–36.

#### Сведения об авторах:

**Лавров Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, д. 23; e-mail: lavrov@ecopro.spb.ru

**Калюжный Игорь Леонидович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, д. 23; e-mail: hfl@mail.ru

MAIN HYDROPHYSICAL PARAMETERS OF THE DRAINED SWAMPS  
OF THE REPUBLIC OF KARELIA AND MURMANSK OBLAST

Sergey A. Lavrov, Igor L. Kalyuzhny

E-mail: hfl@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

**Abstract:** Melioration measures at swamps of the Republic of Karelia and Murmansk Oblast, and their successive agricultural use change water/physical properties of this wetland. Changes in potential of soil water that determines of energy of water-soil relationship accompany the peat density increase. The authors state that potential of soil water depends in functional manner on peat moisture and its density. It is fixed that under increase of wetland usage period peat density rises and, consequently, soil water potential rises as well. We suggested the method and calculating formula approximating potential dependency on moisture content within the whole range of its changes. The article defines dependency of moisture conduction on moisture (within the range from 30% to 80% of volume) that is based on relationship between coefficient of moisture conduction and potential.

**Key words:** drained swamps, potential of soil water, coefficient of moisture conduction, Republic of Karelia, Murmansk Oblast.

**About the authors:**

Sergey A. Lavrov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, State Hydrological Institute, 23, 2 liniya Vasilyevskiy Ostrov, St. Petersburg, 199053, Russia, 23; e-mail: lavrov@ecopro.spb.ru

Igor L. Kalyuzhny Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Laboratory, State Hydrological Institute, 23, 2 liniya Vasilyevskiy Ostrov, St. Petersburg, 199053, Russia; e-mail: hfl@mail.ru

**For citation:** Lavrov S.A., Kalyuzhny I.L. Main Hydrological Parameters of the Drained Swamps of the Republic of Karelia and Murmansk Oblast // *Water Sector of Russia*. 2020. No. 2. P. 23–36.

## REFERENCES

1. *Globus A.M.* Eksperimental'naya gidrofizika pochv. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 355 p.
2. *Globus A.M.* Pochvenno-gidrofizicheskoe obespechenie agroekologicheskikh matematicheskikh modelej. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 428 p.
3. *Kuchment L.S., Demidov V.E., Motovilov YU.G.* Formirovanie rechnogo stoka. M.: Nauka, 1983. 216 p.
4. *Motovilov YU.G.* Raschet osnovnoj gidrofizicheskoy karakteristiki pochv po dannym o pochvenno-gidrologicheskikh konstantah // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1980. № 12. P. 93–100.
5. *Lavrov S.A.* Opredelenie osnovnoj gidrofizicheskoy karakteristiki po dannym o pochvenno-gidrologicheskikh konstantah // *Trudy GGI*. 1986. Vyp. 308. P. 39–45.
6. *Mualem Y.* A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media // *Water Res. Res.* Vol. 1976. No. 3. P. 513–522.
7. *Kalyuzhnyj I.L., Lavrov S.A.* Gidrofizicheskie processy na vodosbore. SPb.: Nestor-Istoriya, 2012. 615 p.