

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ БОЛОТ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

И. Л. Калюжный

ФГБУ Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

Аннотация

Плотность сухого вещества верхних горизонтов мезоолиготрофных болот Кольского п-ова не превосходит $0,1 \text{ г/см}^3$ и возрастает по глубине деятельного слоя до $0,25 \text{ г/см}^3$, при этом доля его объема увеличивается от 1,47 до 4,5 %. Пористое пространство формируется порами радиусом от $2,0 \cdot 10^{-4}$ до $120,0 \cdot 10^{-4}$ см. Слои с наименьшей объемной массой сухого вещества содержат больше капиллярной влаги. В грядово-мочажинном комплексе (гряда сфагново-кустарничковая) больше всего капиллярной влаги содержится в слое 10–20 см — до 60–63 % при массе сухого вещества $0,057\text{--}0,059 \text{ г/см}^3$. Пористость обуславливает подъем уровня воды и водоотдачу при выпадении осадков, которые характеризуются коэффициентами водоподъема и водоотдачи. Первый — изменяется от 2,08 до 5,75 мм на 1 мм атмосферных осадков, второй — уменьшается от значений 0,34–0,48 в верхних горизонтах и до 0,26–0,20 в нижних. Водопроницаемость конкретного слоя зависит исключительно от радиуса наиболее крупных пор в нем.

Ключевые слова:

болота Кольского п-ова, деятельный слой, пористость, капиллярная структура, водоотдача, водоподъем, фильтрация.

HYDRO-PHYSICAL PROPERTIES OF THE ACTIVE LAYER IN BOGS IN THE KOLA PENINSULA

Igor L. Kalyuzhny

State Hydrological Institute, Saint Petersburg

Abstract

Density of dry substance in upper layers of meso-oligotrophic bogs in the Kola Peninsula doesn't exceed $0,1 \text{ gr/cm}^3$ and increases with the active layer depth up to $0,25 \text{ gr/cm}^3$. Its volume also increases from 1,47 to 4,5 %. Pores, which are from $2,0 \cdot 10^{-4}$ to $120,0 \cdot 10^{-4}$ cm in radius, form porous media. The less is the dry substance volume in a layer, the more capillary water it contains. In a hummocky-ridge complex with a sphagnum-subshrub ridge, 60–63 % of capillary water is contained in the upper 10-20 cm layer with dry weight of $0,057\text{--}0,059 \text{ gr/cm}^3$. Porosity causes water level rise and water return during precipitation. They are characterized with water rise and water return coefficients. The first one varies from 2,08 to 5,75 mm per 1 mm of precipitation. The second one decreases from 0,34–0,48 in the upper horizons to 0,26–0,20 in the bottom ones. Transmission constant of a specific layer depends exclusively on the biggest pores' radius.

Keywords:

bogs of the Kola Peninsula, active layer, porosity, capillary structure, water return, water rise, filtration.



Введение

Освоение болотных массивов в различных отраслях экономики России требует глубоких знаний о природе и свойствах болот. Строительство мелиоративных систем, прокладка линейных сооружений (дорог, трубопроводов, кабельных сетей и др.) требует выполнения специальных расчетов и оценки взаимодействия их с болотными массивами. Мелиоративное строительство, которое обусловлено ведением сельскохозяйственного производства, добыча и переработка торфа для иных целей [1] определяют

необходимость определения водно-физических свойств торфяной залежи. Учитывая, что Мурманская обл. выходит за общепринятые границы возможного распространения земледелия, а мелиоративный фонд области ограничен, исследование физических свойств болот здесь практически не проводилось.

Первые работы по определению и обобщению водно-физических свойств торфяной залежи в России были выполнены А. Д. Дубахом [2] еще в 1936–1941 гг. В послевоенные годы водно-физические свойства олиготрофных и эвтрофных болот исследовались К. Е. Ивановым [3], В. В. Романовым [4], П. К. Воробьевым [5], К. П. Лундиным [6] и др.

Первые результаты стационарных исследований гидрофизических процессов, протекающих на болотах Кольского п-ова, были получены на специализированной сети болотных станций Росгидромета, а также путем полевых исследований Государственного гидрологического института.

Целью настоящей работы является обобщение полученных материалов для дальнейшего их использования в различных областях экономики, охраны природы и окружающей среды.

Краткое описание объектов исследования

Основные стационарные полевые и лабораторные работы были проведены на специализированной болотной станции Пулозерская, объект исследований которой — болото Пулозерское. Массив расположен в провинции финско-кольской северной тайги и лапландских аапа. Описание болотного массива приведено в работе [7].

Полевые работы по обследованию болотных массивов и отбору монолитов торфа для лабораторных исследований были выполнены также в следующих пунктах:

- на естественном олиготрофном болоте (провинция финско-кольской северной тайги и лапландских аапа), в районе участка «Колвица» (г. Кандалакша) в сфагново-кустарничковом микроландшафте с редким облесением сосны и березы (торфяная залежь однородная со степенью разложения 5–10 %);
- на болотном массиве Фенноскандийской провинции березовой лесотундры и крупнобугристых болот, расположенном в 50 км от Мурманска на левом берегу р. Тулома, в сфагново-сосновом, облесенном редкой березой, микроландшафте;
- на мезотрофном болотном массиве карело-финской провинции северной тайги и аапа болот, расположенном вблизи пос. Лоухи Республики Карелия, в сфагново-осоковом, кочковатом микроландшафте.

Всего было отобрано 8 монолитов торфа площадью сечения 500 см² и высотой 100 см.

Методы определения водно-физических характеристик

Водно-физические свойства деятельного слоя торфяной залежи определяют интенсивность физических процессов, происходящих в деятельном слое болот. Важнейшими характеристиками этих свойств, которые влияют на формирование протекающих физических процессов в естественном или преобразованном (мелиорированном) состоянии залежи, являются:

- плотность и пористость сухого вещества торфа и растительных остатков;
- капиллярная структура деятельного слоя, выраженная в виде распределения размеров и объемов внутренних и внешних пор, определяющих его водоудерживающую способность;
- водоподъем уровня болотных вод и водоотдача торфяной залежи, определяемая коэффициентами водоподъема и водоотдачи;
- водопрopusкная способность залежи, определяемая характеристиками влагопроводности и, при полном влагонасыщении слоя, коэффициентом фильтрации.

Капиллярные характеристики деятельного слоя позволяют оценить энергию связи влаги с органическим веществом торфа и определить величину гидравлического напора, при котором связанная вода в зоне аэрации переходит в свободное состояние и участвует в процессе

водоотдачи, капиллярного поднятия, вертикальной и горизонтальной фильтрации. Эти характеристики определялись в лабораторных условиях на капилляриметрах ГР-37 и образцах торфа, отобранных в конкретных болотных микроландшафтах. Методика производства работ приведена в работе [8].

Под плотностью сухого вещества торфа понимают содержание в единице объема торфяной залежи массы растительных остатков и торфа. С целью определения плотности в конкретных микроландшафтах болота отбирают монолиты торфа и в лабораторных условиях определяют эту характеристику послойно на образцах, высушенных до воздушно-сухого состояния. Методика определения плотности сухого вещества и твердой фазы торфа приведена в работе [8].

Полевой метод определения реакции уровня болотных вод на выпадающие жидкие атмосферные осадки основан на синхронной записи выпадающих осадков и вызванной ими реакции уровня болотных вод. Коэффициент водоподъема определяется по данным полевых наблюдений на специальной полевой установке, которая состоит из самописцев уровня воды и дождя. Методика наблюдений и их обработка изложена в работе [8].

Коэффициенты фильтрации торфяной залежи характеризуют степень влагопроводности болотных микроландшафтов. В пределах деятельного слоя их определяют на крупных монолитах (размером 90×50×40 см), отобранных в зимний период на болоте и установленных на специальных безнапорных фильтрационных лотках. Методика производства работ приведена в источнике [8].

Плотность и пористость деятельного слоя торфяной залежи

Биохимические процессы, приводящие к распаду органического вещества и образованию торфа, происходят в основном в верхнем, деятельном (торфогенном) слое мощностью до 0,5 м [3, 4]. В этом слое происходит теплообмен, обмен влагой с атмосферой, изменяется ее фазовый состав, поверхностный отток воды за пределы болота и ряд других процессов. Ниже этого слоя процессы разложения органики происходят без доступа кислорода и крайне медленно.

Структура деятельного слоя формируется продуктами распада, остатками растений и живыми растениями, «если они настолько плотно сомкнуты, что в порах между ними вода может двигаться под влиянием капиллярных сил» [4].

Поверхность деятельного слоя представляет собой живой растительный покров, состоящий из головок и стеблей мха, корневой системы растений, и характеризуется чрезвычайно высокой пористостью. В сообществе мхи — кустарнички наибольшая насыщенность корешками кустарничков наблюдается на глубинах 5–8 см от поверхности. Поры при этом вытянуты в вертикальном направлении. Степень разложения торфа составляет 3–5 %. На глубинах 10–15 см увеличивается количество погребенных частей кустарничков. Плотность сухого вещества торфа колеблется в пределах от 0,050 до 0,100 г/см³ и занимает 4–6 % объема при пористости до 97 %.

Далее в деятельном слое хорошо просматривается уплотнение растительного материала, при котором вертикальное расположение стеблей изменяется на горизонтальное со слабыми признаками разложения органики. Мощность этой части деятельного слоя составляет не более 10–15 см. Степень разложения увеличивается до 10–15 %, а пористость несколько уменьшается.

Следующий слой имеет хорошо выраженное слоистое уплотненное строение со степенью разложения до 25 %. Механическое уплотнение растительных осадков в этом слое наблюдается до глубин 50–60 см от дневной поверхности. Плотность сухого вещества торфа становится более 0,110–0,150 г/см³, пористость уменьшается до 93 %.

Физические свойства деятельного слоя характеризуются низкой плотностью сухого вещества торфа и большой пористостью.

В табл. 1 приведены эти характеристики на примере их определений в микроландшафтах Пулозерского болота.

Послойные значения физических характеристик деятельного слоя
болотных микроландшафтов Пулозерского болота
Physical properties of different horizons of the active layer
in bog micro landscapes of the Pulozerskoye bog

Глубина слоя, см Layer thickness, cm	Кустарничково-лишайниковый микроландшафт Subshrub-lichen micro landscape			Грядово-мочажинный комплекс Hummocky-ridge complex		
	Плотность, г/см ³ Density, gr/cm ³	Сухое вещество Dry substance, %*	Пористость Porosity, %*	Плотность, г/см ³ Density, gr/cm ³	Сухое вещество Dry substance, %*	Пористость Porosity, %*
0–5	0,071	4,6	95,5	0,096	6,4	94,0
5–10	0,050	4,8	96,7	0,069	4,6	95,6
10–15	0,050	4,8	96,9	0,094	6,2	94,0
15–20	0,069	4,4	95,7	0,086	5,8	94,5
20–25	0,074	6,4	93,9	0,094	6,3	94,0
25–30	0,084	4,2	93,2	0,100	6,7	93,6
30–35	0,173	9,6	89,4	0,115	7,7	92,7
35–40	0,149	8,6	91,1	0,107	7,1	93,2
40–45	0,108	6,7	93,2	0,108	6,7	93,1
45–50	0,118	7,4	92,5	–	–	–

* От объема / of the volume.

Анализ таблицы показывает, что плотность сухого вещества чрезвычайно мала и в верхнем горизонте деятельного слоя (от 0–25...30 см) не превосходит 0,100 г/см³. Она увеличивается от поверхности по глубине, и на нижних глубинах деятельного слоя (35–40 см) (табл. 2) увеличение плотности несколько замедляется. Доля объема растительного вещества во всех микроландшафтах возрастает от поверхности по глубине залежи, в пределах от 1,47 до 4,50 %. Ниже деятельного слоя плотность сухого вещества торфа неуклонно возрастает. На глубине 50–60 см она достигает 0,150–0,190 г/см³ и пористости 0,90–92,0 %, а на глубинах свыше 100 см — 0,551 г/см³ при пористости до 65,0 %.

Результаты сравнения плотности сухого вещества торфа в пределах деятельного слоя различных болотных микроландшафтов (табл. 1, 2) однозначно показывают, что наибольшей плотностью обладают микроландшафты с высокой степенью облесенности, в частности: сфагново-сосновый (табл. 2) и мохово-травяные (сфагново-осоковый, осоково-пушицевый). Особенностью распределения плотности сухого вещества является ее увеличение по глубине деятельного слоя и торфяной залежи. В сфагново-сосновом микроландшафте, на нижней границе деятельного слоя (50 см) плотность достигает 0,180–0,190 г/см³. Наименьшей плотностью обладает грядово-мочажинный аапа-комплекс и мочажины грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов.

Осредненные величины плотности в пределах деятельного слоя ряда болотных микроландшафтов Кольского п-ова приведены в табл. 3, из которой следует, что средние величины плотности сухого вещества в деятельном слое большинства микроландшафтов болот близки между собой. Исключение составляют только мохово-травяные, в частности, осоково-пушицевый микроландшафт.

Таблица 2
Table 2

Плотность (ρ) и пористость (P) верхних горизонтов торфяной залежи
отдельных микроландшафтов болот Кольского п-ова

Density (ρ) and porosity (P) of the upper horizons of a peat deposit
of the specific bog micro landscapes in the Kola Peninsula

Глубина слоя, см Layer thickness, cm	Сфагново-сосновый с редкой березой (разрез 12) Sphagnum-pine with few birch trees (cross-section 12)		Сфагново-кустарничковый, облесенный сосной и березой (разрез 8) Sphagnum-subshrub, forested with pine and birch (cross-section 8)		Сфагново-осоковый, кочковатый (разрез 20) Sphagnum-sedge, hummocky (cross section 20)	
	ρ , г/см ³ ρ , gr/cm ³	P , %	ρ , г/см ³ ρ , gr/cm ³	P , %	ρ , г/см ³ ρ , gr/cm ³	P , %
0–10	0,089	94,4	0,106	93,3	0,130	91,8
10–20	0,144	90,9	0,086	94,5	0,147	90,7
20–30	0,189	88,0	0,103	93,5	0,145	90,8
30–40	0,183	88,4	0,113	92,8	0,138	91,8
40–50	0,181	88,5	0,115	92,7	0,121	92,2
50–60	0,167	89,4	0,093	94,1	0,125	92,1
60–70	0,194	87,7	0,087	94,5	0,153	90,3
70–80	0,187	88,1	0,089	94,4	0,158	90,0
80–90	0,227	85,6	–	–	–	–
90–100	0,551	65,0	–	–	–	–
100–110	0,551	65,0	–	–	–	–

Таблица 3
Table 3

Осредненные физические характеристики деятельного слоя
болотных микроландшафтов Кольского п-ова

Average physical properties of the active layer in bog micro landscapes in the Kola Peninsula

Микроландшафт Micro landscape	Глубина слоя, см Layer thickness, cm	Плотность, г/см ³ Density, gr/cm ³	Сухое вещество Peat dry substance, %	Пористость Porosity, %
1	2	3	4	5
Пулозерский болотный массив / The Pulozersky wetland				
Кустарничково-лишайниковый Subshrub-lichen	0–50	0,095	6,4	93,8
Грядово-мочажинный; гряды — лишайниково- сфагново-кустарничковые Ridge-pool; ridges — lichen- sphagnum-subshrub	0–50	0,114	6,9	92,8
Грядово-мочажинный; гряды — лишайниково- мохово-кустарничковые (периферия) Ridge-pool; ridges — lichen- sphagnum-subshrub (outskirt)	0–40	0,095	6,4	94,0

1	2	3	4	5
Грядово-мочажинный; гряды — лишайниково- мохово-кустарничковые (центральная часть) Ridge-pool; ridges — lichen- moss-subshrub (central part)	0–40	0,101	6,7	93,5
Краснощельский болотный массив / The Krasnoschelsky wetland				
Грядово-мочажинный аапа-комплекс Ridge-pool аапа-complex	0–0	0,082	5,1	94,8
Осоково-пушицевый Sedge-cotton grass	0–50	0,159	9,8	89,9

Между плотностью абсолютно сухого вещества деятельного слоя (d , г/см³) и его содержанием, определяемого в процентах от объема (D , %), существует хорошо выраженная зависимость:

$$D = 63,8 d + 0,18,$$

коэффициент корреляции, которой равен 0,99. Зависимость справедлива для деятельного слоя всех типов болотных микроландшафтов в диапазоне плотностей от 0,03 до 0,55 г/см³.

Пористость (P , % объема) деятельного слоя в зависимости от содержания сухого вещества определяется выражением:

$$P = 100,0 - 63,6 d,$$

коэффициент корреляции равен 0,99.

Содержание сухого растительного вещества обуславливает изменение пористости деятельного слоя, а его плотность определяет физические свойства, от которых зависит интенсивность протекания ряда водно- и теплофизических процессов.

Капиллярные характеристики деятельного слоя болотных микроландшафтов

Опыты на капилляриметре ГР-37 позволяют получить значения влагоемкости торфа, характеризующие максимальное равновесное влагосодержание в зоне аэрации при различной глубине стояния уровня болотных вод, и распределение пор по размерам. Они охватывают диапазон пор, выдерживающих разрежение от 2,2 до 162 см водяного столба.

Следует различать два вида пор — внутренние и внешние. Внутренние поры — это поры внутри растений и их остатков. Перемещение влаги в них происходит под действием осмотических сил. Внешние поры формируются между живыми и отмершими стеблями растений и частицами торфа. Капиллярная влага по ним перемещается под действием гравитации и капиллярных сил. Внешняя пористость определяет фильтрационные свойства, водоподъем и водоотдачу деятельного слоя во всех типах болот. Посредством капилляриметра мы определяем влагу, содержащуюся во внешних порах, т. е. капиллярную. Влагу внутренних пор определяем расчетным путем как разность между массой образца до и после высушивания с учетом содержания сухого вещества. Эта влага внутриклеточная, адсорбированная и удерживаемая капиллярными силами в столь мелких порах, что высота капиллярного поднятия в них превышает применявшуюся для отсоса разность гидростатического давления.

Влага, удерживаемая в торфе над уровнем грунтовых вод, полностью зависит от структуры пористости торфа. Наибольшая высота капиллярного поднятия воды в неоднородной пористой среде определяется радиусом наиболее тонких пор. Радиусы пор рассчитываются по формуле Жюрена [4]. При проведении опытов на капилляриметре мы определяем объем пор, радиус которых составляет от $2,0 \cdot 10^{-4}$ до $120,0 \cdot 10^{-4}$ см.

Таблица 4
Table 4

Распределение объема пор в микроландшафтах Пулозерского болота
Distribution of pore volume in micro landscapes in the Pulozerskoye bog

Глубина, см Depth, cm	Объем пор в % при данном интервале высот отсоса (в см, числитель) и соответствующий ему радиус пор (в см, знаменатель) Pore volume (%) at the specific level of pumping (cm) (numerator) and the corresponding pore radius (cm) (denominator)									
	0-2,5 2-10 ⁻⁴	2,5-7,5 2,37·10 ⁻⁴	7,5-12,5 127·10 ⁻⁴	12,5-22,5 73,0·10 ⁻⁴	22,5-42,5 43,0·10 ⁻⁴	42,5-62 28,0·10 ⁻⁴	62-92 19·10 ⁻⁴	92-132 13·10 ⁻⁴	132-162 12·10 ⁻⁴	
Грядово-мочажинный комплекс, сфагново-кустарничковая гряда Ridge-pool complex, sphagnum-subshrub ridge										
0-5	8,0	26,9	5,4	4,9	2,4	1,1	1,0	1,0	0,5	0,5
5-10	11,5	20,4	4,9	4,8	4,6	1,1	1,9	0,6	0,3	0,3
10-15	42,8	4,6	2,4	6,5	3,0	1,1	0,8	1,6	0,3	0,3
15-20	33,9	4,3	4,3	5,9	5,6	2,7	1,8	1,1	0,5	0,5
20-25	10,2	4,6	2,4	6,5	8,6	5,6	4,0	6,2	1,9	1,9
25-30	9,9	3,0	1,3	5,2	7,3	4,5	0,3	3,8	0,5	0,5
30-35	13,8	2,7	1,1	3,2	4,9	3,2	1,1	3,7	1,0	1,0
35-40	12,4	3,0	1,1	2,2	5,9	1,1	4,1	4,8	1,6	1,6
40-45	9,7	11,0	3,2	4,6	6,7	3,5	5,1	2,9	1,6	1,6
45-50	6,4	11,6	9,2	10,2	8,9	2,9	4,0	4,1	0,2	0,2
Кустарничково-лишайниковый микроландшафт Subshrub-lichen micro landscape										
0-5	0,8	18,3	6,7	5,7	4,3	2,4	2,4	2,7	1,9	1,9
5-10	10,5	10,2	4,3	6,0	5,4	0,8	0,8	1,8	1,3	1,3
10-15	7,8	8,0	3,0	4,0	6,0	3,0	2,1	2,7	0,5	0,5
15-20	10,5	13,8	6,8	4,6	5,6	2,7	1,6	2,1	1,1	1,1
20-25	-	6,2	3,8	7,6	8,0	3,5	2,7	0,2	1,0	1,0
25-30	-	2,1	1,7	9,4	8,6	2,4	1,9	0,2	0,3	0,3
30-35	-	2,5	3,5	5,4	6,8	4,6	4,1	3,5	1,6	1,6
35-40	6,7	1,3	3,8	5,2	4,9	8,1	1,9	1,9	0,6	0,6
40-45	2,6	2,7	1,0	3,2	7,2	2,7	2,4	2,9	2,1	2,1
45-50	6,7	1,1	1,0	4,8	7,3	4,5	4,6	4,0	2,1	2,1

В качестве примера в табл. 4 приведены результаты определения структуры пористости деятельного слоя гряды грядово-мочажинного комплекса и кустарничково-лишайникового микроландшафта по данным опытов на капилляриметре ГР-37. Из результатов определения капиллярной влаги, приведенных в табл. 4, следует, что при отрицательном гидростатическом давлении до 162 см водяного столба наибольшее количество капиллярной влаги содержат слои с наименьшей объемной массой сухого вещества торфа.

В грядово-мочажинном комплексе (гряда сфагново-кустарничковая) наибольшее количество капиллярной влаги содержится в слое 10–20 см — 60–63 % при массе сухого вещества 0,057–0,059 г/см³. В кустарничково-лишайниковом микроландшафте, в слое от поверхности до глубины 20 см, содержание капиллярной влаги составляет 37,1–48,8 % при плотности сухого вещества 0,040–0,079 г/см³. В слое 25–40 см ее содержание несколько уменьшается, так как здесь практически всегда располагается более плотный торф. В среднем содержание капиллярной влаги в слоях ниже 30 см не выходит за пределы более 20–30 % в зависимости от вида и степени разложения торфа. Распределение капиллярной влаги в деятельном слое осоково-пушицевого микроландшафта Краснощельского болота приведено на рис. 1. В слое 10–20 см содержание капиллярной влаги близко к 50 % от объема образца. С глубиной содержание ее убывает до 20 % при увеличении содержания сухого вещества торфа до 0,210 г/см³.

Капиллярная влагоемкость слоев торфа, в зависимости от положения их над уровнем болотных вод (рис. 2), значительно отличается. Это обусловлено тем, что распределение пор по размерам далеко не равномерное. Распределение капиллярной влагоемкости показывает, что с понижением уровня болотных вод в каждом элементарном слое количество капиллярной влаги уменьшается. Изменение формы кривых объясняется изменением пористости, при котором происходит как увеличение, так и уменьшение крупных пор за счет уменьшения или увеличения более мелких. С увеличением объемной массы сухого вещества содержание капиллярной влаги уменьшается, а остаточной — увеличивается.

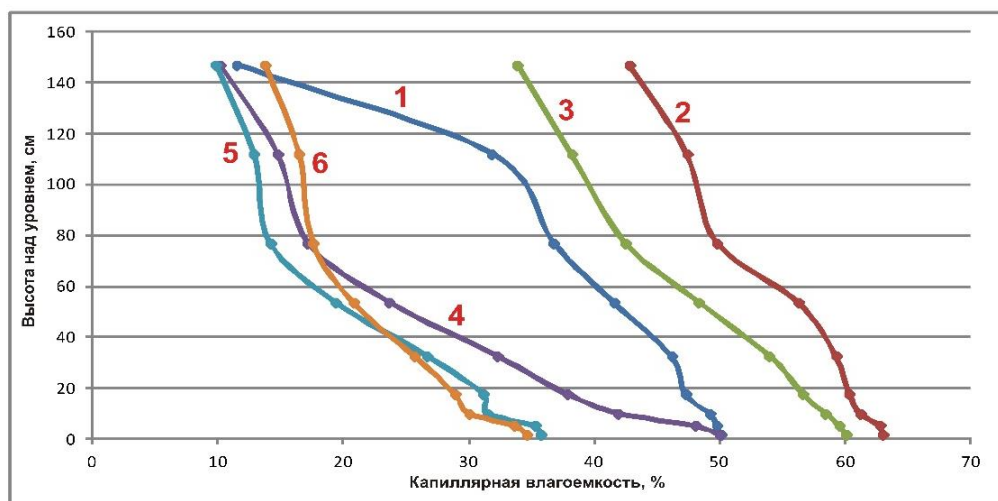


Рис. 1. Распределение капиллярной влаги в отдельных слоях осоково-пушицевого микроландшафта Краснощельского болота: слой 5–10 см (1); 10–15 см (2); 15–20 см (3); 20–25 см (4); 25–30 см (5); 30–35 см (6)
 Fig. 1. Capillary water distribution in specific layers of a sedge-cotton-grass micro landscape in the Krasnoschelskoye bog: 5–10 cm (1); 10–15 cm (2); 15–20 cm (3); 20–25 cm (4); 25–30 cm (5); 30–35 cm (6)

Типичное для мезоолиготрофных болот распределение содержания этих двух видов влаги по глубине деятельного слоя приведено на рис. 2. Взаимозависимость между этими двумя характеристиками деятельного слоя осоково-пушицевого микроландшафта Краснощельского болота приведена на рис. 3 и описывается уравнением:

$$W_0 = 72,35 - 0,860 W_K,$$

где W_0 и W_K — остаточная и капиллярная влага, % от объема. Коэффициент корреляции этой зависимости — 0,936. В слое 10–20 см содержание капиллярной влаги близко к 50 % от объема образца. С глубиной ее содержание убывает до 20 %, при увеличении содержания сухого вещества торфа — до 0,210 г/см³.

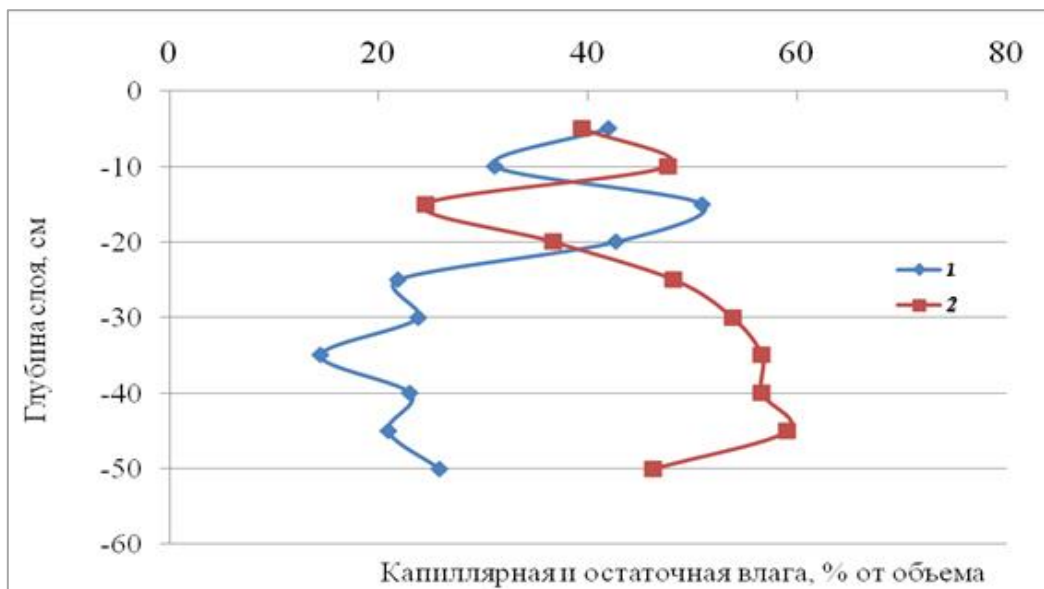


Рис. 2. Распределение капиллярной (1) и остаточной влаги (2) по глубине деятельного слоя осоково-пушицевого микроландшафта Краснощельского болота

Fig. 2. Distribution of capillary (1) and residual water (2) across the active layer of a sedge-cotton-grass micro landscape in the Krasnoschelskoye bog

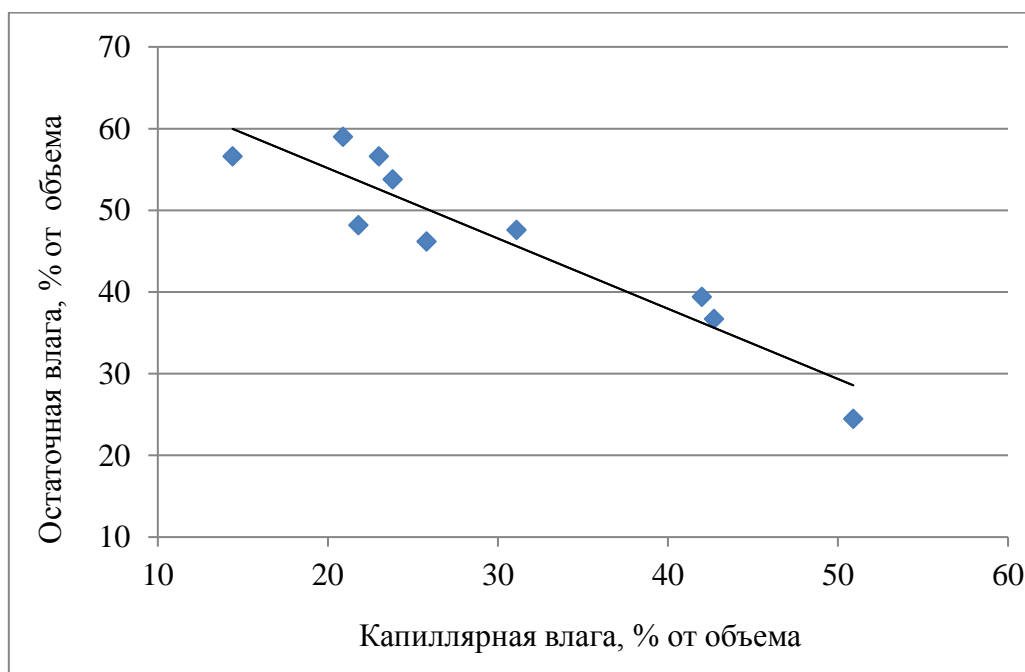


Рис. 3. Взаимозависимость остаточной и капиллярной влаги в деятельном слое осоково-пушицевого микроландшафта Краснощельского болота

Fig. 3. Interdependency between capillary and residual water in the active layer of a sedge-cotton-grass micro landscape in the Krasnoschelskoye bog

Эта же зависимость для гряды грядово-мочажинного комплекса Пулозерского болота имеет вид: $W_0 = 53,55 - 0,592 W_k$, при коэффициенте корреляции — 0,790.

Реакция уровня болотных вод на выпадающие осадки

Попадая на поверхность болота, жидкие атмосферные осадки смачивают пористую структуру деятельного слоя, просачиваются до уровня болотных вод, вызывая его подъем, и далее расходуется на испарение и сток. При уровнях, обуславливающих подъем капиллярной влаги к поверхности болота, потери осадков на смачивания близки к нулю. За короткий период времени (менее 4 ч) влиянием стока и испарения на подъем уровня можно пренебречь. В этом случае практически все осадки принимают участие в подъеме уровня болотных вод.

Подъем уровня болотных вод оценивается коэффициентом водоподъема (η_z), который определяется как отношение величины подъема уровня (ΔZ , мм) к слою выпавших осадков (h , мм), т. е. $\eta_z = \Delta Z/h$. Коэффициент η_z определяет повышение уровня (см) болотных вод при увеличении запаса почвенной влаги на 1 мм за счет выпадения осадков.

Расчет коэффициентов водоподъема производится послойно, таким образом, чтобы каждый слой обладал однородной структурой пористости (содержанием сухого вещества торфа — в нашем случае). Для этого деятельный слой в пределах колебания уровня болотных вод, разбивают

Таблица 5
Table 5

Послойные зависимости уравнения взаимосвязи между подъемом болотных вод и выпавшими осадками. Кустарничково-лишайниковый микроландшафт Пулозерского болота

Dependencies between bog water rise and precipitation sums for particular layers. Subshrub-lichen micro landscape in the Pulozerskoye bog

Глубина заложения слоя, см Layer depth, cm	Уравнение взаимосвязи Dependencies $\Delta Z = f(h)$	Коэффициент корреляции Correlation coefficient
5–10	$\Delta Z = 3,10h + 1,07$	0,903
10–15	$\Delta Z = 4,88h - 1,10$	0,965
15–20	$\Delta Z = 5,10h + 0,22$	0,944
20–25	$\Delta Z = 6,25h - 0,70$	0,969
25–30	$\Delta Z = 6,63h - 1,09$	0,959
30–35	$\Delta Z = 4,12h + 1,72$	0,965
35–40	$\Delta Z = 3,33h + 2,18$	0,985
40–45	$\Delta Z = 6,94h - 0,52$	0,958

на отдельные слои высотой 5 см. В пределах выделенного слоя строят зависимость $\Delta Z = f(h)$, используя весь многолетний ряд наблюдений за реакцией уровня болотных вод на выпадающие осадки. Общим для всех послойных зависимостей $\Delta Z = f(h)$ является прямолинейная взаимосвязь между выпавшими осадками и подъемом уровня (табл. 5) с коэффициентами корреляции не ниже 0,90.

Прямая зависимость пересекает горизонтальную ось (ось осадков) на расстоянии 0,1–0,3 мм от начала ординат. Этот отрезок характеризует расход осадков на смачивание внешней пористости. Ввиду его малости, им в расчетах можно пренебречь. Тангенс угла наклона прямой равен среднему коэффициенту подъема уровня воды в конкретном слое (рис. 4).

По значениям частных коэффициентов строится таблица

изменения коэффициентов подъема уровней по глубине деятельного слоя (табл. 6). Послойные коэффициенты водоподъема растут с глубиной деятельного слоя. В кустарничково-лишайниковом микроландшафте коэффициент η_z в верхних слоях равен 2,08–2,71 до 5,75 и возрастает в нижних до 7,0. В грядово-мочажинном комплексе коэффициент η_z несколько меньший, так как часть комплекса занята мочажинами, которые обладают значительно большей пористостью по сравнению с грядами.

Способность водонасыщенного деятельного слоя торфяной залежи отдавать воду при понижении уровня болотных вод обуславливает процесс водоотдачи. Количественной характеристикой процесса водоотдачи является коэффициент водоотдачи. Коэффициент

водоотдачи любого выделенного слоя есть отношение слоя стекшей воды (обычно в миллиметрах) к величине снижения уровня грунтовой воды (мм). В работе [6] показано, что величины коэффициентов водоподъема η и водоотдачи ξ связаны соотношением $\xi = 1/\eta$.

Таблица 6
Table 6

Коэффициенты водоподъема деятельного слоя микроландшафтов
Пулозерского болотного массива

Water rise coefficient of the active layer of micro landscapes in the Pulozersky wetland

Глубина заложения слоя, см Layer depth, cm	Коэффициент водоподъема / Water rise coefficient			
	последний for layers	суммарный total	последний for layers	суммарный total
	Кустарничково-лишайниковый микроландшафт Subshrub-lichen micro landscape		Грядово-мочажинный комплекс Hummocky-pool complex	
+5–0	–	–	2,93	2,93
0–5	2,08	2,08	4,80	3,86
5–10	2,71	2,39	4,75	4,16
10–15	4,19	2,99	4,05	4,13
15–20	5,19	3,54	3,91	4,09
20–25	5,94	4,02	3,59	4,01
25–30	6,33	4,41	3,48	3,93
30–35	4,47	4,42	3,04	3,82
35–40	3,76	4,33	–	–
40–45	6,77	4,60	–	–
45–50	7,04	4,85	–	–
50–55	5,78	4,93	–	–

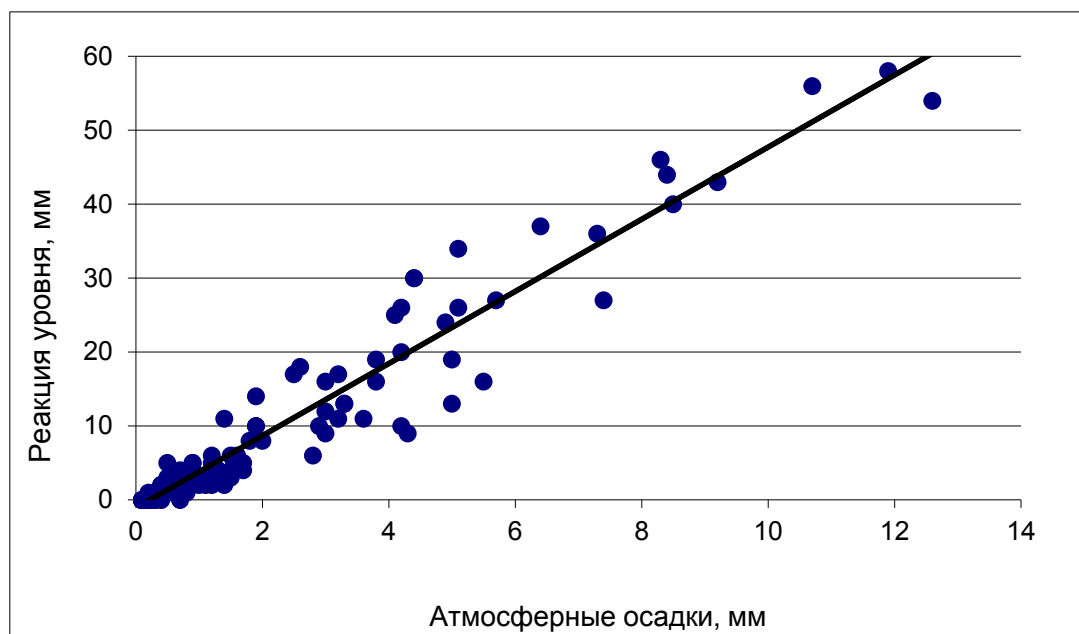


Рис. 4. Реакция уровня болотных вод на выпадающие осадки в слое 10–15 см кустарничково-лишайникового микроландшафта Пулозерского болота

Fig. 4. Precipitation induced change in water level within the 10–15 cm layer in a subshrub-lichen micro landscape in the Pulozerskoye bog

П. К. Воробьев [5] обосновал полевой метод определения послойных значений коэффициента водоотдачи на основе реакции уровня болотных вод на выпадающие осадки, исключая при этом среднюю для конкретного слоя величину зависших осадков. Рассчитанные послойные и суммарные коэффициенты водоотдачи микроландшафтов Пулозерского болота приведены в табл. 7. Анализ этих данных показывает уменьшение суммарных коэффициентов водоотдачи в пределах деятельного слоя от больших значений в верхних слоях (0,34–0,48) до 0,26–0,27 в нижних слоях и последующей их относительной стабилизации за его пределами.

Определение коэффициентов водоотдачи методом реакции уровня болотных вод на выпадающие осадки производится ежегодно в теплый период года. Установлено, что коэффициенты водоотдачи, вычисленные за разные годы наблюдений, накладываются на одну общую зависимость с незначительным отклонением от центра. Это позволяет надежно определять коэффициенты водоотдачи в пределах деятельного слоя.

Таблица 7
Table 7

Коэффициенты водоотдачи деятельного слоя микроландшафтов
Пулозерского болотного массива

Water return coefficients of the active layer in micro landscapes in the Pulozerskoye wetland

Глубина заложения слоя, см Layer depth, cm	Коэффициент водоотдачи / Water return coefficient			
	послойный for layers	суммарный total	послойный for layers	суммарный total
	кустарничково-лишайниковый микроландшафт subshrub-lichen micro landscape		грядово-мочажинный комплекс hummocky-pool complex	
+5–0	–	–	0,34	0,34
0–5	0,48	0,48	0,21	0,28
5–10	0,37	0,42	0,21	0,25
10–15	0,24	0,36	0,25	0,25
15–20	0,19	0,32	0,26	0,25
20–25	0,17	0,29	0,28	0,26
25–30	0,16	0,27	0,29	0,23
30–35	0,22	0,26	0,33	0,27
35–40	0,34	0,27	–	–
40–45	0,15	0,26	–	–
45–50	0,14	0,25	–	–
50–55	0,17	0,24	–	–

Водопроницаемость деятельного слоя болот

Перемещение водной массы на болотном массиве обусловлено характеристиками его водопроницаемости. Последняя полностью зависит от структуры пористого пространства деятельного слоя. Коэффициент водопроницаемости — величина переменная и при полном заполнении пор водой равен коэффициенту фильтрации. Определение коэффициентов фильтрации производится на монолитах торфа с ненарушенной структурой, которые устанавливаются в фильтрационные лотки [8]. Ввиду крайне малых скоростей стекания воды, турбулизация потока на поверхности монолита в лотках не наблюдается и сток можно рассчитывать по уравнению Дарси [3]. Поэтому опыты по его определению производятся при уклонах поверхности монолита максимально приближенных к уклонам поверхности болота.

На болоте с ненарушенной поверхностью микрорельефа отбор монолитов с целью определений коэффициентов фильтрации производился таким образом, чтобы была охвачена вся зона развития микрорельефа. Поверхность монолита определяется относительно расчетной

поверхности микроландшафта и относительно ее рассчитывается осредненный коэффициент фильтрации. Результаты определений коэффициента фильтрации по данным опытов на пяти монолитах в кустарничково-лишайниковом микроландшафте приведены в табл. 8.

Таблица 8
Table 8

Распределение коэффициентов фильтрации (см/с) по глубине деятельного слоя кустарничково-лишайникового микроландшафта Пулозерского болота
Filtration coefficients (cm/sec) distribution with the depth of the active layer in a subshrub-lichen micro landscape in the Pulozerskoye bog

Уровень от расчетной поверхности, см Level above the reference surface, cm	Номера монолитов Monolith number					Среднее значение, см/с Average values, cm/sec
	1	2	3	4	5	
-1,3	–	–	–	90,0	8,60	49,3
-2,8	–	–	–	16,6	4,56	45,0
-4,7	–	153,0	–	9,52	2,64	55,0
-6,2	78,30	39,80	60,0	8,00	2,22	37,6
-8,2	33,60	12,00	46,0	7,00	1,64	20,0
-10,2	13,40	3,460	25,9	5,30	0,929	9,76
-13,2	4,840	1,310	8,00	4,30	0,527	3,79
-17,2	3,120	0,948	4,05	–	3,00	2,78
-20,2	2,280	0,800	1,50	1,50	0,316	1,28
-23,2	1,690	0,688	1,10	1,10	0,082	0,93
-27,2	0,870	0,455	–	–	0,042	0,46
-33,2	0,318	0,250	0,302	–	–	0,29
-39,2	0,128	–	0,276	–	–	0,20
-43,2	0,094	0,077	–	–	–	0,09
-45,2	0,080	0,066	0,095	–	–	0,09
-47,2	0,060	–	–	–	–	0,06

По результатам проведенных опытов установлено, что на каждом из монолитов наблюдается общая закономерность: коэффициент фильтрации в деятельном слое микроландшафтов мезоолиготрофных болот очень быстро уменьшается с глубиной от десятков и даже сотен сантиметров в секунду в верхних (1–2 см) слоях до тысячных долей сантиметров в секунду на нижней границе деятельного слоя.

В инертном горизонте коэффициент фильтрации торфа зависит от степени дисперсности твердой фазы торфа. С ростом мельчайших фракций в торфе, т. е. с увеличением степени разложения и соответственно с увеличением поверхности раздела жидкой и твердой фазы, коэффициент фильтрации уменьшается до крайне малых величин. Так, олиготрофный, слаборазложившийся торф (степень разложения 35–45 %) имеет коэффициент фильтрации, изменяющийся в пределах 0,00025–0,001 см/с. Анализ табл. 8 показывает, что также наблюдается достаточно большая пространственная (по горизонтали) изменчивость коэффициентов фильтрации в пределах зоны развития микрорельефа конкретного микроландшафта. Если в верхних горизонтах этой зоны (уровень — 1,3...–10,2 см) различия могут достигать в десятки раз, в более низких горизонтах они уменьшаются и на границе деятельного слоя и инертного горизонта залежи становятся незначительными.

Анализ осредненных значений послойных коэффициентов фильтрации (табл. 9) основных микроландшафтов Пулозерского болота однозначно показывает, что все они в пределах деятельного слоя обладают высокой водопропускной способностью,

обеспечивающей сток с болота в естественных условиях его существования. Во всех микроландшафтах значение коэффициента фильтрации зависит исключительно от радиуса наиболее крупных пор в деятельном слое. Верхним слоям с радиусом пор от $2,37 \cdot 10^{-4}$ до $127 \cdot 10^{-4}$ см соответствуют коэффициенты фильтрации, измеряемые десятками сантиметров в секунду. При радиусе пор от $19 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ см и естественных уклонах болота влага в этих порах слабо подвижна.

Таблица 9
Table 9

Осредненные значения послойных коэффициентов фильтрации (КФ)
деятельного слоя микроландшафтов Пулозерского болота
Average filtration coefficients (FC) for the active layer horizons
in micro landscapes in the Pulozerskoye bog

Тип микроландшафта / Micro landscape					
Сфагново-кустарничковый Sphagnum-subshrub		Грядово-мочажинный Ridge-pool		Кустарничково-лишайниковый Subshrub-lichen	
Уровень, см Level, cm	КФ, см/с FC, cm/sec	Уровень, см Level, cm	КФ, см/с FC, cm/sec	Уровень, см Level, cm	КФ, см/с FC, cm/sec
13,5	136,0	-10,8	92,4	-5,7	56,3
13,0	105,0	-11,8	53,4	-6,7	34,1
12,0	90,0	-12,8	36,1	-7,7	27,6
10,0	72,0	-14,8	11,6	-8,7	13,5
8,2	57,4	-16,8	6,11	-9,7	8,80
6,4	46,4	-18,8	4,02	-10,7	6,40
4,9	40,0	-21,8	2,54	-12,2	4,94
3,4	17,3	-24,8	1,87	-14,2	2,34
0,4	2,95	-26,8	1,22	-16,2	2,01
-1,6	1,480	-29,0	0,980	-18,2	1,55
-3,6	0,840	-31,0	0,800	-20,2	1,28
-5,6	0,520	-36,4	0,772	-22,2	1,31
-9,6	0,150	-38,4	0,411	-25,5	0,83
-13,6	0,096	-40,4	0,258	-29,2	0,43
-15,6	0,046	-42,4	0,182	-33,2	0,29
-16,6	0,038	-43,4	0,174	-43,2	0,09
-20,0	0,010	-	-	-47,2	0,06

Примечание. Уровень приведен от поверхности повышений микроландшафта.

Note. Level is above the surface of micro landscape elevations.

Выводы

Поверхность деятельного слоя мезоолиготрофных болот Кольского п-ова представляет собой живой растительный покров, состоящий из головок и стеблей мха, корневой системы растений и обладает высокой пористостью, обусловленной чрезвычайно низкой плотностью сухого вещества. Плотность его в верхнем горизонте деятельного слоя (от 0–25...30 см) не превосходит $0,100 \text{ г/см}^3$. Она увеличивается от поверхности по глубине, и на нижних горизонтах слоя увеличение плотности несколько замедляется до $0,250 \text{ г/см}^3$. Доля объема сухого вещества во всех микроландшафтах возрастает от поверхности по глубине залежи в пределах от 1,47 до 4,50 %.

Влага, удерживаемая в торфе над уровнем грунтовых вод, полностью зависит от структуры пористости торфа. Наибольшая высота капиллярного поднятия воды в неоднородной пористой среде определяется радиусом наиболее тонких пор. Показано, что пористое пространство деятельного слоя составляют поры с радиусом от $2,0 \cdot 10^{-4}$ до $120,0 \cdot 10^{-4}$ см. Установлено, что с увеличением объемной массы сухого вещества содержание капиллярной влаги уменьшается, а остаточной — увеличивается. При отрицательном гидростатическом давлении — до 162 см водяного столба — наибольшее количество капиллярной влаги содержат слои с наименьшей объемной массой сухого вещества торфа. В грядово-мочажинном комплексе (гряда сфагново-кустарничковая) наибольшее количество капиллярной влаги — до 60–63 % (при массе сухого вещества $0,057–0,059$ г/см³) содержится в слое 10–20 см. В кустарничково-лишайниковом микроландшафте — в слое от поверхности до глубины 20 см — содержание капиллярной влаги составляет 37,1–48,8 %, при плотности сухого вещества $0,040–0,079$ г/см³. В слое 25–40 см ее содержание уменьшается, так как здесь располагается более плотный торф.

Подъем уровня болотных вод оценивается коэффициентом водоподъема. Послойные коэффициенты водоподъема увеличиваются с глубиной деятельного слоя. В кустарничково-лишайниковом микроландшафте коэффициент водоподъема в верхних слоях равен 2,08–2,71 до 5,75 и возрастает в нижних — до 7,0. В грядово-мочажинном комплексе этот коэффициент несколько меньший, так как часть комплекса занята мочажинами, которые обладают значительно меньшей пористостью по сравнению с грядами.

Способность водонасыщенного деятельного слоя торфяной залежи отдавать воду при понижении уровня болотных вод обуславливает процесс водоотдачи, количественной характеристикой которого является коэффициент водоотдачи. Послойные и суммарные коэффициенты водоотдачи деятельного слоя уменьшаются от больших значений — 0,34–0,48 в верхних горизонтах до 0,26–0,27 в нижних и отличаются последующей их относительной стабилизацией за его пределами.

Водопроницаемость деятельного слоя полностью зависит от структуры его пористого пространства и, при полном заполнении пор водой, определяется коэффициентом фильтрации. Коэффициент фильтрации в мезоолиготрофных болотах очень быстро уменьшается с глубиной от десятков и даже сотен сантиметров в секунду в верхних (1–2 см) слоях до тысячных долей сантиметров в секунду на нижней границе деятельного слоя. Во всех микроландшафтах предельное значение коэффициента фильтрации исключительно зависит от радиуса наиболее крупных пор. Верхним слоям с радиусом пор от $2,37 \cdot 10^{-4}$ до $127 \cdot 10^{-4}$ см соответствуют коэффициенты фильтрации, измеряемые десятками сантиметров в секунду. При радиусе пор от $19 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ см и естественных уклонах болота влага в них слабо подвижна.

Наблюдается большая пространственная (по горизонтали) изменчивость коэффициентов фильтрации в пределах зоны развития микрорельефа конкретного микроландшафта. В верхних горизонтах этой зоны различия могут достигать в десятки раз, в более низких горизонтах они существенно уменьшаются и на границе деятельного слоя и инертного горизонта залежи становятся незначительными.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Евзеров В. Я.* Неиспользованные сырьевые ресурсы Мурманской области // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 2 (10). С. 38–52.
2. *Дубах А. Д.* Гидрология болот // Труды НИУ ГУГМС. Серия IV. Гидрология суши. 1944. Вып. 10. 228 с.
3. *Иванов К. Е.* Основы гидрологии болот лесной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 500 с.
4. *Романов В. В.* Гидрофизика болот. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 359 с.
5. *Воробьев П. К.* Исследование физических характеристик деятельного горизонта неосушенных болот // Труды ГГИ. 1965. Вып. 126. С. 65–95.
6. *Лундин К. П.* Водные свойства торфяной залежи. Минск: Урожай, 1964. 212 с.
7. *Калюжный И. Л.* Гидрохимический режим и химический состав вод мезоолиготрофных болотных массивов Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 114–125.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам // Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Вып. 8. 296 с.

Сведения об авторе

Калюжный Игорь Леонидович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией гидрофизики Государственного гидрологического института

E-mail: hfl@mail.ru

Author Affiliation

Igor L. Kalyuzhny — PhD (Engineering), Head of Laboratory of Hydrophysics, State Hydrological Institute

E-mail: hfl@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Калюжный, И. Л. Гидрофизические свойства деятельного слоя болот Кольского полуострова / *И. Л. Калюжный* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 1 (11). — С. 14–29.

Reference

Kalyuzhny Igor L. Hydro-Physical Properties of the Active Layer in Bogs in the Kola Peninsula. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 1 (11), pp. 14–29. (In Russ.).