

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОГО СЛОЯ В БОРОЗДАХ И ГРЕБНЯХ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ

К. А. Глушко, кандидат технических наук, доцент

Н. Н. Шпендик, кандидат географических наук, доцент

*УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь*

Аннотация

Выявлены особенности и отличия формирования водонепроницаемого слоя на гребне и в борозде. Установлено, что микрорельеф существенно влияет на глубину водонепроницаемого слоя. Произведена оценка возможности его возникновения в условиях потепления климата. Даны рекомендации по предотвращению возникновения водонепроницаемого слоя.

Ключевые слова: критическая влажность, критическая температура, термический режим, снежный покров, инфильтрация. Особенности формирования водонепроницаемого слоя в бороздах и гребнях при промерзании торфяных почв

Annotation

K. A. Glushko, N. N. Shpendic

FEATURES OF WATERPROOF LAYER FORMATION IN FURROWS AND RIDGES FOR PEAT SOIL FREEZING

The features and differences of the formation of a waterproof layer on pens and in the furrow are revealed. It is established that the microrelief significantly affects the depth of the waterproof layer. An assessment was made of the possibility of its occurrence in a warming climate. Recommendations are given to prevent the formation of a waterproof layer

Key words: critical humidity, critical temperature, thermal regime, snow cover, infiltration.

Введение

Мелиорация переувлажненных земель направлена на сброс избытка влаги и улучшения воздушного режима почв. Технически это реализуется посредством устройства дренажных систем и открытой проводящей сети. Объективными критериями работы этих устройств в период прохождения паводков являются термический режим почв в зимний период, микрорельеф, занесенность каналов снегом. Наблюдениями установлено, что, несмотря на суровость зим, уровни воды в каналах и наблюдательных

колодцах начинают активно расти с началом снеготаяния и могут выходить из бровок каналов затапливая значительные площади сельскохозяйственных угодий. Занесенность снегом каналов препятствует отводу как поверхностного, так и дренажного стока, что в совокупности приводит к вымочкам сельскохозяйственных культур [1, 2]. Целью наших исследований является определение эмпирической зависимости мощности водонепроницаемого слоя в современных климатических условиях.

Основная часть

Термический режим почв определяется накопленным запасом холода за зимний период, осенней влажностью почв, высотой снежного покрова и реализуется в виде глубины промерзания. Известно, что при определенном соотношении влажности мерзлого слоя почвы и температуры, мерзлая почва в процессе инфильтрации талой воды становится водонепроницаемой [3]. Этот водоне-

проницаемый слой на основании многочисленных наблюдений может образоваться осенью до установления снежного покрова, во время зимних оттепелей и в период весеннего снеготаяния. Последнее возможно при большом запасе холода в почве. Ход весеннего половодья определяется не только мощностью водонепроницаемого слоя, но и продолжительностью его оттаивания.

Водонепроницаемый слой чаще всего образуется на тяжелых мало водонепроницаемых почвах: суглинки, глины [3], что характерно для северных областей Беларуси. Данные почвы относятся к тонкодисперсным и содержат много связанной влаги, участвующей в фазовых превращениях. В грубодисперсных грунтах процесс совершенно обратный. Возможность образования в них водонепроницаемого слоя мала. Для этого требуется, чтобы не менее 87-95% пор были заполнены влагой.

Какие-либо сведения о формировании водонепроницаемого слоя на осушенных торфяниках отсутствуют. В материалах полевых исследований, проводившихся на Ивацевиче-

ской опытной станции, указывается на частое (8 из 10 лет) формирование поверхностного стока, но вместе с тем указывается на параллельный быстрый подъем уровня грунтовых вод [2]. К сожалению, учет влияния микро-рельефа на формирование стока как поверхностного, так и грунтового авторами не проводился и эти процессы не освещены.

В тоже время известно, что микро-рельеф почвы, представленный западинами, бороздами, локальными участками почвы с нарушенной естественной структурой (кратовины, остатки пожнивных культур и др.) изменяют общий фон температурного поля почвы и влажности, способствуя повышению инфильтрации талых вод [4].

Физические основы формирования водонепроницаемого слоя на торфяниках

Уплотнение верхнего слоя почвы механизмами и его естественная минерализация, приводят к увеличению плотности почвы с одновременным уменьшением пористости. Чем выше плотность, тем при меньшем значении влажности образуется водонепроницаемый слой.

Структура почвенного профиля водосбора р. Бобрин, где проводились исследования [1], такова, что плотность почвы от поверхности до подошвы пахотного слоя возрастает в среднем от 0,2 до 0,27 г/см³ при последующем резком уменьшении плотности до 0,15–0,17 г/см³ (таблица 1).

Таблица 1 – Статистические характеристики плотности почвы по профилям в пределах водосбора

Тип почвы	Глубина отбора образца, см	Средняя плотность, г/см ³	Коэффициент вариации	Среднее квадратичное отклонение	Точность опыта, %
Торф осоко-тростниковый	0–10	0,22	0,159	0,03	1,9
	10–20	0,24	0,156	0,03	1,87
	20–30	0,26	0,155	0,03	1,62
	30–40	0,19	0,130	0,02	1,70

Для подстилающего слоя характерна более низкая интенсивность нарастания мерзлоты из-за нарастающего температурного сопротивления верхней мерзлой толщи, а это значит нарастание дополнительного объема влаги за счет ее миграции. Это является косвенной предпосылкой к формированию водонепроницаемого слоя в подпахотном слое.

В бороздах верхний слой вскрыт. Плотность почвы незначительно колеблется около средней величины 0,17 г/см³ до подстилающего песка.

Анализ влажности на гребне (пространстве между бороздами) и борозде можно провести по данным, приведенным в таблице 2 (при исследованиях отбор образцов производился по 6 точкам). Влажность определялась термостатно-весовым способом. Влажность по слоям в борозде, как следует из таблицы 2, как правило, наиболее высокая у поверхности, в то время как влажность на гребне наиболее высокая у подошвы пахотного слоя. Поэтому характер формирования водонепроницаемого слоя, в случае образования его в борозде иной, чем на гребне.

Таблица 2 – Средний запас почвенной влаги на гребне и в борозде

Слой	Годы					
	1985–1986		1986–1987		1987–1988	
	осенняя	весенняя	осенняя	весенняя	осенняя	весенняя
1	2	3	4	5	6	7
На гребне						
0–10	54,47	68,14	52,46	64,39	56,11	66,80
10–20	60,48	68,84	50,74	65,95	52,18	63,53
20–30	62,87	71,47	60,46	64,72	55,47	62,17
30–40	66,74	66,12	63,02	69,04	56,76	60,12
40–50	73,68	66,46	63,75	70,69	61,95	62,37
50–60	69,16	74,87	73,87	69,58	67,14	66,52
60–70	65,23	72,55	71,91	71,45	74,05	67,11
70–80	59,45	44,42	66,95	65,03	53,00	55,42
80–90	35,03	35,73	47,30	35,43	35,45	38,60
90–100	35,13	35,09	30,98	32,23	32,61	28,06
В борозде						
0–10	–	–	–	–	–	–
10–20	–	–	–	–	–	–
20–30	–	–	–	–	–	–
30–40	75,15	77,34	63,34	75,37	64,37	74,23
40–50	68,10	72,45	72,66	71,46	70,16	72,03
50–60	66,38	62,40	72,17	68,92	70,34	71,48
60–70	63,28	60,11	69,60	65,90	64,26	59,34
70–80	57,15	58,60	66,47	66,34	52,11	51,26
80–90	36,14	34,863	48,36	39,80	36,24	35,22
90–100	36,10	36,09	31,71	34,11	39,60	34,74

Тепловой режим почв в борозде существенно отличается от гребня. На этот признак указывал А. У. Рудой для минеральных почв [5]. Косвенным доказательством может служить глубина промерзания почвы на гребне и в борозде, измеряемые соответственно от поверхности почвы гребня и борозды. Фрагменты общей выборки полевых измерений, выполненных на Полесской опытно-мелиоративной, станции приведены в таблице 3.

Из них следует, что в осенний период, когда не сформировался устойчивый снежный покров или он еще отсутствует, глубины промерзания на гребне и в борозде сопоставимы по своей величине. В предвесенний период характер распределения глубин кардинально меняется – глубина промерзания на гребне в 1,5–2,0 раза больше глубины промерзания в борозде. Сказывается утепляющая роль снега.

Второй отличительной особенностью промерзания почвы является то, что поля промерзания, построенные в относительных

единицах, в виде отношения текущей глубины промерзания к максимальной глубине, являются устойчивыми во времени характеристиками, так как они повторяются из года в год и накладываются друг на друга с искажениями в пределах точности измерений.

Температура почвы в зимний период на участке измерялась на глубине 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 и 160 см вытяжными термометрами. Это позволило найти среднюю температуру мерзлого слоя почвы. Температура почвы с 10-и сантиметровой градацией определялась по формуле Ф.Н. Шехтера [6].

$$t_z = \frac{(h_m - h_z)t_{cp}}{h_m + \lambda_m(h_c / \lambda_c)}, \quad (1)$$

где h_m – глубина промерзания почвы;
 h_z – горизонт определения температуры мерзлого слоя почвы;
 t_{cp} – средняя температура почвы;
 λ_m – коэффициент теплопроводности почвы;
 λ_c – коэффициент теплопроводности снега;
 h_c – мощность снежного покрова почвы.

Таблица 3 – Результаты измерения глубины промерзания в борозде и на гребне за годы исследований, см

23.03.1986		10.12.1986		10.03.1987		11.12.1987		17.03.1988	
борозда	гребень								
17,5	32,0	10,5	10,8	16,2	26,8	9,0	11,0	23,0	23,5
18,4	31,8	10,4	10,6	15,9	27,5	9,0	10,0	25,0	26,0
19,5	31,2	10,6	10,4	16,4	27,5	9,0	8,0	24,0	26,0
20,0	32,0	10,8	11,0	16,0	28,0	8,0	8,0	21,5	25,5
21,0	33,0	11,4	11,2	17,5	32,0	7,0	7,0	24,5	27,0
21,0	33,0	11,4	9,5	17,0	27,0	9,0	7,0	24,8	27,0
20,0	31,5	11,4	9,8	18,1	28,5	8,5	9,5	23,0	28,0
19,5	31,5	11,0	11,0	16,5	29,0	8,5	10,0	25,5	29,0
18,0	32,0	11,5	11,6	16,0	29,0	9,0	8,5	25,5	27,0
17,0	34,0	11,0	11,6	16,0	31,0	7,0	8,5	21,5	26,5

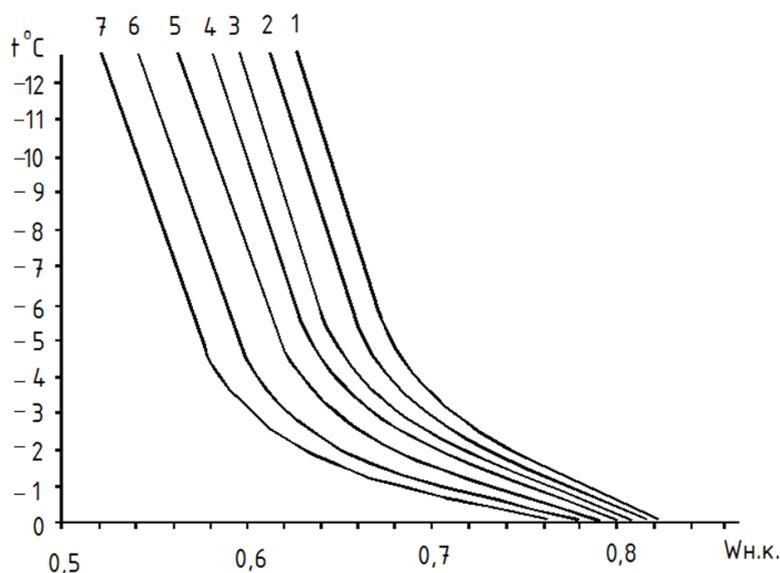


Рисунок 1 – Зависимость критической температуры от начальной влажности почвы и ее плотности. Плотность, г/см³: 1) 0,16; 2) 0,18; 3) 0,20; 4) 0,22; 5) 0,24; 6) 0,26; 7) 0,28

Возможность образования водонепроницаемого слоя почвы на гребне и борозде определялась по известной методике [3] путем сопоставления температуры почвы и критической температуры для заданной влажности и плотности. Начальная критическая влажность была определена по формуле (2), для каждого из заданных значений критической температуры и плотности почвы. По результатам расчетов была построена номограмма, представленная на рисунке 1.

$$W_{нк} = \frac{(L + c_b \cdot T_n) [P \cdot \rho_l + \rho \cdot W_{нз}(0) \cdot (1 - \rho_l / \rho_b)] + [c_n + W_{нз}(T_k) \cdot (c_b - c_l)] \rho \cdot T_k - L \cdot \rho [W_{нз}(0) - W_{нз}(T_k)]}{\rho(L + c_b \cdot T_n - c_n T_k)}, \quad (2)$$

где \$W_{нк}\$ – начальная объемная влажность в долях единицы;

- \$L\$ – удельная теплота плавления льда;
- \$c_b, c_n, c_l\$ – теплоемкость воды, почвы, льда;
- \$W_{нз}(0), W_{нз}(T_k)\$ – количество незамерзшей воды при температуре 0 °C и \$T_k\$ в г/г сухой почвы;
- \$\rho_b, \rho_n, \rho_l\$ – плотность, почвы, льда и воды;
- \$P\$ – общая пористость почвы;
- \$T_k\$ – критическая температура почвы;
- \$T_n\$ – начальная температура просачивающейся воды.

В соответствии с вышеизложенной методикой и данных полевых измерений графическим способом была определена мощность водонепроницаемого слоя на гребне и в борозде, которая может быть частью глубины промерзания или равна ей, и определяется точками пересечения изотерм наблюдаемой и критических температур. Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные характеристики водонепроницаемого слоя по годам исследований

№ точки	Глубина промерзания, см	Мощность водонепроницаемого слоя, см	Глубина залегания водонепроницаемого слоя, см	Средняя объемная влажность, %	Средняя температура почвы, см
1	2	3	4	5	6
Гребень, 4 марта 1986 г.					
1	30,0	10,0	10,0	60,52	-1,0
2	34,0	12,0	4,0	73,11	-1,1
3	33,0	13,0	0,0	72,10	-1,7
4	33,0	11,0	4,0	72,30	-1,3
5	36,0	12,0	5,0	70,53	-1,2
6	35,0	13,0	6,0	68,50	-1,5
05 марта 1987 г.					
1	23,0	9,0	3,0	66,70	-2,5
2	29,0	10,80	0,0	68,50	-4,4
3	33,0	17,0	0,0	71,50	-4,3
4	258,0	14,	0,0	72,30	-3,5
5	26,0	16,5	0,0	72,15	-36,9
6	30,0	14	2,0	68,93	-3,5
15 марта 1988г.					
1	26,0	7,0	5	65,50	-3,3
1	26,0	0,0	-	-	-
3	22,0	0,0	-	-	-
4	28,0	0,0	-	-	-
5	26,0	0,0	-	-	-
6	26,0	0,0	-	-	-
Борозда , 04 марта 1986г.					
1	17,0	0,0	-	-	-
2	19,0	0,0	-	-	-
3	19,0	0,0	-	-	-
4	18,0	2,0	0,0	77,22	-0,8
5	19,0	3,0	0,0	79,0	-0,8
6	19,0	0,0	-	-	-
03 марта 1987г.					
1	14,0	0,0	-	-	-
2	12,5	2,0	0,0	79,00	-1,2
3	16,0	0,0	-	-	-
4	13,0	3,5	0,0	74,58	-1,3
5	13,5	2,0	0,0	79,00	-1,2
6	16,0	0,0	-	-	-3,8
15 марта 1988г.					
1	20,0	7,0	0,0	74,15	-3,8
2	19,0	-	-	-	-
3	16,0	-	-	-	-
4	21,0	-	-	-	-
5	17,0	-	-	-	-
6	19,0	-	-+	-	-

Динамичная и контрастная зима 1986–1987 года с продолжительной девятидневной оттепелью способствовала формированию водонепроницаемого слоя преимущественно у поверхности почвы. Мощность слоя колебалась от 13 до 19 см. Образовался водонепроницаемый слой на всех точках наблюдения без исключения.

Год 1987–1988 был гораздо теплее предшествующих лет и явился предшественником общего потепления климата. Бесснежная зима способствовала более глубокому промерзанию почвы. Запас холода, оцениваемый по температуре почвы, был не ниже предшествующих лет. Это особенно характерно для предвесеннего состояния почвы. Это кратковременное наступление холода не обеспечило значительного влагонакопления в зоне промерзшего слоя почвы. В то же время длительные оттепели при положительной температуре осадков, приносили дополнительное количество тепла в мерзлый слой. Указанные факторы не способствовали сколь значительному перераспределению и накоплению влаги в мерзлом слое почвы. Водонепроницаемый слой образовался только в одной из шести точек наблюдения, где была локально повышена плотность почвы.

Как следует из таблицы, водонепроницаемый слой может формироваться в предпаводковый период на гребне в условиях суровых зим. Анализируя все варианты возникновения водонепроницаемого слоя на гребне, необходимо отметить, что его формирование происходило при влажности почвы не ниже $0,77W$ н.в и при температуре почвы от -1 °С и ниже. Особенностью формирования водонепроницаемого слоя в бороздах является то, что в них формируется в течение осенне-зимнего периода микроклимат отличный от гребня. Сказывается удвоенная и выше мощность снега в бороздах по отношению к гребню.

Из анализа таблицы 4 следует, что водонепроницаемый слой в бороздах в снежную зиму 1986–1987 г.г. формировался при крайне незначительной мощности от 2 до 3 см, при влажности этого слоя не менее $0,95-0,77W$ н.в. и температуре от нуля и

ниже. Бесснежная зима 1987–1988 годов не способствовала формированию водонепроницаемого слоя. При низкой влажности верхнего слоя почвы температура его была выше критической. Однако в эту зиму, в отличие от предыдущих, в наиболее пониженных участках борозд сформировалась корка льда толщиной 1,5–2,0 см.

Экспериментальная обработка полевых измерений (см. табл. 4) позволила получить эмпирическую зависимость мощности водонепроницаемого слоя от определяющих факторов

$$h_{в.с} = 0,125 \frac{\sum T \cdot W}{h_{сн}^2 + 1}, \quad (3)$$

где $\sum T$ – сумма отрицательных температур за зимний период; 0 °С;

W – объемная влажность почвы, %;

$h_{сн}$ – мощность снежного покрова на дату начала паводка, см.

Фактическое значение критерия хи-квадрат равно 6,577 меньше его теоретического значения 19,675 при числе степеней свободы $\nu = 11$ и уровне вероятности 95%, что свидетельствует о независимости переменных и достоверности полученной формулы.

Формула дает удовлетворительные результаты для условий при которых возможно образование водонепроницаемого слоя, т.е. влажности почвы не менее 60% и при наличии снежного покрова мощностью более 10,0 см.

Мощность водонепроницаемого слоя и глубина промерзания по данным результатов наблюдений связаны зависимостью, которая может быть использована в практической деятельности.

$$h_{в.с} = 0,4972 h_{пром}, \quad (4)$$

где $h_{пром}$ – глубина промерзания почвы, см; коэффициент корреляции связи 0,75.

По формуле (4) была произведена оценка прогнозной мощности водонепроницаемого слоя на осушенных торфяниках водосбора р. Бобрик для 2010–2018 гг. на месяц март. Результаты расчета приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Прогнозная мощность водонепроницаемого слоя на осушенных торфяниках водосбора р. Бобрин

Годы	2010–2011	2011–2012	2012–2013	2013–2014	2014–2015	2015–2016	2016–2017	2017–2018
Мощность водонепроницаемого слоя, см	9,5	6,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0

Зимы 2013–2017 годов характеризовались тем, что снежный покров сходил к середине концу февраля и на начало – середину марта почва была уже талая, хотя в течение декабря–февраля имелся устойчивый снежный покров мощностью 10–25 см, а глубина промерзания почвы достигала 22 см. Зимы 2010–2013, 2017–2018 годов характеризовались устойчивым снежным покровом глубиной 13–19 см, хотя продолжительные оттепели в середине зимы приводили к существенному снижению глубины снега и повышению влажности верхнего мерзлого слоя до состояния полного насыщения. Глубина промерзания почвы составляла 21–29 см. Глубины снега обеспечивали возможность проведения снежной мелиорации, нацеленной на предупреждение формирования водонепроницаемого слоя или разрушение существующего используя законы распределения тепла в борозде. Для этого рекомендуется в январе-феврале для Белорусского

Полесья производить валкование снега снегопахами-валкователями. В практике такие методы избирательного формирования глубины промерзания известны и применяются [7]. Технически это представляет собой валкование снега в виде параллельно чередующихся через определенное расстояние полос.

Для повышения эффективности этого процесса рекомендуется:

- в период устойчивого формирования мерзлого слоя почвы произвести площадное измерение глубины промерзания механическим или инструментальным способом;
- составить карту распределения глубин промерзания в относительных единицах;
- вынести трассы полей с минимальными глубинами промерзания в относительных единицах в натуру;
- произвести валкование снега по обозначенным трассам бульдозерами, колесными тракторами с навесным оборудованием.

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) микрорельеф почвы оказывает существенное влияние на формирование пространственной пестроты водонепроницаемого слоя. При наличии снежного покрова в борозде водонепроницаемый слой не формируется, глубокие западины, борозды являются очагами с повышенной инфильтрационной способностью почв;

2) глубина промерзания почвы в борозде в 1,5–2,0 раза меньше чем на гребне;

3) водонепроницаемый слой при частых и продолжительных оттепелях формируется у поверхности, а при их отсутствии на глубине 10–15 см;

4) характер распределения пространственной неравномерности промерзания почвы сохраняется по годам вне зависимости от климатических условий;

5) предложена техническая схема предотвращения формирования водонепроницаемого слоя на сельскохозяйственных угодьях.

Библиографический список

1. Глушко, К. А. Исследование инфильтрации талых вод на осушаемых торфяниках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / К. А. Глушко ; БелНИИМВХ. – Минск, 1996. – 21 с.

2. Киселева, А. И. Формирование грунтового и поверхностного стока на бассейнах Полесской низменности / А. И. Киселева, И. А. Чернова // Мелиорация и использование торфяников Полесья : сб. науч. статей. – Минск, 1975. – С. 9–16.
3. Калюжный, И. Л. Гидрофизические исследования при мелиорации переувлажненных земель / И. Л. Калюжный, К. К. Павлова, С. А. Лавров. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – 260 с.
4. Глушко, К. А. Полевые исследования гидротермического режима инфильтрации талых вод и аномальных процессов обуславливающих ее // Вестник БрГТУ. – 2015. – № 2 : Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика, экология. – С. 8–11.
5. Рудой, А. У. Промерзание и оттаивание дренированных дерново-подзолистых почв тяжелого механического состава / А. У. Рудой // Мелиорация переувлажненных земель. – Минск : Ураджай, 1976. – Т. XXIV. – С. 123–129.
6. Шехтер, Ф. Н. Расчет глубины промерзания почвы и температуры мерзлой почвы / Ф. Н. Шехтер // Труды ин-та ГГО. – Л., 1958. – Вып. 22. – С. 12–17.
7. Шульгин, А. М. Снежная мелиорация и климат почвы / А. М. Шульгин. – Л. : Гидрометеиздат, 1986. – 64 с.

Поступила 11.03.2020