

УДК 502/504: 631.6

Д. А. МАНУКЬЯН

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМ ДВОЙНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА НА ТОРФЯНИКАХ

Рассмотрен уникальный характер жаркого лета 2010 года, подтвержденный интегральными показателями данного природного явления, а именно: суммой дневных летних температур и суммой дневных температур за самый жаркий пятидесятидневный период. Отмечен катастрофический уровень экологических последствий, связанных с пожарами и «смогом», вызванным горением торфяников. Предложены методы борьбы с горящими торфяниками, основанные на создании систем двойного регулирования водного режима. Дано гидродинамическое обоснование предлагаемых мероприятий, использующих аналитическое решение дифференциальных уравнений, описывающих одномерную нестационарную фильтрацию в двухслойной среде.

Аномальная жара, горящие торфяники, лесные пожары, «смог», геолого-гидрогеологические условия, система двойного регулирования, водный режим, уровень грунтовых вод, дифференциальное уравнение.

There is considered a unique character of the 2010 hot summer confirmed by integral factors of this natural phenomenon, namely: amount of day-time summer temperatures and amount of day-time temperatures for the hottest 50-day period. The catastrophic level of ecological consequences is marked connected with fires and «smog» as a result of peat swamps burning. There are proposed control methods of burning peat swamps based on creation of double regulation systems of water regime. The hydrodynamic substantiation is given of the proposed measures using the analytical solution of differential equations which describe a one-dimensional non-stationary filtration in a two-layer medium.

Abnormal medium, burning peat swamps, forest fires, «smog», geological – hydrogeological conditions, system of double regulation, water regime, ground water level, differential equation.

Аномальная жара лета 2010 года на территории Центрального региона РФ оказалась уникальной не только по уровню максимальных дневных температур, но и по продолжительности жаркого периода. Известно, что последний продолжался в течение 50 дней – с 22 июня и по 19 августа, когда температура воздуха в Московской области (Егорьевский, Шатурский, Орехово-Зуевский, Луховицкий и другие районы), в Рязанской области превышала 30 °С (за исключением 3-5 дней). В особо жаркие дни отклонение от средне-многолетней нормы для данного периода составляло +8 ... +10 °С, а 28 и 29 июля отклонение достигало +12,5 °С.

Достаточно объективным показателем аномальной жары летом 2010 года может служить сумма максимальных дневных температур за летний период,

которая составила 2561,3 градусов, по Цельсию. Аналогичный показатель за 50 самых жарких летних дней, когда дневная температура устойчиво превышала 30 °С, составил 1859 градусов, по Цельсию. По-видимому, данные показатели не будут превышены в ближайшие десятилетия.

Неизбежными последствиями столь уникальной жары стали лесные пожары и горящие торфяники, разразившиеся в юго-восточной части территории Центрального региона Российской Федерации и ставшие серьезным экологическим бедствием. Следует отметить, что по своим экологическим последствиям возникший при горении торфяников «смог» носил катастрофический характер, так как в дыме содержались десятки ядовитых и канцерогенных веществ, вместе с угарным газом в легкие попадала двуокись азота,

которая блокировала эритроциты. В результате смертность за время аномальной жары увеличилась почти вдвое, умерли более 60 000 (в основном пожилых) людей, уже рождаются и будут рождаться так называемые «дымные» дети, а позже заявит о себе и онкология. Если методы борьбы с лесными пожарами достаточно хорошо отработаны, то методы борьбы с горящими торфяниками, которые предлагаются в настоящее время, с точки зрения автора, либо малоэффективны, либо весьма затратны. Тем более что лесные пожары практически прекращаются с окончанием жаркого периода, а горение торфяников, носящее латентный характер, продолжается до сих пор (весна 2011 года). Неблагоприятное воздействие на здоровье людей каждого из факторов (лесные пожары и «смог») вполне очевидно, однако их совместное воздействие имеет мультипликативный, или синэнергетический характер, т.е. многократно усиленное. Если причины возникновения аномальной жары в основном природного происхождения, то горение торфяников – в значительной степени процесс «рукотворный». Соответственно устранение хотя бы одного из двух неблагоприятных факторов, а именно прекращение горения торфяников даст значительный положительный эффект не только экологического, но и социального характера. В настоящее время специалистами – экологами, почвоведом, мелиораторами – высказывается целый ряд предложений по борьбе с горением выработанных торфяников: затопление, обводнение, создание водоемов и т.д. К сожалению, большинство предложений носит умозрительный характер, они малоэффективны, требуют ежегодного повторения, не исключают самовозгорания торфа в последующие годы и, что самое главное, в очень слабой степени учитывают конкретные природные условия (в основном геолого-гидрогеологические) [2].

Природные условия большей части заболоченных земель Центрального региона Нечерноземной зоны РФ отличаются достаточной степенью сложности. В геоморфологическом отношении переувлажненные участки расположены в пределах понижений на задровых (флювиогляциальных) равнинах, на низких террасах, на озерно-ледниковых равнинах и т.д., в геологическом отношении их отличает двухслойное строение, когда торф залегает на толще

аллювиальных, флювиогляциальных или озерно-ледниковых песков. Основное участие в переувлажнении таких земель принимают грунтовые, или слабонапорные воды, реже – атмосферные осадки (рис. 1, 2).

Фильтрационные свойства верхнего торфяного слоя целесообразно характеризовать с помощью вертикального коэффициента фильтрации, величина которого варьирует в достаточно широких пределах – от сотых до десятых долей метров в сутки, редко достигая 1,0...1,5 м/сут; водоотдача метрового слоя составляет 0,05...0,15, а высота капиллярного поднятия – 0,5...1,0 м. Нижний, песчаный слой обладает более высокими фильтрационными свойствами – K_{ϕ} меняется от 1,0 до 3,0...5,0 м/сут в зависимости от генезиса (аллювиального или флювиогляциального). Зеркало грунтовых вод, приуроченное к нижнему водоносному горизонту, залегает на глубине 0,5...1,0 м, что и определяет заболоченность территории.

Для решения задачи регулирования водного режима торфяников с целью предупреждения их горения автор предлагает создавать системы двойного (осушительно-увлажнительного) регулирования. Значимым элементом этих систем являются шлюзы и задвижки на осушительно-увлажнительных каналах и коллекторах, которые в закрытом состоянии позволяют замедлять дренажный сток, поддерживать высокий уровень зеркала грунтовых вод и не допускать отрыва уровня грунтовых вод или капиллярной каймы от подошвы торфяной залежи в условиях летней межени или аномальной жары. Предлагаемый подход исключает опасность осушения торфяников, возникновения пожаров, сработки торфа, неизбежных в условиях работы одностороннего самотечного горизонтального дренажа и проявившихся в 60–70-х годах прошлого века в СССР при глубоком осушении низинных болот. Во влажные годы мероприятия по перекрытию открытых каналов и коллекторов не требуются, что позволяет на переувлажненных землях отводить избыточную воду. Таким образом, система двустороннего регулирования водного режима на торфяниках с применением шлюзования позволяет активно управлять режимом грунтовых вод, сохранять плодородие торфяных почв, залуживать мелиорируемые территории и, в конечном счете, исключить возгорание

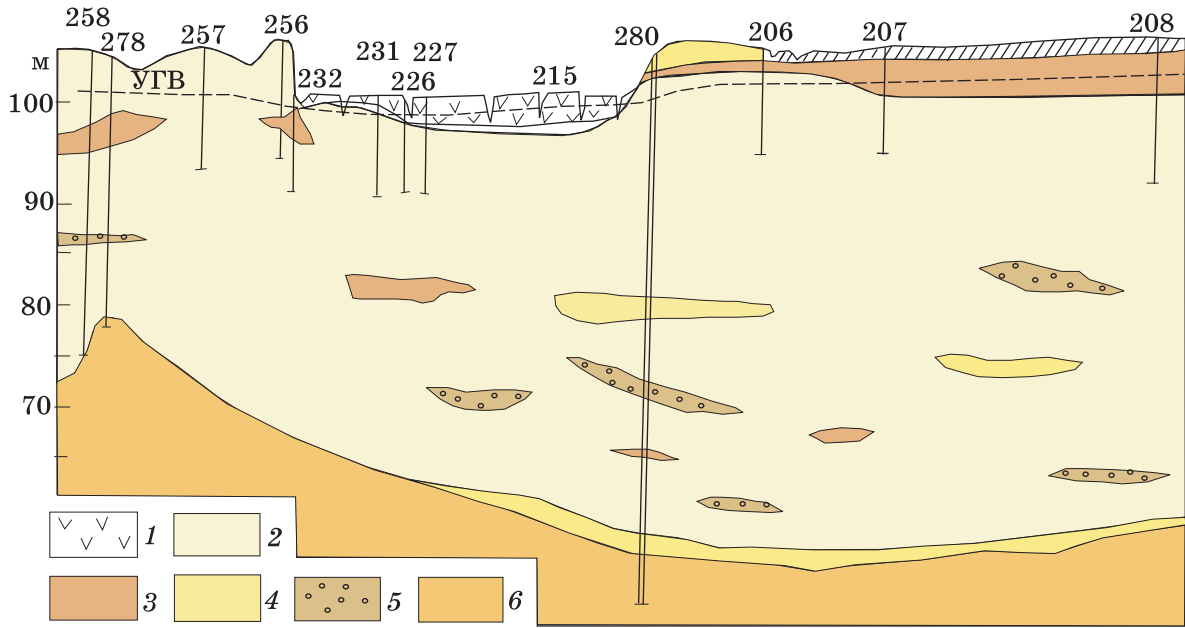


Рис. 1. Геолого-гидрогеологический разрез через болото «Олех» (Рязанская область):
 1 – торф; 2 – песок; 3 – суглинок; 4 – супесь; 5 – песок со щебнем; 6 – глина

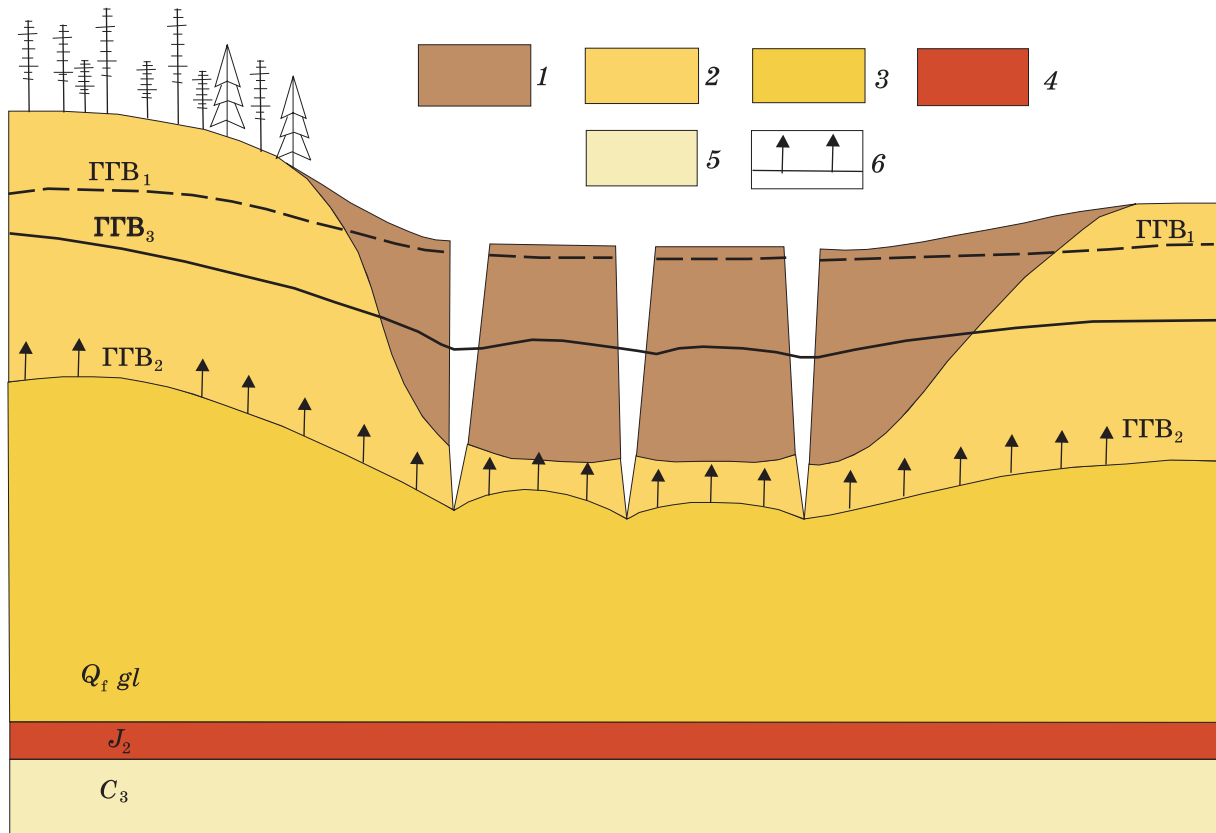


Рис. 2. Горизонты уровня грунтовых вод: ГГВ₁ – в естественных условиях; ГГВ₂ – при работе глубокого самотечного дренажа; ГГВ₃ – при работе системы двойного регулирования водного режима; 1 – торф; 2 – песок флювиогляциальный; 3 – песок флювиогляциальный обводненный; 4 – юрские глины, региональный водоупор; 5 – трещиноватые известняки карбона; 6 – капиллярная кайма от зеркала грунтовых вод

торфяников. Подобные системы целесообразно создавать на переувлажненных землях восточного и юго-восточного Подмосковья, Рязанской области и других, расположенных в пределах Мещерской низменности.

В инженерном отношении предлагаемые системы представляют собой сеть осушительно-обводнительных открытых каналов, вскрывающих торфяную залежь до подстилающего песчаного горизонта и глубже. Такие системы включают также внутреннюю проводящую сеть, подводящий канал, связывающий систему с внешними водоисточниками (рекой, озером, водохранилищем), с насосной станцией в головной части канала, систему шлюзов и задвижек, отводящий канал, коллектор и водоприемник.

Гидродинамическое обоснование систем двустороннего регулирования на торфяниках базируется на решении задачи одномерной неустановившейся фильтрации в двухслойной среде, которая описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$Km \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = K_b \frac{H - h}{h}; \quad (1)$$

$$\mu \frac{\partial H}{\partial x} = K_b \frac{H - h}{h}, \quad (2)$$

где K – коэффициент фильтрации нижнего пласта; m – мощность нижнего пласта, м; H – напор подземных вод в нижнем пласте, м; h – уровень грунтовых вод в верхнем пласте, м; μ – коэффициент водоотдачи верхнего пласта; K_b – коэффициент фильтрации нижнего и верхнего пласта, м/сут.

При усреднении уровня грунтовых вод в верхнем пласте в процессе фильтрации система уравнений (1) и (2) может быть представлена в следующем линеаризованном виде:

$$a \left[\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial^3 H}{\partial x^2 \partial t} \right] = \frac{\partial h}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha_b h = \alpha_b H, \quad (4)$$

где $a = \frac{Km}{\mu}$ – коэффициент урвннепроводности системы; $\alpha_b = \frac{K_b}{\mu h_{cp}}$.

Совершенное русло канала на границе потока (при $x = 0$) – условие первого рода [3, 4].

Решение системы уравнений (3) и (4) для случая мгновенного изменения напора $\Delta H(0, t) = \Delta H^0$ на границе полуограниченного потока (при $x = 0$) имеет следующий вид: $\Delta h(x, t) = h - h_0 = \Delta H^0 F_b(\lambda, \Theta), \quad (5)$

где h и h_0 – ординаты уровней воды в верхнем пласте в расчетный момент времени t и при $t = 0$.

Соответственно

$$F_b(\lambda, \Theta) = 1 - e^{-\Theta} - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \beta \lambda}{\beta} \times \left[\exp \left(-\frac{\beta^2}{4 + \frac{\beta^2}{\Theta}} \right) - e^{-\Theta} \right] d\beta, \quad (6)$$

при $\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad \Theta = \frac{K_b t}{\mu h_{cp}}. \quad (7)$

Исходя из соотношения (4), можно определить величину напора в нижнем пласте:

$$H = h + \frac{\partial h}{\partial \Theta}. \quad (8)$$

После несложных преобразований можно получить выражение для функции подпора в нижнем слое:

$$\Delta H(x, t) = H(x, t) - H_0 = \Delta H^0 F_n(\lambda, \Theta), \quad (9)$$

где $\Delta H(x, t)$ и H_0 – значения напоров в нижнем пласте в расчетный момент времени t и при $t = 0$.

Соответственно

$$F_n(\lambda, \Theta) = 1 - \frac{8}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \beta \lambda}{\beta \left(4 + \frac{\beta^2}{\Theta} \right)} \times \exp \left(-\frac{\beta^2}{4 + \frac{\beta^2}{\Theta}} \right) d\beta, \quad (10)$$

Остальные обозначения прежние. Значения функции $F_n(\lambda, \Theta)$ табулированы автором для широкого диапазона переменных λ и Θ и приведены в табл. 1.

Несовершенное русло канала на границе (при $x = 0$) – граничное условие третьего рода [3, 4].

Рассмотренный случай для практических расчетов встречается сравнительно редко. В нашем варианте при расчетах систем двустороннего регулирования водного режима на торфяниках русла каналов оказываются врезанными лишь на незначительную мощность нижнего водоносного горизонта, что вызывает дополнительное сопротивление при фильтрации, искривление депрессионной поверхности и удлинение потока на величину ΔL .

Решение системы уравнений (1) и (2), описывающих неустановившуюся фильтрацию в двухслойной среде в полуограниченном потоке при граничном условии третьего рода на границе ($x = 0$), а именно $\frac{\partial h}{\partial n} = \frac{1}{\Delta L} H, \quad (11)$

в случае мгновенного изменения уровня на границе потока можно записать в следующем виде:

для нижнего пласта –

$$H = \frac{\Delta H(x, t)}{\Delta H(0, t)} = \frac{1}{\Delta L} \int_0^\infty F_n(x + \eta, t) e^{-\frac{\eta}{\Delta L}} d\eta; \quad (12)$$

для верхнего пласта –

$$\bar{h} = \frac{\Delta h(x, t)}{\Delta H(0, t)} = \frac{1}{\Delta L} \int_0^\infty \bar{F}_n(x + \eta, t) e^{-\frac{\eta}{\Delta L}} d\eta; \quad (13)$$

где ΔL – дополнительное сопротивление ложа канала; $F_n(x + \eta, t)$ и $\bar{F}_n(x + \eta, t)$ – функции, соответствующие (6) и (10).

Остальные обозначения прежние.

Если выражения (12) и (13) привести к расчетному виду, то получим следующие зависимости:

$$\bar{F}_n(\lambda, \lambda', \Theta) = \frac{1}{\lambda'} \int_0^\infty e^{-\frac{\eta}{\lambda'}} \times \left\{ 1 - \frac{8}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \beta(\lambda + \eta)}{\beta \left(4 + \frac{\beta^2}{\Theta} \right)} \exp \left(-\frac{\lambda^2}{4 + \frac{\beta^2}{\Theta}} \right) d\beta \right\} d\eta; \quad (14)$$

$$\bar{F}_n(\lambda, \lambda', \Theta) = \frac{1}{\lambda'} \int_0^\infty e^{-\frac{\eta}{\lambda'}} \times \left\{ 1 - e^{-\Theta} - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \beta(\lambda + \eta)}{\beta} \times \left[\exp \left(-\frac{\beta^2}{4 + \frac{\beta^2}{\Theta}} \right) - e^{-\Theta} \right] d\beta \right\} d\eta; \quad (15)$$

где $\lambda' = \frac{\Delta L}{2\sqrt{at}}$.

Значения функции $\bar{F}_n(\lambda, \lambda', \Theta)$ табулированы автором для достаточно широкого набора переменных $\lambda, \lambda', \Theta$ и приведены в табл. 2.

Приведенные зависимости дают возможность оперативно управлять водным режимом на торфяниках, меняя уровни воды в осушительно-увлажнительных каналах с помощью шлюзов и задвижек в зависимости от климатических условий каждого конкретного года. В заключение следует отметить,

Таблица 1

Значения функции $F_n(\lambda, \Theta)$

$\Theta \backslash \lambda$	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5
0,005	0,9574	0,8967	0,8040	0,7210	0,6464	0,5797	0,5197	0,4660	0,4179	0,3359
0,1	0,9418	0,8601	0,7401	0,6366	0,6475	0,4710	0,4052	0,3484	0,2998	0,2217
0,2	0,9225	0,8160	0,6663	0,5438	0,4434	0,3618	0,2951	0,2407	0,1962	0,1303
0,3	0,9101	0,7883	0,6217	0,4899	0,3855	0,3035	0,2387	0,1876	0,1476	0,0909
0,4	0,9012	0,7689	0,5913	0,4539	0,3477	0,2665	0,2039	0,1557	0,1191	0,0692
0,5	0,8947	0,7547	0,5691	0,4280	0,3210	0,2407	0,1801	0,1349	0,1004	0,0555
0,75	0,8844	0,7319	0,5337	0,3872	0,2790	0,2003	0,1439	0,1026	0,0732	0,0368
1,0	0,8790	0,7196	0,5136	0,3633	0,2546	0,1778	0,1233	0,0849	0,0585	0,0272
2,0	0,8745	0,7057	0,4837	0,3235	0,2119	0,1369	0,0871	0,0547	0,0342	0,0128
5,0	0,8806	0,7115	0,4738	0,2990	0,1806	0,1052	0,0594	0,0326	0,0175	0,0048
10,0	0,8844	0,7175	0,4750	0,2924	0,1688	0,0921	0,0478	0,0238	0,0114	0,0024
100,0	0,8873	0,7231	0,4790	0,2890	0,1584	0,0787	0,0354	0,0145	0,0054	0,0006
erfc λ	0,8870	0,7240	0,4800	0,2890	0,1570	0,0880	0,0360	0,0140	0,0050	0,0000

что линеаризованный характер исходных дифференциальных уравнений (3) и (4) позволяет переходить от схемы полуограниченного пласта к схеме «пласт – полоса» (для двух параллельных каналов), используя метод суперпозиции.

Выводы

Аномальное жаркое лето 2010 года характеризуется следующими интегральными показателями: сумма максимальных дневных температур за летний период (июнь, июль, август) составила 2561,3 °С; сумма температур за 50 самых жарких летних дней (температура более 30 °С) составила 1859 °С. По-видимому, данные показатели не будут превышены

в ближайшие 2-3 десятилетия.

Неизбежными последствиями уникальной жары 2010 года стали лесные пожары и горящие торфяники, приведшие к серьезным экологическим бедствиям: из-за жары и «смога» увеличилась смертность людей (в основном пожилых) на территории мегаполиса; пожарами уничтожены сотни населенных пунктов и т.п.

Предлагаемые многими специалистами мероприятия по борьбе с горящими торфяниками (затопления, обводнения, создание водоемов) представляются автору малоэффективными, так как потребуют повторения этих мероприятий в последующие годы, не учитывают разнообразия

Значения функции $\bar{F}_n(\lambda, \lambda', \Theta)$

$\Theta \backslash \lambda$	0,05	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
$\lambda' = 0,1$						
0,1	0,9434	0,8881	0,6980	0,5165	0,3821	0,2828
0,3	0,9137	0,8577	0,5675	0,3527	0,2173	0,1363
0,5	0,8996	0,8035	0,5107	0,2879	0,1613	0,0898
1,0	0,8851	0,7755	0,4510	0,2227	0,1074	0,0507
10,0	0,8767	0,7752	0,3993	0,1363	0,0375	0,0087
$\lambda' = 0,5$						
0,1	0,7686	0,7277	0,5687	0,4236	0,3114	0,2329
0,3	0,6777	0,6164	0,4206	0,2621	0,1611	0,1011
0,5	0,6392	0,5765	0,3617	0,2068	0,1135	0,0654
1,0	0,5995	0,5477	0,3016	0,1560	0,0705	0,0369
10,0	0,5718	0,5526	0,2348	0,0796	0,0203	0,0056
$\lambda' = 1,0$						
0,1	0,6241	0,5877	0,4618	0,3417	0,2638	0,1870
0,3	0,5121	0,4378	0,3176	0,1917	0,1192	0,0648
0,5	0,4686	0,4182	0,2647	0,1485	0,0842	0,0459
1,0	0,4251	0,3710	0,2125	0,1034	0,0497	0,0230
10,0	0,3864	0,3279	0,1530	0,0478	0,0092	0,0025
$\lambda' = 1,5$						
0,1	0,5254	0,5016	0,3887	0,2873	0,2128	0,1436
0,3	0,4114	0,3855	0,2551	0,1476	0,0975	0,0551
0,5	0,3698	0,3527	0,2087	0,1280	0,0652	0,0348
1,0	0,3290	0,2763	0,1639	0,0717	0,0359	0,0201
10,0	0,2906	0,2514	0,1132	0,0286	0,0079	0,0019
$\lambda' = 2,0$						
0,1	0,4536	0,4277	0,3356	0,2493	0,1717	0,1373
0,3	0,3438	0,2957	0,2131	0,1328	0,0705	0,0458
0,5	0,3053	0,2730	0,1722	0,0965	0,0501	0,0297
1,0	0,2682	0,2337	0,1334	0,0646	0,0272	0,0143
10,0	0,2326	0,1962	0,0897	0,0276	0,0051	0,0016

природных условий (лишь геолого-гидрологические) заболоченных земель Центрального региона Нечерноземной зоны Российской Федерации.

Автором предлагается создание на указанной территории инженерных систем двойного регулирования водного режима на торфяниках, включающих в себя следующие элементы: водоисточник, подводящий канал, систему осушительно-увлажнительных каналов с элементами шлюзования, отводящий канал и водоприемник. Такие системы позволят замедлить дренажный сток с переувлажненных земель в жаркие годы и не допустить отрыва уровня грунтовых вод (УГВ) и капиллярной каймы от подошвы торфяной залежи. Во влажные годы предлагаемые мероприятия будут служить отводу избыточной влаги с переувлажненных земель.

Системы двойного регулирования водного режима на торфяниках позволят оперативно управлять УГВ и проводить мероприятия по залуживанию рассматриваемых территорий.

Дано гидродинамическое обоснование систем двойного регулирования на торфяниках, основанное на решении одномерных дифференциальных уравнений частных производных, описывающих неустановившуюся фильтрацию подземных вод в двухслойной среде.

1. Гидрогеологические условия Нечерноземной зоны РСФСР / Под ред. Г. В. Куликова. – М.: Недра, 1983. – 338 с.

2. **Зайдельман Ф. Р.** Мелиорация почв: учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 384 с.

3. **Манукьян Д. А.** Вопросы методики гидрогеологических расчетов с использованием ЭЦВМ: дис. ... канд. геол.-минер. наук. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – 201 с.

4. Основы гидрогеологических расчетов/ Ф. М. Бочеввер [и др.]. – М.: Недра, 1969. – 367 с.

Материал поступил в редакцию 14.04.11.
Манукьян Давид Ашикович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Геология и гидрогеология»

Тел. 8 (495) 976-22-27