УДК 550.42:577.4(571.1)

ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ ТОРФЯНЫХ БОЛОТ (НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРА РЕКИ КЛЮЧ, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

О.Г. Савичев, П.В. Бернатонис, В.К. Бернатонис

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Предложена и апробирована математическая модель формирования стока на заторфованных территориях на примере реки Ключ в северо-восточной части Васюганского болота. Выполнена оценка элементов годичного и месячного водного баланса водосбора. Разработаны рекомендации по гидрологическому обоснованию хозяйственного освоения торфяных болот, в том числе предложены показатели, которые необходимо определять при проведении геологоразведочных работ и инженерных изысканий: площади внутриводосборных экосистем с различной проточностью, протяжённость контуров притока и оттока воды из экосистем, среднемноголетние и месячные значения элементов водного баланса; продольный профиль изменения водного стока по мере движения воды от границы водосбора до русловой сети.

Ключевые слова:
Гидрологические расчёты, математическая модель, обоснование хозяйственной деятельности, торфяные болота, Западная Сибирь.

Key words:
Hydrological calculations, mathematical model, substantiation of economic activities, marshes, Western Siberia.

Введение

Разработка торфяных месторождений, линейное, промышленное и гражданское строительство на торфяных болотах и заболоченных территориях должно проводиться на основе гидрологического обоснования, включающего оценку нормы и максимального стока до и после антропогенного воздействия на болото на основе действующих нормативных документов [1–4]. Однако анализ сложившейся гидрологической и пожароопасной ситуаций на осушенных торфяниках Томской области [5, 6] свидетельствует о том, что эффективность этого обоснования не во всех случаях адекватна наблюдаемым последствиям осушения торфяников – в ряде случаев наблюдается либо их вторичное заболачивание, либо переосушение с последующим выгоранием торфа.

Это объясняется и методологическими проблемами гидрологических расчётов, и дефицитом достоверной гидрологической информации о болотах Западной Сибири, что определило цель исследования – гидрологическое обоснование хозяйственного использования торфяных болот на основе математического моделирования процессов формирования месячного и годового водного стока с торфяных болот и заболоченных территорий. Апробация разрабатываемого подхода выполнена на примере северо-восточного участка Васюганского торфяного болота (рис. 1), соответствующего границам водосбора р. Ключ (элемент системы: р. Ключ – р. Бакчар – р. Чая – р. Обь).

Общая морфометрическая, геоботаническая и гидрологическая характеристика данной реки и её водосбора приведена в [6–8]. Основной метод оценки антропогенного воздействия на водный объект при отсутствии или недостаточности режимных гидрологических наблюдений – математическое моделирование процесса формирования

a

b

Рис. 1. *Схема расположения района исследований (a, 1), его космоснимок (b), ориентировочные границы Васюганского торфяного болота (a) и водосбора реки Ключ (b)*

водного стока, что и определило структуру работы. В качестве расчётных гидрологических параметров использованы норма стока (среднемноголетняя величина) и его внутригодовое распределение по месяцам как наиболее информативные характеристики гидрологических условий региона.

Методика исследований и исходные данные

Математическая модель формирования водного стока при отсутствии водопритока из смежных водосборов включает в себя следующие блоки:

$$Y_t = X_t - E_t \pm \Delta U_t, \qquad (1)$$

где Y_t – слой суммарного водного стока (поверхностного $Y_{s,t}$ и подземного $Y_{g,t}$) за период времени t (за месяц Y_m или год Y_y); X_t – слой атмосферного увлажнения; E_t – слой испарения с поверхности водосбора с учетом конденсации влаги (за месяц E_m или год E_y); ΔU_t – изменение влагозапасов в водосборе (за месяц ΔU_m или год ΔU_y) [9]. В среднемноголетнем разрезе (для статистически однородного периода по условиям формирования и изменения

стока) в первом приближении обычно предполагается, что величина ΔU_y менее 1 мм/год (согласно [10], средняя скорость вертикального прироста торфяной залежи в Западной Сибири составляет 0,39...0,80 мм/год), что в случае годичного расчётного интервала позволяет упростить выражение (1), а уравнение годового водного баланса представить в виде:

$$Y_y \approx X_y - E_y. \quad (2)$$

Месячное «эффективное» атмосферное увлажнение X_m определяется как сумма значений слоя дождей $P_m(l)$ и водоотдачи $h_m(sm)$ из сезонного снежного покрова, сформировавшегося в холодный период года:

$$X_m = P_m(l) + h_m(sm), \quad (3)$$

$$\frac{dW_{sn,m}}{dt} = P_m(h) - h_{sm,m} - E_m, \quad (4)$$

где $W_{sn,m}$ – месячные влагозапасы в снежном покрове; $P_m(h)$ – месячные твердые атмосферные осадки; величина $h_m(sm)$ может быть найдена с использованием конечно-разностной аппроксимации уравнения (4) по данным наблюдений за влагозапасами в снежном покрове [11]. При прогнозной оценке водоотдача из снежного покрова может быть вычислена по уравнению теплового баланса или по зависимости от температуры атмосферного воздуха вида [11–14]:

$$h_m(sm) = k_{sm} T_{a,m}, \quad (5)$$

где $T_{a,m}$ – средняя месячная температура атмосферного воздуха; k_{sm} – коэффициент, по смыслу аналогичный коэффициенту стаивания при среднемесячных значениях покрытия водосбора снегом и стаивания снега, при котором начинается водоотдача [12].

Месячное испарение с поверхности водосбора E_m при оценке современного состояния окружающей среды в тёплый период года определяется по методу М.И. Будыко [1, 2, 15]:

$$E_m = k_E E_{0,m} \frac{W_{slb,m} + W_{sle,m}}{2W_{sl0,m}}, \quad (6)$$

$$W_{sle,m} \approx \frac{W_{slb,m}\left(1 - \frac{k_E E_{0,m}}{2W_{sl0,m}}\right) + X_m - Y_m}{1 + \frac{k_E E_{0,m}}{2W_{sl0,m}}}, \quad (7)$$

где k_E – безразмерный эмпирический коэффициент; $W_{slb,m}$ и $W_{sle,m}$ – продуктивные влагозапасы почвы (в метровом слое) на начало и конец месяца; $W_{sl0,m}$ – продуктивные влагозапасы почвы (в метровом слое) при наименьшей влагоёмкости, задаются по материалам наблюдений или литературным данным [2, 16]; $E_{0,m}$ – испаряемость. Расчёт влагозапасов почвы проводится с первого месяца, в течение которого в среднем наблюдаются талые грунты или происходит их интенсивное оттаивание (в южнотаёжной подзоне Западной Сибири – обычно в апреле, в подзоне средней тайги – в апреле и мае). При этом начальное значение влагозапасов $W_{slb,0}$ и коэффициент k_E определяются путем подбора, исходя из условия:

$$\frac{E_y - (X_y - Y_y)}{X_y - Y_y} = 0. \quad (8)$$

Испаряемость $E_{0,m}$ вычисляется, согласно [1, 2], по формуле:

$$E_{0,m} = 0,69 N_m k_{D,m} (e_{s,m} - e_m), \quad (9)$$

где N_m – количество суток в месяце; $k_{D,m}$ – коэффициент турбулентной диффузии, рассчитываемый в зависимости от средней месячной скорости ветра; e_m – среднее месячное парциальное давление водяного пара в воздухе; $e_{s,m}$ – среднее месячное давление насыщенного пара по температуре испаряющей поверхности, определяемой в зависимости от величины k_A:

$$k_{A,m} = \frac{R_{s,m} - O_{s,m}}{0,001718 N_m k_{D,m}} + e_m + \frac{k_{D,m} + 0,42}{1,53 k_{D,m}} T_{a,m}, \quad (10)$$

$$R_{s,m} = R_{i,m}(1-\alpha) - J_{s,m}, \quad (11)$$

$$R_{i,m} = R_{0,m}(1 - (1 - k_{\varphi,1}) n_{c,m}), \quad (12)$$

$$J_{s,m} = J_{0,m}(1 - k_{\varphi,2} n_{c,m}), \quad (13)$$

$$J_{0,m} = k_s k_{bb} k_\sigma T_{a*,m}^4 (0,39 - 0,058\sqrt{e_m^*}), \quad (14)$$

где $O_{s,m}$ – теплообмен с почвой, приближенно определяемый с учетом природной зоны; $R_{s,m}$ – месячный радиационный баланс; $J_{s,m}$ и $J_{0,m}$ – эффективное излучение земной поверхности при облачном и безоблачном небе; $R_{i,m}$ и $R_{0,m}$ – суммарная солнечная радиация при облачном и безоблачном небе; k_s – коэффициент размерности; $k_{\varphi,1}$, $k_{\varphi,2}$ – коэффициенты, зависящие от широты местности; k_{bb} – коэффициент, характеризующий отклонение излучения поверхности от излучения абсолютно черного тела; k_σ – постоянная Стефана-Больцмана; $T_{a,m}$ и $T_{a*,m}$ – средняя месячная температура атмосферного воздуха в °С и К; e_m и ε^*_m – среднее месячное значение парциального давления водяного пара в воздухе в гПа и мм; α – альбедо рассматриваемой поверхности; $n_{c,m}$ – общая облачность. Альбедо рассчитывается с учетом вклада различных поверхностей водосбора в общую его площадь (как среднее взвешенное), величины $R_{0,m}$, k_φ – в зависимости от широты геометрического центра исследуемого водосбора по данным [2, 15].

При прогнозной оценке водного баланса в условиях дефицита или отсутствия данных режимных наблюдений месячное испарение в теплый период года может быть приближенно вычислено по методу В.С. Мезенцева [17], а влагозапасы в метровом слое почвы – по уравнению (7) с заменой разницы между увлажнением и стоком на вычисленное значение испарения:

$$E_m = E_{\max,m}\left(1+\left(\frac{X_m}{E_{\max,m}}\right)^{-n_M}\right)^{-\frac{1}{n_M}}, \qquad (15)$$

$$E_{\max,m} = (5{,}1\sum T_{a(>0),m} + 382)\frac{D_{a,m}}{\sum D_{a,m}}, \qquad (16)$$

где $E_{\max,m}$ – водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов; n_M – коэффициент, зависящий от ландшафтных условий формирования стока; $\Sigma T_{a(>0),m}$ – годовая сумма положительных среднемесячных температур атмосферного воздуха; $D_{a,m}$ и $\Sigma D_{a,m}$ – среднемесячные значения дефицита влажности воздуха и их годовая сумма [17]. При отрицательных температурах воздуха испарение с поверхности снежного покрова вычисляется по формуле П.П. Кузьмина [18]:

$$E_m = 0{,}34 N_m D_{a,m}. \qquad (17)$$

Месячные значения подземной составляющей стока $Y_m(g)$ могут быть приближенно оценены из условия:

$$Y_y \approx \sum_{m=1}^{12}(X_m - E_m - I_m + Y_m(g)), \qquad (18)$$

$$Y_m(g) \approx Y_m \text{ в зимние месяцы при } X_m \approx 0, \qquad (19)$$

где I_m – инфильтрация, определяемая с учетом модели Грина–Эмптона [19, 20] и предложений А.Н. Костякова и Н.П. Чеботарева [21] по уравнению:

$$I_m \approx k_{w,x}\left(1+\frac{X_m + h_k}{h_g}\right), \qquad (20)$$

где h_g – глубина залегания грунтовых вод по данным гидрогеологических или болотных наблюдений; $k_{w,x}$ – коэффициент влагопроводности ($k_{w,mg}$ – в талых грунтах, $k_{w,fg}$ – в мерзлых); h_k – капиллярное поднятие влаги, оценка которого проводилась по эмпирической формуле [17]:

$$h_k = 0{,}2(600 - w_{mw*})10^{-6} w_{mw*}^3, \qquad (21)$$

где w_{mw*} – наименьшая влагоёмкость почвы.

Коэффициент влагопроводности в талых грунтах $k_{w,mg}$ рассчитывается по зависимостям, предложенным Клэппом и Хорнбергером [14]:

$$k_{w,mg} = k_{f,1}\left(\frac{w}{\theta}\right)^{2k_B+3}, \qquad (22)$$

$$\theta = (494{,}305 - 1{,}08\cdot\eta_{sand})\cdot 10^{-3}, \qquad (23)$$

$$k_B = 0{,}137\cdot\eta_{clay} + 3{,}501, \qquad (24)$$

где w – объёмная влажность почвы (в метровом слое почвы рассчитывается как $w=(W_{slb,m}+W_{sle,m})/2000$); θ – пористость почвы; η_{sand} и η_{clay} – содержание песка (при диаметре частиц более 0,05 мм) и глины (при диаметре частиц менее 0,002 мм); k_B – эмпирический коэффициент; $k_{f,1}$ – коэффициент фильтрации почвы; принимается по эмпирической зависимости от величины η_{clay}, построенной по данным [14]:

$$k_{f,1} = 0{,}0018715\eta_{clay}^{-1{,}8532}. \qquad (25)$$

При наличии мерзлых грунтов коэффициент влагопроводности $k_{w,fg}$ рассчитывается в соответствии с [19]:

$$k_{w,fg} = 0{,}947 k_{w,mg}\left(\frac{\theta - w_l - k_a - w_f}{\theta - w_f}\right)^{3{,}96}, \qquad (26)$$

где w_l и w_f – жидкая и замерзшая влага; k_a – количество защемленного воздуха. Количество жидкой влаги определяется согласно [11] в зависимости от среднемесячной температуры почвы $T_{s,m}$ на глубине 0,5 м, рассчитываемой как среднее взвешенное по данным наблюдений на поверхности почвы и на глубинах 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2 м:

$$w_l = \frac{5w_{l,-5}w_{l,0}}{5w_{l,-5} - T_{s,m}(w_{l,0} - w_{l,-5})}, \qquad (27)$$

$$w_{l,0} = 1{,}04 w_{mw} - 0{,}06, \qquad (28)$$

$$w_{l,-5} = 0{,}94 w_{mf} + 0{,}017, \qquad (29)$$

где $w_{l,0}$ и $w_{l,-5}$ – содержания жидкой влаги при температуре почвы 0 и –5 °С, определяемые в зависимости от наименьшей влагоёмкости почвы w_{mw} и влажности завядания w_{mf}; расчёт w_l проводится по формуле (27) для интервала температур почвы $-5 \le T_{s,m} \le 0$, для $T_{s,m} < -5$ принимается $w_l = w_{l,-5}$. Величины w_{mw} и w_{mf}, в свою очередь, рассчитываются согласно [14] по зависимостям от содержания глинистых веществ:

$$w_{mf} = 37{,}1342\cdot 10^{-3}\eta_{clay}^{0{,}5}, \qquad (30)$$

$$w_{mw} = 89{,}0467\cdot 10^{-3}\eta_{clay}^{0{,}3496}. \qquad (31)$$

При прогнозе элементов водного баланса температура почвы может быть вычислена по моделям гидротермического режима почвы, подробно рассмотренным в [11, 14], либо по эмпирическим зависимостям от температуры атмосферного воздуха, которые для условий Томской области имеют вид:

$$T_{s(\mathrm{I-IV}),m} = k_{s,1} T_{a(\mathrm{I-IV}),m}, \qquad (32)$$

$$T_{s(\mathrm{V-VII}),m} = k_{s,2} T_{a(\mathrm{V-VII}),m}, \qquad (33)$$

$$T_{s(\mathrm{VIII-XII}),m} = k_{s,3} T_{a(\mathrm{VIII-XII}),m} + k_{s,4}, \qquad (34)$$

где $T_{s(\mathrm{I-IV}),m}$ и $T_{a(\mathrm{I-IV}),m}$ – среднемесячные значения температур почвы и атмосферного воздуха за январь – апрель (с месяца с самыми низкими температурами воздуха до месяца, в который в среднем наблюдается переход через 0 °С); $T_{s(\mathrm{V-VII}),m}$ и $T_{a(\mathrm{V-VII}),m}$ – среднемесячные значения температуры почвы и атмосферного воздуха за май – июль (с первого месяца с устойчивыми положительными температурами воздуха до месяца с температурным максимумом); $T_{s(\mathrm{VIII-XII}),m}$ и $T_{a(\mathrm{VIII-XII}),m}$ – среднемесячные

значения температур почвы и атмосферного воздуха за август – декабрь (период с трендом общего похолодания).

Слой месячного подземного стока $Y_{g,m}$ определяется по соответствующему расходу воды $Q_m(g)$ с учётом уравнения Дюпюи [22]:

$$Y_m(g) = \frac{Q_m(g)t_m}{1000F}, \quad (35)$$

$$Q_m(g) = k_{f,2}k_L \frac{(Z_{g,m}^2 - Z_{r,m}^2)}{2L_1} L_2 - I_{m*} \frac{k_L L_1 L_2}{2}, \quad (36)$$

где t_m – количество секунд в расчетном месяце; $Z_{g,m}$ и $Z_{r,m}$ – среднемесячные уровни грунтовых и речных вод в расчётном створе, в пределах которого расположена гидрогеологическая скважина; L_1 – расстояние от гидрогеологической скважины до уреза воды при уровне воды $Z_{r,m}$; L_2 – длина реки; F – площадь водосбора; $k_{f,2}$ – коэффициент фильтрации водоносных отложений; k_L – коэффициент, учитывающий соотношение притока в речную сеть и притока с одного берега в расчетном створе (в первом приближении $k_L \approx 2$).

Величина ΔU_m в режиме изучения фактического водного баланса определяется по ур. (1) по известным данным об эффективном увлажнении, испарении и суммарном стоке, в режиме прогноза – по региональным эмпирическим зависимостям, применительно к Томской области имеющим вид:

$$\Delta U_m = k_{U,1}X_m - k_{U,2}T_{a,m} - k_{U,3}, \quad (37)$$

где $k_{U,1}$, $k_{U,2}$, $k_{U,3}$ – эмпирические коэффициенты, отражающие условия аккумуляции атмосферных осадков и водоотдачи из снежного покрова в понижениях рельефа в пределах условно однородного гидрологического района. Метеорологические параметры в последнем случае задаются либо как среднемесячные за многолетний период, либо по тенденциям, либо экспертным способом. Таким образом, предлагаемая модель формирования месячного водного стока в составе уравнений (1–4, 6–14, 18–31, 35–36) при наличии данных наблюдений позволяет выделить основные элементы фактического водного баланса речного водосбора, а в составе уравнений (1–3, 5, 7, 9, 15–37) – обеспечить прогноз изменений элементов водного баланса и расчёты стока на неизученных территориях при отсутствии данных наблюдений.

В случае сильно заболоченных водосборов малых водотоков дополнительно может быть оценено распределение водного стока между различными болотными и неболотными экосистемами, площадь и местоположение которых устанавливаются путём дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли. В Томской области в подобных водосборах краевые их части часто представлены олиготрофными болотами, постепенно сменяющимися по мере приближения к русловой сети мезо- и евтрофными болотами, а долины водотоков и внутриболотные суходолы покрыты древесной растительностью; встречаются и открытые незаболоченные участки. Алгоритм расчета базируется на выводах К.И. Иванова [23] об относительном постоянстве проточности в пределах однородных внутриболотных экосистем и заключается в определении значений эквивалентной ширины внутриводосборных экосистем, модулей и слоя стока с каждой экосистемы:

$$B_e = \begin{cases} 0,5\sqrt{\dfrac{F_e}{\pi}}, L_{e,inp} = 0; \\ \dfrac{2F_e}{L_{out} + L_{inp}}, L_{inp} > 0, \end{cases} \quad (38)$$

$$Y_{e,y} = \frac{t_y M_{e,y}}{10^6} = \frac{t_y (q_{e,out} - q_{e,inp})}{10^6 B_e}, \quad (39)$$

где $Y_{e,y}$ – слой годового стока с территории, занятой исследуемой экосистемой, мм/год; t_y – количество секунд в расчетном периоде; $M_{e,y}$ – средний годовой модуль водного стока с территории экосистемы площадью F_e; $\pi \approx 3,14...$; $q_{e,out}$ и $q_{e,inp}$ – проточность через контуры стока и притока, значения которой определяются по данным наблюдений или согласно [23]; $L_{e,out}$ и $L_{e,inp}$ – длина контура стока и притока; B_e – эквивалентная ширина экосистемы.

Расчёт начинается с определения проточности и слоя стока с наиболее удаленных от замыкающего створа на исследуемой реке болотных экосистем. Для неболотных экосистем вычисления проводятся в целом так же, как и для болотных, но с выделением только двух типов объектов (лесных и нелесных экосистем) и допущением о постоянном соотношении соответствующих модулей стока ($k_{f-f} = M_{frs}/M_{fld}$). Параметр k_{f-f} принят в размере 2 по результатам обобщения данных о стоке равнинных притоков р. Оби на участке её среднего течения. Атмосферное увлажнение $X_{e,y}$ в пределах экосистемы определяется по месячным данным наблюдений за жидкими осадками и измеренными влагозапасами в снежном покрове в лесу $W_{sn-frs,m}$ и на открытых участках $W_{sn-fld,m}$. В случае наличия данных наблюдений либо только в лесу, либо только в поле может использоваться соотношение $W_{sn-frs,m}/W_{sn-fld,m} \approx 1,1$ [12]. Годовое испарение $E_{e,y}$ с поверхности конкретной экосистемы находится по разнице атмосферного увлажнения $X_{e,y}$ и стока $Y_{e,y}$. Месячные значения слоя стока с экосистем рассчитываются пропорционально внутригодовому распределению суммарного стока с водосбора и соотношению годового стока с экосистемы и водосбора. Альтернативный подход к оценке водного баланса болотных территорий заключается в расчёте испарения и стока как разницы между атмосферным увлажнением и стоком согласно [4].

Исходные данные для определения атмосферного увлажнения и испарения приняты согласно [24] по данным метеостанции Бакчар, расположенной в 66 км от геометрического центра водосбора р. Ключ, сведения о расходах воды р. Ключ у с. Полынянки – по фондовым данным Росгидромета,

результаты обобщения которых частично приведены в [6, 8]. Характеристики экосистем водосбора р. Ключ получены В.А. Базановым, А.А. Скугаревым и О.Г. Савичевым [7, 8] в результате рекогносцировочных обследований и анализа космоснимков (таблица). Значения альбедо α, а также коэффициентов k_s, k_φ, k_{bb}, k_σ, k_{nc} приняты согласно [2, 15], проточность болотных экосистем – в соответствии с [23], содержание глинистых частиц в почве η_{clay} (34 % от веса почвы) – по данным [25] с учётом рекомендаций [14]. Влагозапасы в метровом слое почвы на начало апреля (211,7 мм), значения коэффициента фильтрации водоносных (болотных) отложений (0,073 м/сут), показатель степени n_M при расчёте испарения по методу В.С. Мезенцева (2,892) определёны оптимизацией по методу Ньютона, а коэффициенты k_{sm} (3,8 мм/(сут·°С)), $k_{s,1}$ (0,17), $k_{s,2}$ (0,81), $k_{s,3}$ (0,52), $k_{s,4}$ (6,23) – обратным расчётом по формулам (5, 32–34) по данным [24].

Таблица. *Гидрологические характеристики торфяно-болотных экосистем на площади водосбора р. Ключ*

Ранг экосистемы по мере движения воды от границы водосбора к русловой сети	Биогеоценоз	Площадь [7, 8]		Проточность, л/(с·км²)
		км²	%	
Водосбор в целом		75,70	100	–
1	Болото грядово-мочажинно-озерковое (БГМО)	6,86	9,1	2,00
2.1	Болото грядово-мочажинное (БГМ)	19,20	25,4	3,10
2.2	Болото олиготрофное сосново-сфагново-кустарничковое, сфагново-кустарничковое, облесённое сосной («рям»)	13,63	18,0	2,00
3.1	Окрайки олиготрофного болота	10,69	14,1	4,00
3.2	Болото мезотрофное	7,33	9,7	1,40
4	Лесной биогеоценоз (смешанный лес)	15,56	20,6	3,26
5.1	Болото евтрофное («согра»)	0,21	0,3	3,26
5.2	Открытые суходольные биогеоценозы	2,22	2,9	1,63

Результаты исследования и их обсуждение

Апробация модели позволила оценить среднемноголетние значения атмосферного увлажнение (485,0 мм), суммарного испарения (417,2 мм), стока (67,8 мм) и получить картину внутригодового распределения элементов водного баланса (рис. 2). Анализ этих данных позволяет сделать вывод о том, что основная часть руслового стока при высокой заболоченности водосбора связана со снеготаянием. Дождевые осадки, несмотря на их преобладание в годовом атмосферном увлажнении (74 %), преимущественно расходуются на испарение (рис. 2, 3). Также следует отметить заметный вклад в водное питание реки водоотдачи из снегового покрова в предзимье, что, видимо, является одной из причин отмечаемого в последние десятилетия увеличения расходов речных вод в зимний период в Северной Евразии, в целом [26], и в бассейне Средней Оби, в частности [6].

Рис. 2. *Внутригодовое распределение эффективного атмосферного увлажнения X, суммарного стока р. Ключ у с. Полынянка Y и испарения с поверхности её водосбора E в среднем за многолетний период*

Рис. 3. *Внутригодовое распределение жидких атмосферных осадков P(l) и водоотдачи из снежного покрова h(sm) на территории водосбора р. Ключ у с. Полынянка в среднем за многолетний период*

Достаточно интересные результаты получены в части оценки среднемноголетних значений инфильтрации и подземной составляющей речного стока в размере 0,2 мм. Столь низкие её величины объясняются наличием водоупора из суглинков, подстилающего торфяную залежь и затрудняющего взаимосвязь между поверхностными и подземными водами. Тем не менее, такая связь прослеживается. На площади водосбора р. Ключ она заключается в подпитке речными водами подземных горизонтов в апреле, августе и сентябре, причём в противофазе с изменениями инфильтрации талых и дождевых вод (рис. 4). В целом, полученные данные о подземном стоке указывают на необходимость присутствия в проектах осушения/освоения торфяных болот систем вертикального дренажа, предназначенных для увеличения интенсивности

водообмена и предупреждения вторичного заболачивания.

Рис. 4. *Внутригодовое распределение подземной составляющей стока р. Ключ у с. Полынянка Y(g) и инфильтрации вод I в среднем за многолетний период*

Ещё один важный результат выполненного моделирования связан с выявлением распределения водного стока в экосистемах водосбора реки Ключ. В частности, установлено, что на границе грядово-мочажинно-озеркового и олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового («рям») болот, с одной стороны, и олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового и мезотрофного болот, с другой, наблюдается относительно резкое уменьшение слоя стока (рис. 5).

Рис. 5. *Распределение слоя стока по экосистемам реки Ключ по мере движения воды от границы водосбора к русловой сети в среднем за многолетний период*

Это свидетельствует о потенциальном переувлажнении пограничных участков, которое, предположительно, и является основным фактором трансформации внутриболотных экосистем в рассматриваемом водосборе. Аналогичный механизм должен действовать и на границе системы «олиготрофное болото – лесная экосистема», в связи с чем при разработке торфяных месторождений и/или строительстве на торфяных болотах целесообразно провести оценку внутриболотного распределения стока и в соответствии с ним спроектировать размещение осушительной сети и/или иных инженерных объектов и систем.

Таким образом, модель может быть использована для анализа существующей гидрологической ситуации и для долгосрочного прогноза изменений водного стока и водного баланса, а, следовательно, и для оценки антропогенного воздействия на окружающую среду как в научных, так и в инженерных целях. В последнем случае один из значимых эффектов её применения может быть связан с проектированием осушительной сети или иных инженерных объектов (например, параметров и расположения обводных и магистральных каналов, автодорог, трубопроводов, обваловок промышленных площадок на болотах и т. д.), мероприятий по рекультивации нарушенных земель, лесо- и водохозяйственной мелиорации. В частности, модель даёт возможность путём подбора параметров определить длину контуров притока и оттока воды с внутриводосборных экосистем, позволяющих предотвратить или уменьшить переувлажнение участков водосбора вблизи инженерных объектов.

Заключение

Разработана и апробирована математическая модель формирования месячного и годового водного стока малой реки с сильно заболоченным водосбором. На примере малой реки Ключ – элемента речной сети «Ключ – Бакчар – Чая – Обь» (Западная Сибирь) оценены среднемноголетние значения атмосферного увлажнения (включая дождевые осадки и водоотдачу из снегового покрова), суммарного испарения с поверхности водосбора и стока, его подземной составляющей и инфильтрации; установлено внутригодовое распределение элементов водного баланса водосбора; выявлены особенности распределения водного стока внутри водосбора.

Показано, что при проведении геологоразведочных работ и инженерных изысканий для строительства на торфяных болотах необходимо:

- получить картину пространственного распределения экосистем в пределах рассматриваемого речного водосбора на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли и полевых обследований;
- оценить протяжённость контуров притока и оттока воды с экосистем;
- вычислить среднемноголетние и месячные значения атмосферного увлажнения, суммарного испарения с поверхности водосбора и стока, его подземной составляющей.

В местах накопления воды на границе экосистем должны быть предусмотрены мероприятия по отведения избыточной влаги, включая системы вертикального дренажа.

Работа выполнена при финансовой поддержке ТПУ по теме НИР «Исследование геологической эволюции системы вода – порода как основы ресурсоэффективных поисковых и эколого-геохимических технологий» № 5.4573.2011 и РФФИ (грант 11-05-9800-р_сибирь_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические рекомендации по оценке влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановлению их характеристик / под ред. Е.Э. Булаховской. – Л.: Госкомгидромет, 1986. – 78 с.
2. Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расчетах для водохозяйственного проектирования / под ред. Е.Э. Булаховской. – Л.: Госкомгидромет, 1986. – 168 с.
3. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
4. Методические указания по расчётам стока с неосушенных и осушенных болот / под ред. С.М. Новикова. – СПб.: ГУ «ГГИ» Росгидромета, 2011. – 114 с.
5. Состояние геологической среды на территории Томской области в 2000 г. / под ред. В.А. Льготина. – Томск: ТЦ Томскгеомониторинг, 2001. – Вып. 6. – 180 с.
6. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 248 с.
7. Савичев О.Г., Скугарев А.А., Базанов В.А., Харанжевская Ю.А. Водный баланс заболоченных водосборных территорий Западной Сибири (на примере малой реки Ключ, Томская область) // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 39–46.
8. Савичев О.Г., Базанов В.А., Харанжевская Ю.А. Гидрохимические и гидроклиматические условия функционирования болотных экосистем в таёжной зоне Западной Сибири // Инженерная экология. – 2011. – № 5. – С. 52–61.
9. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
10. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН. – С. 174–179.
11. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 279 с.
12. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 390 с.
13. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 143 с.
14. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
15. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1956. – 255 с.
16. Лучшева А.А. Практическая гидрология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 440 с.
17. Мезенцев В.С. Гидрологические расчёты в мелиоративных целях. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. – 84 с.
18. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 408 с.
19. Вершинин Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.Л., Павлова К.К. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 189 с.
20. Дунин Ф.Х. Моделирование инфильтрации в приближении к полевым условиям // Грани гидрологии / под ред. Дж.К. Родда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – С. 241–275.
21. Чеботарев Н.П. Учение о стоке. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 406 с.
22. Гавич И.К., Ковалевский В.С., Язвин Л.С. и др. Основы гидрогеологии. Гидродинамика / под ред. И.С. Зекцера. – Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.
23. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 280 с.
24. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Части 1–6. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. – 718 с.
25. Непряхин Е.М. Почвы Томской области. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1977. – 437 с.
26. Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I. Climatic Change and Dynamics of River Discharge into the Arctic Ocean // Water Resources. – 2003. – V. 30. – № 6. – P. 593–601.

Поступила 28.03.2012 г.