

УДК 630 : 556.013

## МОДЕЛЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЛЕСНОГО ВОДОСБОРА И ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОГО БАЛАНСА ПРИ ВЫРУБКЕ ЛЕСА

© 2012 г. Л. С. Кучмент, А. Н. Гельфан, В. Н. Демидов

*Институт водных проблем РАН*

*Москва, ул. Губкина, 3*

*e-mail: kuchment@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.02.2011 г.

Разработана физико-математическая модель гидрологического цикла лесного водосбора, включающая описание процессов перехвата жидких и твердых осадков кронами деревьев, накопления и таяния снежного покрова, вертикального переноса влаги в почве и суммарном испарении, поверхностного, подповерхностного и руслового стока. Калибровка модели и ее верификация проведены по данным экспериментальных наблюдений на полностью залесенном водосборе лога Таежный Валдайской воднобалансовой станции. Затем модель использовалась для оценки возможных изменений гидрологического цикла при полной вырубке леса на этом же водосборе. Значения изменяющихся при вырубке леса параметров модели оценивались по данным соответствующих измерений почвенных характеристик на соседнем безлесном (полевом) водосборе лога Усадьевский. По результатам моделирования, средний запас воды в снежном покрове перед началом снеготаяния на водосборе лога Таежный после вырубки леса может увеличиться на 15%. Потери на сублимацию снега сокращаются почти вдвое. Интенсивность снеготаяния увеличивается на 30%, а продолжительность снеготаяния в среднем сокращается на 10 дней. Годовой сток после вырубки леса увеличивается на 7–10%, однако распределение стока по сезонам и составляющие водного баланса претерпевают более значительные изменения. Максимальные расходы весеннего половодья на лесном водосборе в среднем оказываются на 50% ниже расходов, чем после вырубки леса. Продолжительность половодья после вырубки леса сокращается на 5–7 дней. Исследованы также изменения гидрологического цикла в зависимости от изменения листового индекса, связанного с возрастом лесного древостоя.

*Гидрологический цикл, речной сток, моделирование стока, лесной бассейн, влияние вырубки леса на сток.*

Оценка влияния леса на гидрологический цикл и речной сток – классическая задача экспериментальной и теоретической гидрологии, которой посвящена обширная литература. Многочисленные экспериментальные исследования, проводившиеся в разных странах, позволили сформировать основные представления об особенностях гидрологического цикла лесных водосборов и роли лесных экосистем в гидрологических процессах. Однако количественные и качественные оценки влияния леса на речной сток и другие составляющие гидрологического цикла, полученные в этих исследованиях, значительно отличаются. Наиболее дискуссионным до сих пор остается вопрос о влиянии лесистости на объем годового стока. Результаты исследований гидрологи-

ческой роли леса для условий России обобщены в работах [2, 4, 7].

Влияние леса на гидрологический цикл и речной сток наиболее заметно проявляется в перехвате осадков кронами деревьев и увеличении потерь стока на суммарное испарение. В среднем половодья может задерживать 10–25% выпадающих жидких осадков, однако величина суммарного испарения в теплый период может меняться в значительном диапазоне в зависимости от климатических условий, почвенных характеристик, а также состава, структуры и возраста древостоя. В зимний период перехват осадков и испарение также играют важную роль, особенно в хвойных лесах, где снег задерживается на кронах деревьев в течение длительного времени. Согласно обзору,

приведенному в [9, 20], перехват снега пологом древостоя в еловых лесах может достигать 45%, а в сосновых – 30%, и почти весь задержанный снег испаряется. Высота снежного покрова в лесу обычно выше, чем на открытых участках. Однако отношение запасов воды в снежном покрове в лесу и в поле значительно различается для разных типов леса и зависит от предшествующих метеорологических условий [1, 18, 20]. Средняя интенсивность снеготаяния в лесу может быть в 2–6 раз ниже, чем на открытых участках, и это отношение изменяется в течение всего периода снеготаяния [3].

Почвы водосборов, покрытых лесом, обычно имеют высокую проницаемость, что приводит к сокращению поверхностного стока и увеличению запасов грунтовых вод. В результате этого увеличение лесистости водосбора способствует снижению максимального расхода и объема весеннего стока и повышению меженного стока. В то же время во многих исследованиях при рубке леса наблюдалось увеличение максимального расхода и объема паводков и половодий, а меженный сток уменьшался или полностью прекращался на малых лесных реках. Эти эффекты, на основании которых развились представления о водорегулирующей и водоохранной роли леса, относятся только к сезонному стоку, однако некоторые авторы, например, В.В. Рахманов [6], утверждают, что водоохранная роль леса распространяется на весь гидрологический год, и лес всегда увеличивает годовой сток. На основании обработки данных о стоке по 433 парам лесных и безлесных речных бассейнов Европейской территории России сделан вывод, что в зонах с достаточным увлажнением, где испарение зависит главным образом от метеорологических условий, число случаев превышения годового стока на лесных реках по сравнению с безлесными реками может преобладать [2]. Однако результаты большинства экспериментальных исследований, в особенности зарубежных (что возможно связано с отличиями от России климатическими условиями), указывают на увеличение годового стока после вырубке леса, что в первую очередь объясняется сокращением суммарного испарения за счет уменьшения транспирации. Например, по данным многолетних экспериментальных исследований, проведенных Коветтской гидрологической лабораторией в Южных Аппалачских горах, сведение лесного покрова снижает не только годовой, но и месячный сток [21].

Согласно О.И. Крестовскому [4], который использовал многолетние наблюдения в северо-западной части Европейской России, важное влия-

ние леса на гидрологический цикл и годовой сток имеет возраст древостоя, определяющий интенсивность транспирации. В первые 10–15 лет после вырубке старого древостоя, когда молодой лес восстанавливается, суммарное испарение резко уменьшается и годовой сток увеличивается. В период интенсивного развития древостоя в возрасте от 15–20 до 50–60 лет испарение с лесных массивов увеличивается и годовой сток начинает снижаться. Далее по мере старения леса испарение вновь уменьшается и сток начинает возрастать до средних значений для безлесных водосборов. Аналогичные экспериментальные выводы сделаны и для некоторых других физико-географических условий. Например, 50-летние наблюдения на водосборе Брамке в горах Гарца (Германия) показали, что коэффициент стока снижается на этом водосборе в процессе развития древостоя от 66% до 47%, а суммарное испарение увеличивается от 34% до 53% [19]. По данным многолетних наблюдений на 14 парных лесных и полевых малых водосборах, расположенных в северо-восточной и южной части США [14, 16], в первые 5 лет после вырубке деревьев сток заметно увеличивается; однако это увеличение может значительно изменяться в зависимости от возраста и состава древостоя, климатических условий, и в некоторых случаях было зафиксировано даже уменьшение стока. По данным наблюдений в Китае [22], в первые 10 лет после вырубке леса речной сток увеличивается, но затем по мере восстановления леса сток постепенно уменьшается.

Различия в оценках влияния леса на гидрологический цикл, очевидно, можно объяснить как физико-географическими особенностями изучавшихся лесных бассейнов, так и различной технологией экспериментальных исследований. Изучение влияния леса на гидрологический цикл проводится обычно путем сравнения данных о стоке на парных репрезентативных водосборах или путем сопоставления гидрологического цикла до и после рубки леса на одном и том же водосборе. В обоих этих подходах заложены возможности значительных ошибок в определении изменений составляющих водного баланса, так как физико-географические условия на парных водосборах всегда имеют некоторые различия, а при оценке изменений этих составляющих на одном и том же водосборе на основе данных наблюдений до и после рубки леса может возникнуть ошибка из-за неучтенных изменений метеорологических условий. Поэтому для оценок влияния леса на гидрологический цикл представляется перспективным

использование физико-математических моделей гидрологического цикла лесных водосборов, описывающих взаимодействие гидрологических, почвенных и биологических процессов и позволяющих учитывать изменения состояния водосбора и климата. Однако из-за разнообразия описываемых процессов и недостатка необходимой экспериментальной информации создание таких моделей является одной из самых сложных задач в моделировании окружающей среды, и этим можно объяснить сравнительно медленное продвижение на пути ее решения. Модели процессов, происходящих на лесном водосборе, в основном разрабатывались только для вертикального или горизонтального движения воды, а также отдельно для летнего и зимнего периодов. Наибольшее количество таких моделей связано с суммарным испарением и вертикальным переносом влаги на лесных участках [10, 11, 16, 17]. Многие публикации посвящены поверхностному или подповерхностному стоку на лесных водосборах (их обзор приведен в [8]). В то же самое время имеются лишь несколько исследований, где горизонтальные и вертикальные гидрологические процессы на лесном водосборе рассматриваются совместно [5, 24].

В данной работе сделана попытка построить физико-математическую модель гидрологического цикла и формирования стока на лесном водосборе для всего года и с учетом взаимодействия всех составляющих водного баланса. В качестве примера возможного применения модели проведена оценка возможного изменения гидрологического цикла и стока после полной вырубке леса. Для исследований использовались данные наблюдений на экспериментальном водосборе лога Таежный, расположенном на территории Валдайской водно-балансовой станции в Новгородской обл. (площадь водосбора 0.45 км<sup>2</sup>). Водосбор полностью залесенный с преобладанием ели при незначительном участии березы, осины и ольхи. Годовое количество осадков составляет 780 мм. Снежный покров обычно наблюдается с последней трети ноября по вторую половину апреля. Почвы подзолистые, сформировались в основном на супеси и иловатом суглинке. Гидрографическая сеть водосбора хорошо развита, однако врез русла реки неглубокий и грунтовые воды на территории водосбора не разгружаются. Гидрометеорологические данные включали 3-часовые измерения осадков, температуры и влажности воздуха, облачности, скорости ветра, среднесуточные величины стока, 5-дневные измерения влажности и температуры почвы, испарения почвенной влаги и транс-

пирации ели, 10-дневные измерения плотности снега, высоты снежного покрова и глубины промерзания.

**Модель процессов гидрологического цикла и формирования стока на лесном водосборе**

*Перехват жидких осадков пологом древостоя, суммарное испарение и динамика влажности почвы в теплый период года.* Предполагается, что доля  $U_k$  жидких осадков достигает непосредственно поверхности почвы; остальная часть  $(1 - U_k)$  перехватывается кронами деревьев и может временно задерживаться, испаряться или стекать под полог древостоя. Также предполагается, что емкость крон, в которой задерживается вода, экспоненциально зависит от доли увлажненной поверхности крон. В этом случае количество осадков  $P_s$ , попадающих под полог древостоя в момент времени  $t$  от величины осадков  $P_f$  определяется как

$$P_s = P_f \cdot U_k + (P_f - E_w) \eta (1 - U_k) \quad (1)$$

где  $\eta = 1 - \exp(-S/W_{cm})$  – относительная доля площади поверхности кроны, с которой вода стекает под полог древостоя,  $S = \int_0^t (P_f - E_w) dt$ ,  $E_w$  – испарение с увлажненной поверхности крон, которое вычислялось как

$$E_w = \rho_a \frac{q^*(T_f) - q_a}{r_a} \eta \cdot (1 - U_k) \quad (2)$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $q_a$  – удельная влажность воздуха,  $q^*(T_f)$  – насыщенная удельная влажность воздуха при температуре листьев  $T_f$ ,  $r_a$  – аэродинамическое сопротивление водяного пара поверхности листьев,  $W_{cm}$  – максимальная водоудерживающая емкость крон.

Транспирация влаги с неувлажненных листьев находилась по формуле

$$E_f = \rho_a \frac{q^*(T_f) - q_a}{r_a + r_s} \cdot LAI \quad (3)$$

где  $LAI$  – листовой индекс,  $r_s$  – устьичное сопротивление, рассчитываемое как

$$r_s = r_0 \frac{\theta_f - \theta_r}{\theta - \theta_r} \left( 1 + \frac{\gamma}{PAR} \right) \quad (4)$$

где  $r_0$  – устьичное сопротивление при полностью открытых устьицах,  $\theta$  – объемная влажность почвы,  $\theta_f$  – полевая влагемкость,  $\theta_r$  – остаточная влажность почвы,  $PAR$  – фотосинтетически активная радиация,  $\gamma$  – эмпирический коэффициент.

Испарение с почвы, на которой отсутствует растительность,  $E_g$  определялось как

$$E_g = \rho_a \frac{r \cdot q^*(T_g) - q_a}{r_{ag}} \quad (5)$$

где  $r_{ag}$  – сопротивление испарению с почвы,  $T_g$  – температура поверхности почвы,  $r$  – относительная влажность воздуха на поверхности почвы. Значение величины  $r$  определяется выражением

$$r = \exp\left[\frac{M \cdot g \cdot \Psi(\theta)}{R \cdot (T_g + 273)}\right], \text{ где } M - \text{ молекулярный}$$

вес воды,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\Psi(\theta)$  – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги на поверхности почвы.

Вертикальный перенос влаги в почве описывался уравнением Ричардса в диффузионной форме

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] - S_k(\theta, z), \quad (6)$$

где  $K(\theta)$  – гидравлическая проводимость почвы,  $D(\theta)$  – коэффициент диффузии почвенной влаги,  $z$  – глубина почвы,  $S_k(\theta, z)$  – отбор воды корневой системой деревьев, определяемой как

$$S_k(\theta, z) = -K(\theta) [\psi_k(\theta) - \psi(\theta)] \rho_k(z), \quad (7)$$

где  $\psi_k(\theta)$  – водный потенциал корневой системы,  $\rho_k(z)$  – плотность корней. Принимается, что  $\rho_k(z) = \rho_0 \exp(-k_1 z)$ , где  $\rho_0$  – плотность корней в верхнем почвенном слое,  $k_1$  – эмпирическая константа.

Температура почвы  $T_g$  и температура листьев  $T_f$  вычислялась из уравнения баланса тепла для кроны и листьев. Система (1) – (7) решалась численно с использованием неявной разностной схемы, описанной в [15].

*Формирование снежного покрова и снеготаяние в лесу.* Использованная в этой работе физико-математическая модель снежного покрова включает описания перехвата снега кронами деревьев, испарения перехваченного снега и его обрушения с крон деревьев, накопления снега, снеготаяния и испарения снега с поверхности почвы с учетом влияния характеристик растительного покрова (плотности и строения древостоя, его возраста и др.). Модель описана в [13], где она использовалась для моделирования вышеперечисленных снежных процессов на логе Таежный и на соседнем открытом логе Усадьевский (площадь последнего составляет 0.36 км<sup>2</sup>)

*Вертикальный перенос тепла и влаги в мерзлой почве.* Вертикальные потоки тепла и влаги в поч-

ве при замерзании и оттаивании почвы описываются следующими уравнениями [12]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_l \frac{\partial I}{\partial z} - K(\theta, I) \right) \quad (8)$$

$$c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_w c_w \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_l \frac{\partial I}{\partial z} - K(\theta, I) \right) \frac{\partial T}{\partial z} + \rho_w \chi \frac{\partial W}{\partial t} \quad (9)$$

где  $W$ ,  $\theta$  и  $I$  – общее содержание влаги, содержание жидкой влаги и содержание льда в почве соответственно;  $W = \theta + \frac{\rho_i}{\rho_w} I$ ;  $T$  – температура почвы;

$\lambda$  – теплопроводность почвы;  $D = K(\theta, I) \left( \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right)_i$ ;

$D_l = K(\theta, I) \left( \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right)_\theta$ ;  $c_T = c_{eff} + \rho_w L \frac{\partial \theta}{\partial T}$ ;  $c_{eff}$  – теп-

лоемкость воды,  $\chi$  – удельная теплота плавления льда,  $K(\theta, I)$  – гидравлическая проводимость мерзлой почвы.

*Поверхностный и подповерхностный сток.*

При моделировании поверхностного и подповерхностного стока на водосборе лог Таежный, принимая во внимание его малые размеры, площадь водосбора схематизировалась в виде прямоугольных площадок, примыкающих к главному руслу. Поверхностный сток вдоль каждой площадки описывался уравнениями:

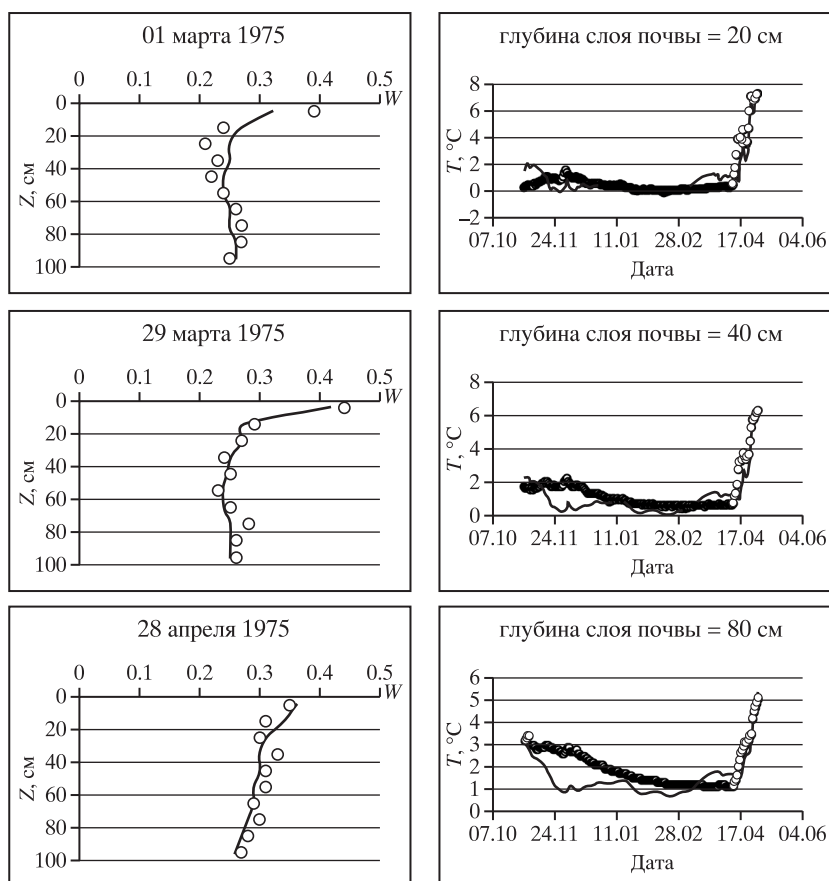
$$L = \frac{dh}{dt} = RL - q_l, \quad (10)$$

$$h = \frac{m}{m+1} \left( \frac{q_l n_l}{i_l^{0.5}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (11)$$

где  $h$  – средняя глубина воды на склоне,  $m = 5/3$ ,  $L$  – длина склона;  $R$  – интенсивность поступления воды на склон;  $q_l$  – интенсивность поступления воды со склона на участок русла;  $i_l$  – уклон склона;  $n_l$  – коэффициент шероховатости Маннинга для склона.

Принималось, что нижняя граница почвенного слоя слабопроницаема и вертикальный поток влаги через нее определяется только ее гидравлической проводимостью.

Предполагалось, что горизонтальное перемещение воды в почве происходит при влажности почвы больше полевой влагоемкости  $\theta_f$ . Интенсивность питания подповерхностного стока оп-



**Рис. 1.** Профили влажности почвы (слева) и изменения температуры почвы на разных глубинах (справа). Точки – измерения в бассейне лог Таежный; линии – результаты моделирования.

ределяется как  $R_g = \frac{\partial}{\partial t}[(\theta - \theta_f)z_p]$ , где  $z_p$  – слой почвы, в котором  $\theta > \theta_f$

Подповерхностное стекание описывалось уравнением

$$(\theta_s - \theta_f)L \left( \frac{dh_g}{dt} \right) = R_g L - q_g, \quad (12)$$

$$h_g = \frac{q_g}{2K_g i_l}, \quad (13)$$

где  $q_g$  и  $h_g$  – расход и средняя глубина подповерхностного стекания, соответственно;  $K_g$  – коэффициент горизонтальной проводимости почвы. Принимая во внимание, что время перемещения воды по основному руслу меньше 3 часов (расчетного интервала), мы пренебрегали описанием руслового стекания и находили гидрограф в замыкающем створе как сумму поступления поверхностного и подповерхностного стока в русло.

**Калибровка и верификация модели процессов гидрологического цикла и формирования стока**

**на водосборе лог Таежный.** Калибровка и верификация модели была проведена по данным метеорологических наблюдений за осадками, температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра и облачностью за период с 1 мая 1970 г. по 30 апреля 1975 г. (для этого периода имелись наиболее полные данные).

Большинство параметров модели задавались по данным непосредственных измерений характеристик почвы и растительного покрова на водосборе лог Таежный.

Гидравлическая проводимость  $K(\theta)$  и капиллярно-сорбционный потенциал влаги  $\psi(\theta)$  в (1) рассчитывались по формулам Ван Генухтена [23]. Гидравлическая проводимость и капиллярный потенциал влаги мерзлой почвы определялись путем модификации формул Ван Генухтена для учета содержания в почве влаги в жидкой и твердой фазе [12].

Значения гидравлической проводимости почвы  $K_s$  и гидравлической проводимости почвы на нижней границе  $K_s^*$  при полном насыщении полу-

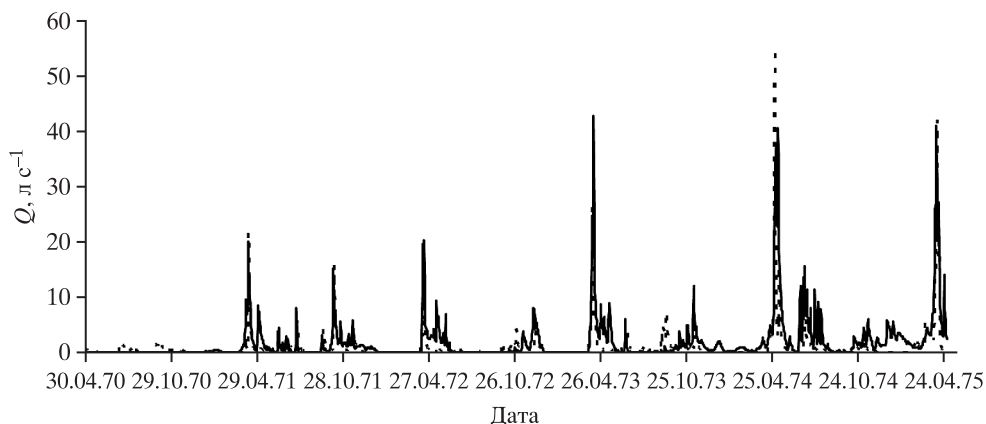


Рис. 2. Измеренные (сплошная линия) и смоделированные (пунктир) гидрографы стока лога Таежный.

чены по результатам калибровки по измеренным почвенным профилям влажности и температуры, а минимальное устьичное сопротивление  $r_0$  – по измеренным величинам суммарного испарения. Параметры модели снега были заданы по [12].

Примеры результатов моделирования суммарного испарения, профилей влажности и температуры почвы с использованием откалиброванных параметров  $K_s$ ,  $K_s^*$  показаны на рис. 1. Калибровка других трех параметров (горизонтальная проводимость почвы  $K_g$ , коэффициент шероховатости Маннинга  $n_s$ , пористость почвы  $\theta_p$ ) проведена по данным измерений стока с лога Таежный. Результаты моделирования показаны на рис. 2. Список использованных в модели параметров и их значений представлен в табл. 1.

#### Оценка чувствительности гидрологического цикла к вырубке леса

Откалиброванная модель гидрологического цикла была использована для проведения численных экспериментов по оценке влияния вырубки леса на гидрологический цикл и формирование речного стока на водосборе лог Таежный. Чтобы учесть возможное влияние вырубки леса на характеристики почвы и шероховатости подстилающей поверхности некоторые значения параметров были определены по измерениям характеристик почвы соседнего безлесного водосбора лог Усадьевский (Табл. 2), физико-географические условия которого не отличаются от условий лога Таежный. Затем по данным гидрометеорологических наблюдений за 17 лет (1967–1983 г.) был смоделирован гидрологический цикл водосбора лог Таежный в его естественном состоянии и в предположении, что весь лес на водосборе вырублен. Некоторые результаты такого моделирования представлены ниже.

**Влияние вырубки леса на формирование снежного покрова и снеготаяние.** Результаты численного моделирования характеристик снежного покрова показывают, что в среднем за 17 лет снеготаяния на водосборе лога Таежный после вырубки леса увеличиваются на 15%, чем на этом же водосборе. Однако эта разница в снеготаянии для леса и безлесных участков претерпевает существенные изменения от года к году (рис. 3,а).

Главной причиной увеличения снеготаяния после вырубки леса может быть разница в интенсивности сублимации на лесном водосборе и на открытом пространстве. Суммарные потери снеготаяния на сублимацию на лесном водосборе оказываются выше, чем на открытых территориях, поскольку большой вклад в этот процесс вносит сублимация снежных шапок на кронах деревьев (рис. 3,б).

Рассчитанные средние интенсивности таяния снежного покрова за холодный период каждого года представлены на рис. 3,в. По данным наблюдений за все годы интенсивность снеготаяния на лесных участках меньше, чем на открытых участках, а продолжительность снеготаяния в среднем на 10 дней дольше.

**Влияние вырубки леса на гидротермический режим почвы в холодный период года.** Проведенные численные эксперименты позволили оценить влияние вырубки леса на промерзание почвы. Увеличение длинноволнового излучения после вырубки леса обуславливает увеличение глубины промерзания почвы, однако повышение снеготаяния уменьшает этот эффект. Промерзание почвы на открытых участках оказывается более чувствительным к метеорологическим условиям, чем на лесных участках. На открытых участках почва промерзает на большую глубину, чем

на лесных, однако в процессе промерзания год от года наблюдаются существенные различия.

**Влияние вырубki леса на формирование речного стока.** По результатам моделирования средний годовой сток за 17 лет с лесного водосбора лога Таежный (181 мм) оказывается несколько выше среднего годового стока с этого водосбора после вырубki леса (166 мм). Гидрографы стока,

**Таблица 1.** Список параметров, использованных в модели

Математический символ	Физическое значение	Численная величина
$I - U_k$	Плотность древостоя	0.65
$LAI, м^2м^{-2}$	Индекс листовой поверхности древостоя	2.0
$W_{cm}, м$	Максимальная емкость перехвата	$0.2 \times 10^{-3}$
$\rho_0, м^{-2}$	Параметры в уравнении (7)	1000
$k_1, м^{-1}$		2.5
$r_0, с/м$		160
$\theta_s$	Пористость почвы	0.480
$\theta_r$	Остаточная влажность почвы	0.035
$\theta_f$	Полевая влагоемкость почвы	0.305
$\alpha, см^{-1}$	Параметры формулы Ван Генухтена [23]	0.075
$n$		1.89
$K_s, м/с$	Гидравлическая проводимость при полном насыщении на приповерхностном слое почвы	$2.8 \times 10^{-5}$
$K_s^*, м/с$	Гидравлическая проводимость при полном насыщении на нижней границе почвы	$1.0 \times 10^{-7}$
$K_g, м/с$	Горизонтальная гидравлическая проводимость почвы	$9.2 \times 10^{-3}$
$n_s, с/м^{1/3}$	Коэффициент шероховатости Маннинга для поверхностного стока	0.22

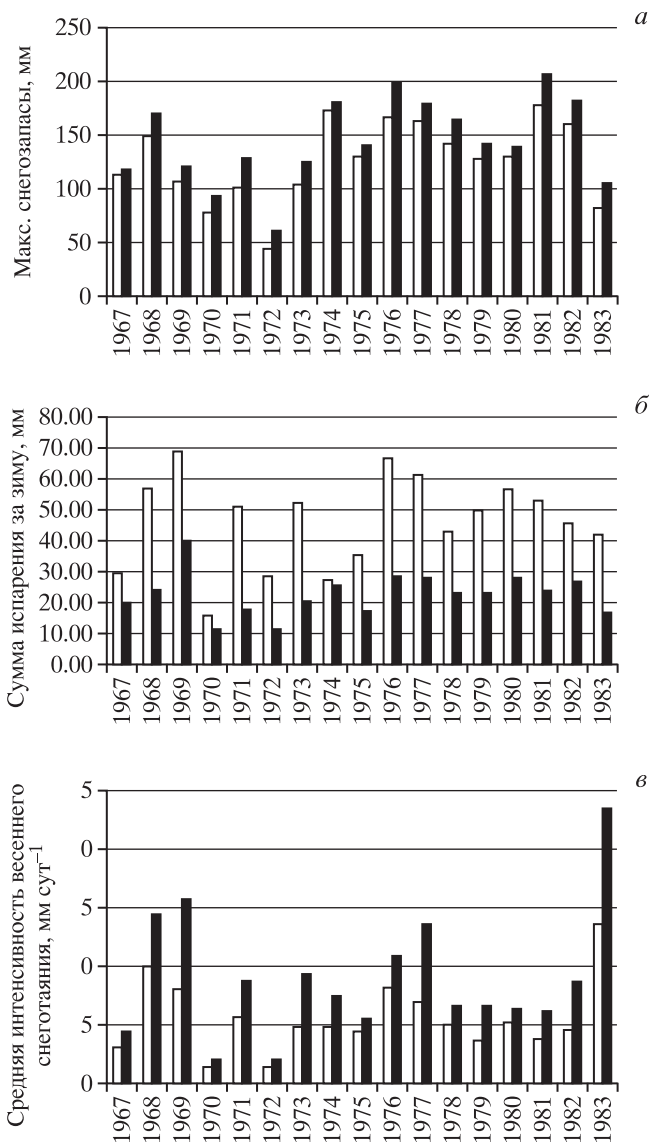
**Таблица 2.** Значения параметров модели, использованные в расчетах гидрологического цикла лога Таежный с учетом рубки на нем древостоя

Математический символ	Физическое значение	Численная величина
$\theta_s$	Пористость	0.410
$\theta_f$	Полевая влагоемкость	0.33
$\theta_r$	Остаточная влажность	0.078
$\alpha, см^{-1}$	Параметры формулы Ван Генухтена	0.036
$n$		1.57
$K_s, м/с$	Гидравлическая проводимость при полном насыщении в приповерхностном слое почвы	$3.9 \times 10^{-6}$
	Гидравлическая проводимость при полном насыщении на нижней границе почвы	$3.9 \times 10^{-6}$
$K_g, м/с$	Горизонтальная проводимость почвы	$9.2 \times 10^{-3}$
	Коэффициент шероховатости почвы для поверхностного стока	0.16

рассчитанные по метеорологическим данным за период с 1970 по 1973 г. для лесного и безлесного водосборов, показаны на рис. 4. Максимальные расходы весеннего половодья, сформированные на лесном водосборе, в среднем на 50% ниже. Начало половодья задерживается на 5–7 дней, наблюдается более медленное снижение расходов половодья.

В настоящее время около 80% процентов общего объема стока с водосбора лога Таежный представляет подповерхностный сток; поверхностный сток наблюдается только в период интенсивных осадков, выпадающих на увлажненную почву в осенний период, или в начале снеготаяния. После вырубki леса на водосборе лога Таежный будет преобладать поверхностный сток.

**Чувствительность процессов гидрологического цикла к изменению LAI и возраста древостоя.** Величина LAI (листовой индекс) в значительной мере отражает возраст древостоя. Например, в процессе роста елового леса значение LAI увеличивается от 0.5 до 5.0 при достижении спелости древостоя, а затем постепенно снижается до 2.0 для перестойного древостоя. С возрастом



**Рис. 3.** Влияние рубки леса на: запасы воды в снежном покрове перед началом весеннего половодья (а); испарение снега (б); интенсивность таяния снега (в). Белые прямоугольники – лесные участки; черные – вырубка.

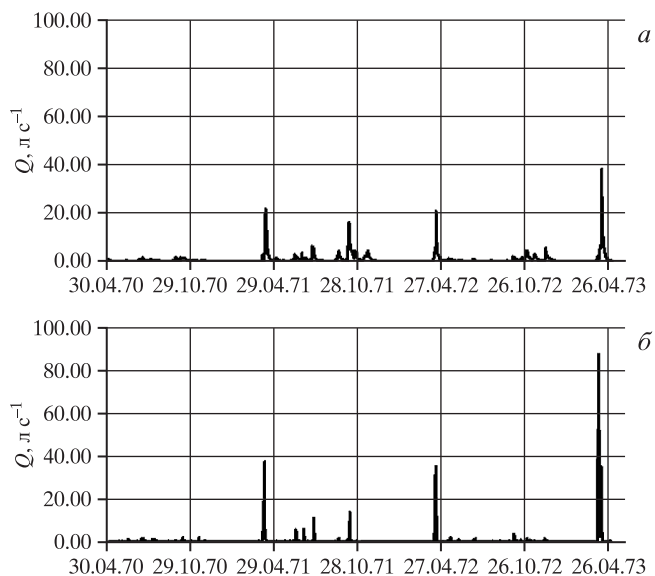
древостоя изменяются также емкость перехвата жидких и твердых осадков, проникновение коротковолновой радиации, транспирация, испарение с поверхности почвы. Для оценки изменений процессов гидрологического цикла, обусловленных различным возрастом древостоя, производилось моделирование гидрологических процессов по данным метеорологических наблюдений в теплый и холодный периоды года при разных значениях *LAI*.

В табл. 3 приведены результаты численных экспериментов по оценке чувствительности процессов гидрологического цикла к величине *LAI*,

которые проводились по данным метеорологических наблюдений в теплый период (с 24 мая по 15 сентября) лет с 1971 по 1973. Согласно полученным результатам, транспирация средневозрастного древостоя (*LAI* = 5) превышает транспирацию молодняка (*LAI* = 1) на 32–35% и спелого древостоя (*LAI* = 2) на 6–18%. В молодняке и средневозрастном древостое эвапотранспирация выше, чем в спелом древостое, соответственно на 3–21 и 4–12%. Дождевой сток в рассматриваемый период был очень мал (сопоставим с точностью моделирования).

При исследовании влияния изменения *LAI* на формирование снежного покрова на водосборе лог Таежный значение *LAI* изменялось от 0.5 до 4.0, что обусловило значительные изменения в величинах перехвата твердых осадков и поступлении коротковолновой радиации. Максимальные снегозапасы перед началом весеннего половодья по результатам моделирования за 17 лет оказываются весьма чувствительными к величине *LAI*: максимальные снегозапасы снижаются на 30% при восьмикратном увеличении величины *LAI*.

Оценка чувствительности талого стока к изменению *LAI* была проведена по данным метеорологических наблюдений за период 1971–1975 гг. Результаты моделирования показывают, что объем талого стока незначительно повышается с увеличением *LAI* от 0.5 до 1.6 и затем снижается при продолжающемся росте *LAI* до 5.0. Такое поведение талого стока объясняется тем, что при малых значениях *LAI* потери на перехват твердых осадков кронами деревьев компенсируются



**Рис. 4.** Влияние рубки леса на сток с лесного водосбора (а) и незалесенного водосбора (б).



**Таблица 3.** Влияние *LAI* на составляющие водного баланса водосбора лога Таежный по результатам моделирования за период с 24 мая по 15 сентября, мм

	Годы								
	1971			1972			1973		
	<i>LAI</i>			<i>LAI</i>			<i>LAI</i>		
	1	5	2	1	5	2	1	5	2
Количество осадков	340	340	340	118	118	118	316	316	316
Транспирация	154.2	237.6	193.5	119.3	174.6	164.4	158.1	245	208.6
Испарение с поверхности почвы	146.3	2.2	23.8	76	1.2	12.3	126.1	2.5	22
Испарение осадков, перехваченных кронами деревьев	33.8	71	58	14.6	35.5	26.1	30	61	52.1
Рассчитанное суммарное испарение	334.3	310.8	275.3	209.9	211.3	202.9	314.2	308.5	282.7
Измеренное суммарное испарение	–	–	268	–	–	238	–	–	225

увеличением снегозапасов из-за теневого эффекта лесного массива. Однако с ростом *LAI* потери на перехват существенно увеличиваются и уже не компенсируются тeneвым эффектом леса. Следует особо подчеркнуть, что немонотонное изменение талого стока при принятом увеличении *LAI* обычно наблюдается при разных метеорологических условиях, но размеры и интенсивность этих изменений могут быть различными.

**Заключение.** Экспериментальные исследования влияния леса на гидрологический цикл и формирование стока по наблюдениям на парных лесных и полевых репрезентативных водосборах или путем сравнения данных наблюдений до вырубki леса и после вырубki обеспечивают возможность получения только весьма грубых оценок гидрологической роли леса, так как физико-географические условия на парных водосборах всегда имеют некоторое различие, а экспериментальные исследования изменения гидрологического цикла с использованием данных до вырубki и после могут также давать значительные ошибки из-за неучета изменений климатических условий. Ввиду этого представляется перспективным использование для оценок влияния леса на гидрологический цикл физико-математических моделей гидрологического цикла лесных водосборов, описывающих взаимодействие гидрологических, почвенных и биологических процессов и позволяющих учитывать изменения состояния водо-

сбора и климата. Однако создание таких моделей затруднено из-за разнообразия описываемых процессов и недостатка необходимой экспериментальной информации. Представленную в данной статье модель гидрологического цикла лесного водосбора можно рассматривать как один из этапов решения этой задачи. Разработанная физико-математическая модель воспроизводит гидрологический цикл и формирование речного стока на лесном водосборе для всего гидрологического года и включает описание основных гидрологических процессов: перехват жидких и твердых осадков пологом древостоя, снегонакопление и снеготаяние, вертикальный влагоперенос и суммарное испарение, поверхностный, подповерхностный и русловой сток. Значения большинства параметров модели были заданы непосредственно по данным измерений характеристик водосбора. Проведена верификация модели по данным гидрометеорологических наблюдений на полностью залесенном экспериментальном водосборе и выполнена оценка чувствительности гидрологического цикла к вырубке леса на этом водосборе. Полученные оценки достаточно хорошо согласуются с оценками, полученными на основе экспериментальных исследований. Возможности применения разработанной модели зависят от наличия информации по характеристикам почвы и леса на водосборе и сохранения значений откалиброванных параметров после изменения землепользования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вершинина Л.К.* Снегонакопление на открытых и залесенных речных водосборах. Труды Гидрологического института. 1972. Т. 194. С. 93–119.
2. Влияние леса на водные ресурсы / Под ред. С.Е. Вомперского и П.Ф. Идзона. М.: Наука, 1976. 166 с.
3. *Комаров В.Д.* Талый сток на Европейской территории СССР., М.: Гидрометеиздат, 1959. 294 с.
4. *Крестовский О.И.* Влияние вырубки леса и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 117 с.
5. *Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А.* Чувствительность гидрологических систем. М.: Наука, 1990. 143 с.
6. *Рахманов В.В.* Лесная гидрология. Итоги науки и техники. Лесоведение. ВИНТИ: 82. 1981. 121 с.
7. *Соколов А.А.* О чем шумит русский лес. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 96 с.
8. *Bonell M.* Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale // J. Amer Water Resources Association. 1998. V 34. N 4. P. 765–785.
9. *Essery R, Pomeroy J.W.* Sublimation of snow intercepted by coniferous forest canopies in a climate model // Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models (ed. Dolman, Hall, Kavvas et al.) IAHS Publ. No. 270, Wallingford: 2001. IAHS Press. P. 343–347.
10. *Emanuel R.E., D'Odorico P.D., Epstein H.E.* A dynamic soil water threshold for vegetation water stress derived from stomatal conductance models // Water Resources Research. 2007. V. 43: WO3431, DOI: 10.1029/2005WR004831.
11. *Feddes R.A., Hoff H., Bruen M., Dawson T., de Rosnay P., Dirmeter P., Jakson R.B., Kabat P., Kleidon A., Lilly A., Pitman A.* Modeling root water uptake in hydrological and climate models. // Bulletin of the American Meteorological Society. 2001. V. 82. P. 2797–2809.
12. *Gelfan A.N.* Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parameterization by basic soil data // M. Sivapalan et al. (Eds) Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress. Proc of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguazu, Brasil, April 2005. IANS Publ., 303, 2006. P. 293–304.
13. *Gelfan A.N., Pomeroy J.W., Kuchment L.S.* Modeling forest cover influences on snow accumulation sublimation and melt // J. Hydrometeorology. 2004. V. 5. N. 5. P. 785–803.
14. *Jones J.A., Post D.* Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and re-growth in the northwest and eastern United States // Water Resour. 2004. V. 40, W05203, doi: 10.1029/2003WR002952.
15. *Kuchment L.S., Startseva Z.P.* Sensitivity of evapotranspiration and soil moisture changes in climate and direct effects of carbon dioxide // J Hydrol. Sciences. 1991. V. 36. N. 6. P. 631–643.
16. *Kuchment L.S., Demidov V.N.* Modeling of influence of hydrological processes on the carbon cycle of a forest ecosystem // Environment modeling and software. 2006. V. 21: P. 111–114.
17. *Le Maitre D.C., Versfeld D.B.* Forest evaporation models: Relationships between stand growth and evaporation // J. Hydrology. 1997. V. 193. P. 240–257.
18. *Murray C.D., Buttle J.M.* Impact of clear cut harvesting on snow accumulation and melt in a northern hardwood forest // J. Hydrology. 2003. V. 271. P. 197–212.
19. *Schwarze R., Herrmann A. and Mendel O.* Regionalization of runoff components for Central European basins // IAHS Publ. 221, 1994. Wallingford. P. 493–502.
20. *Pomeroy J.W., Gray D.M.* Snowcover: accumulation, relocation and management // NHRI Science Report No. 7. National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1995. 135 p.
21. *Swank W.T., Swift L.W., Douglass J.E.* Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances // Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. NY.: Springer. 1988. P. 297–312.
22. *Cai Tijiu, Tan Xiaojing* Impact of forest harvesting on river runoff in the Xiaoxing'an Mountains of China. Frontiers of Forestry in China. 2007. V. 2, N 2. P. 143–147.
23. *Van Genuchten M.Th.* A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil. Soc. J. 1980. V. 44. P. 892–898.
24. *Wigmosta M.S., Vail L.W., Lettenmaier D.P.* A distributed hydrology – vegetation model for complex terrain // Water Res. Res. 1994. V. 30. N 6. P. 1665–1679.

## **A Model for the Hydrological Cycle of a Forested Catchment and Assessment of Changes in the Water Balance in Cuttings**

**L. S. Kuchment, A. N. Gelfan, V. N. Demidov**

A physico-mathematical model of the hydrological cycle of a forested catchment has been elaborated. This model includes a description of interception of liquid and solid precipitation by tree crowns, snow accumulation and thawing, vertical transfer of moisture in soil and its evaporation, surface, subsurface, and channeled runoff. The calibration and verification of the model were carried out using the data of experimental observations on a completely forested catchment in the territory of the Taiga Valdai Water-Balance Station. Later on, this model was used for the assessment of possible changes in the hydrological cycle after clear cuttings on the same catchment. The values of the model parameters were compared to the corresponding soil characteristics in the adjacent treeless (field) territory of the Usadievskii catchment. According to the modeling results, after cutting on the catchment investigated, the mean water reserves in the snow cover before thawing could increase by 15%. Losses for snow sublimation are reduced almost by two times. The intensity of thawing increases by 30%, and the duration of snow thawing decreases by 10 days. The annual runoff after cutting increases by 7–10%; the seasonal distribution of the runoff and constituents of the water balance changes to a great extent. On the forested catchment, during spring high water, the maximal water discharge becomes 50% lower than that after forest cutting. The duration of spring high water after cutting is reduced by 5–7 days. Changes in the hydrological cycles depending on changes in the leaf index related to the age of stands were also studied.

*Hydrological cycle, river runoff, runoff modeling, forest watershed, impact of forest cutting upon runoff.*