

1 -го до 10-15 суток) практически отсутствуют, в отличие от осциллирующих осадков. Обусловлено это тем, что на сток реки в замыкающем створе влияет трансформация стокообразования на разных участках территории бассейна во время стекания воды в пределах расчетных ячеек и речной сети.

Спектральные плотности суммарного испарения в значительно меньшей степени отличаются от $S(f)$ осадков, чем от $S(f)$ речного стока. Несколько уменьшается амплитуда высокочастотных гармоник, соответствующих частотам синоптического временного масштаба (10-15 суток), что связано с наличием некоторого буфера, немного сглаживающего высокочастотные осцилляции испарения, вызванные климатическим шумом. Летом таким буфером являются влагозапасы почвы, от которых в определенной степени зависит значение суммарного испарения (особенно транспирации), зимой – снежный покров, поддерживающий влажность воздуха у подстилающей поверхности на уровне насыщения.

Литература

1. Braun M., Caya D., Frigon A., Slivitzky, M. Internal variability of Canadian RCM's hydrological variables at the basin scale in Quebec and Labrador, J. Hydrometeorol. 2012. V. 13, p. 443–462.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука. 2010. 328 с.
3. Gelfan A., Semenov V. A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev, E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by the internal atmospheric variability. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 12, p. 2305-2348, doi:10.5194/hessd-12-2305-2015, 2015.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТАЛОГО СТОКА РАВНИННОЙ РЕКИ (на примере реки Дон)

Демидов В.Н.

Институт водных проблем РАН, г. Москва

balber@mail.ru

Введение. Представлена физико-математическая модель формирования талого стока р. Дон до замыкающего створа с. Казанская

(102000 км²), включающая пространственное описание следующих процессов: формирование и таяние снежного покрова, вертикальный влагоперенос в талой почве, испарение, промерзание почвы, впитывание в мерзлую почву, задержание в бессточных формах рельефа, склоновый сток по поверхности водосбора, подповерхностное стекание, движение грунтовых вод в пределах речного склона, неустановившееся движение водных масс по разветвленной русловой сети. Для р. Дон характерна большая изменчивость потерь талых вод на впитывание в почву от года к году в зависимости от глубины промерзания и запасов влаги в почве. За 20 лет (1971-1990 гг.) наблюдений за стоком максимальный расход весеннего половодья у г. Лиски изменялся от 360 до 6220 м³/с, а слой стока – от 28 до 149 мм.

Характеристика водосбора и его схематизация. Водосбор р. Дон до ст-цы Казанская расположен преимущественно в лесостепной зоне Европейской части России. Длина реки на изучаемом участке 1015 км. Дон является типичной равнинной рекой. Русло реки имеет плавный продольный профиль с уклонами, постепенно уменьшающимися вниз по течению. Почти на всем протяжении Дон имеет разработанную долину с широкой поймой. Долина реки имеет асимметричное строение: правый коренной берег высокий и крутой, а левый – пологий и низменный. Водный режим Дона типичен для рек степной и лесостепной зон. Для него характерно высокое весеннее половодье и низкая межень в остальное время года. В период весенних месяцев проходит более 70% годового стока. Осенний паводок выражен слабо. Летние паводки случаются крайне редко.

Конечно-элементная схематизация водосбора р. Дон до замыкающего створа с. Казанская проведена на основе топографических карт и Цифровой модели рельефа (ЦМР), а также почвенной карты и карты растительного покрова. При схематизации задавались геометрические (ширина, длина, площадь) и гидравлические (уклон, коэффициент шероховатости) характеристики элементов склонов и участков русловой сети. В подготовке и задании этой информации использовалась специальная сервисная программа, которая обрабатывает в определенном порядке координаты узлов и контролирует процесс конечно-элементной схематизации водосборной площади. В программном комплексе подготовки данных и организации расчетов предусмотрено задание до десяти различных информацион-

ных слоев: типы почв, характер землепользования, растительный покров, плотность растительного покрова, индекс площади листьев и другие; контролируется ввод и вывод информации, подключаются необходимые подпрограммы и настраиваются расчетные шаги по времени для разных гидрологических процессов.

В выполненной схематизации гидрография р. Дон представлена основным руслом и 16 притоками. Из них наиболее крупные правые притоки: Красивая Меча, Сосна с ее многочисленными притоками, Ведуга, Девица, Тихая Сосна, Черная Калитва. Среди левых притоков: Воронеж, Битюг, Осередь, Подгорная, Песковатка. В бассейне выделено два типа почв: серые лесные и черноземы выщелоченные.

Моделирование формирования талого стока. Формирование снежного покрова и снеготаяние описывается с помощью модели Ю.Г. Мотовилова [1], позволяющей рассчитывать изменения высоты и плотности снежного покрова от начала зимы до окончания весеннего снеготаяния с учетом поступления твердых и жидких осадков и фазовых переходов в толще снега. Интенсивность снеготаяния принимается пропорциональной положительной температуре воздуха и рассчитывается с использованием эмпирического коэффициента стаивания β , как

$$M = \begin{cases} \beta(T_a - T_{кр}), & T_a > T_{кр} \\ 0, & T_a \leq T_{кр} \end{cases}, \quad (1)$$

где $T_{кр}$ – температура воздуха, ниже которой таяние снега не наблюдается.

Динамика содержания и вертикальный перенос влаги в ограниченном водоупором верхнем почвенном горизонте рассчитывается с помощью уравнения диффузии почвенной влаги

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right), \quad (2)$$

где θ – объемная влажность почвы, $D(\theta)$ – коэффициент диффузии; $K(\theta)$ – вертикальная гидравлическая проводимость.

Интенсивность впитывания воды J_0 определяется следующим образом

$$J_0 = \begin{cases} J_m = (-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K) |_{z=0} & \text{при } J_m \leq R - E \\ R - E & \text{при } J_m > R - E \end{cases}, \quad (3)$$

где J_m - интенсивность инфильтрации при максимальной влажности верхнего слоя почвогрунтов. На нижней границе поток влаги принимается равным гидравлической проводимости.

Предполагается, что формирование подповерхностного стока в верхнем почвенном горизонте происходит при выполнении условия $\theta > \theta_{fc}$. Питание подповерхностного стока определяет накопленная в почвенной колонке влага

$$R_g = \frac{\partial}{\partial t} [(\theta - \theta_{fc})z_p], \quad (4)$$

где z_p - толщина слоя, в котором $\theta > \theta_{fc}$.

Интенсивность испарения почвенной влаги E рассчитывается по формуле:

$$E = K_E d_a(t) \left(\frac{\theta_0 - \theta_r}{P - \theta_r} \right), \quad (5)$$

где d_a - дефицит влажности воздуха; K_E - эмпирический коэффициент, θ_0 - влажность верхнего слоя почвы, P - пористость, θ_r - остаточная влажность.

Потери талого стока C_p на задержание в бессточных формах рельефа определяются по формуле Е.Г. Попова [2]

$$C_p = P_{\max} (1 - \exp((R - J_0)/P_{\max})), \quad (6)$$

где P_{\max} - эмпирический коэффициент задержания влаги.

Впитывание воды J_f в мерзлую почву рассчитывается по формуле В.И.Кулика [3]

$$J_f = J_0 \left(\frac{P - I - \theta_r}{P - \theta_r} \right)^4 (1 + 8I)^2, \quad (7)$$

где I - объемное содержание льда (льдистость) в верхнем слое почвы.

Расчет промерзания почвы основывается на решении обыкновенного дифференциального уравнения, определяющего условия баланса тепла на фронте промерзания, при предположении, что роль миграции влаги в непромерзшей части почвы несущественная и потоком тепла к фронту промерзания можно пренебречь

$$-\lambda_f \frac{T_0}{\xi} = \rho_w L (\theta_+ - \theta_0) \frac{d\xi}{dt}, \quad (8)$$

где λ_f - коэффициент теплопроводности мерзлой почвы, T_0 - температура поверхности почвы, L - удельная теплота фазовых переходов в системе «лед-вода», θ_+ - влажность на фронте промерзания со стороны непромерзшей почвы.

Глубина промерзания почвы на каждом шаге по времени определяется из решения уравнения (8) в виде

$$\xi^{t+1} = \left(\frac{2\lambda_f T_0 \Delta t}{\rho_w L (\theta - \theta_0)} + \xi^2 \right)^{0.5} \quad (9)$$

При наличии снежного покрова температура поверхности почвы T_0 рассчитывается из условия равенства потоков тепла на границе снег-мерзлая почва, как

$$T_0 = T_a \left(1 - \frac{\lambda_f H_s}{\lambda_s \xi} \right)^{-1} \quad (10)$$

Склоновый сток (движение поверхностных, подповерхностных и грунтовых вод) рассчитывается по уравнениям кинематической волны.

Неустановившееся движение воды в основном русле р. Дон рассчитывается с помощью адвективно – диффузионного уравнения [4], а на притоках – по уравнениям кинематической волны.

Организация расчетов и результаты. Расчеты формирования талого стока начинались 1 июня и заканчивались 31 мая в следующем году. Дата начала расчета формирования стока определялась возможностью использования в качестве начальной влажности почвы значения полевой влагоемкости, наблюдавшейся обычно после прохождения половодья. Расчеты охватывали формирование стока в летний, осенне-зимний период и в период половодья. В расчетах использовались ежедневные данные об осадках, температуре воздуха и среднемесячных значениях влажности воздуха по метеостанции г. Воронеж. Гидрофизические характеристики серых лесных почв на лесных участках и черноземов выщелоченных на полевых участках водосбора заданы на основании данных экспериментального материала, полученного Донской экспедицией ГГИ и представленного в [5] (табл. 1).

Таблица 1– Параметры физико-математической модели формирования стока

№п/п	Параметр	лес	поле
<i>Заданные по измерениям и литературным данным</i>			
1	Плотность почвы, г/см ³	1.30	1.10
2	Пористость почвы, см ³ /см ³	0.51	0.54
3	Максимальная гигроскопичность, см ³ /см ³	0.04	0.10
4	Полевая влагоемкость, см ³ /см ³	0.25	0.32
6	Коэффициент горизонтальной фильтрации, м/с	0.01	0.01
7	Коэффициент вертикальной фильтрации в глубокие горизонты почвы, м/с	1.2E-08	1.2E-08
<i>Полученные по результатам калибровки модели формирования снежного покрова</i>			
1	Коэффициент стаивания, мм/с ⁰ С	2.0	3.0
2	Коэффициент k_e в формуле расчета испарения с поверхности снежного покрова, мм мб ⁻¹ сут ⁻¹	0.20	0.20
<i>Полученные по калибровке модели формирования стока по данным о водном режиме</i>			
1	Коэффициент вертикальной фильтрации, м/с	4.63E-06	1.74E-06
2	Коэффициент K_E формуле расчета испарения с почвы, мм мб ⁻¹ сут ⁻¹	1.6	1.6
3	Коэффициент задержания осадков, мм/сут	5.0	5.0
4	Коэффициент шероховатости Маннинга для русловой сети, м/с ^{1/3}	0.07	0.07
5	Коэффициент шероховатости Маннинга для склонов, м/с ^{1/3}	0.1	0.1

Коэффициент теплопроводности снежного покрова определяется в зависимости от его плотности по формуле Абельса. Коэффициенты теплопроводности мерзлой и талой почвы оцениваются в зависимости от влажности в процентах веса сухой почвы и плотности почвы ρ_s по формулам, предложенным в [5, 6].

Коэффициенты стаивания и испарения со снежного покрова были определены по результатам согласования измеренной и рассчитанной высоты снежного покрова. В подборе параметров использовались данные измерений высоты снежного покрова на метеостанции г. Воронеж за период 1971-1980 гг. Наилучшие результаты в расчетах высоты снежного покрова получены при значениях коэффициентов $\beta=3$ мм/(сут⁰С), $k_e=0.2$ мм/(мб сут). Среднее значение

ние коэффициента Нэша-Сатклифа, определенное по результатам расчетов высоты снежного покрова за 20 зимних периодов 1971-1990 гг. получено равным 0.77.

Три наиболее важных параметра: коэффициент вертикальной фильтрации K_0 , коэффициент K_E в формуле (5) и коэффициент задержания осадков C_p , получены по результатам калибровки по данным о водном режиме р. Дон у г. Задонск, г. Лиски, ст-ца Казанская и притока Дона р. Сосна у г. Елец за 10 лет (1971-1980 гг.). О точности расчетов можно судить по сопоставлению рассчитанных и измеренных расходов воды самого высокого половодья 1979 г. в этих гидрометрических створах (рис. 1).

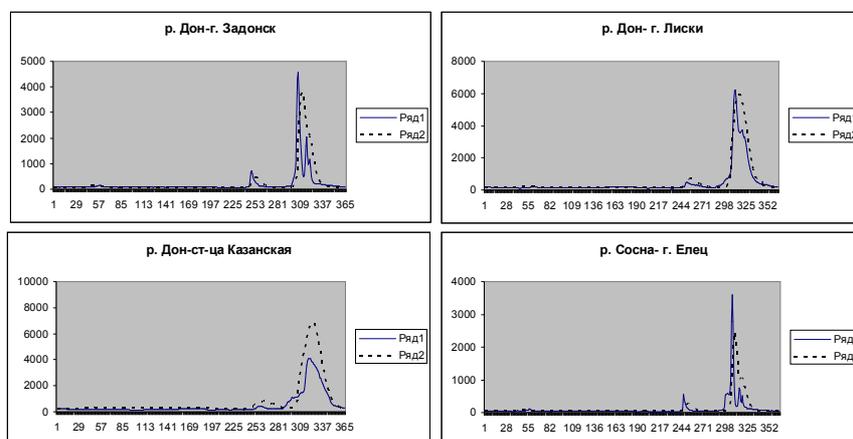


Рис. 1 – Измеренные (1) и рассчитанные (2) расходы воды самого высокого половодья 1979 г. на р. Дон

Проверка модели формирования талого стока на р. Дон проведена по наблюдениям за стоком половодья за последующий десятилетний период (1981-1990 гг.) и результаты ее показаны на рис. 2.

Как показывает анализ рассчитанных гидрографов, в целом модель дает удовлетворительное соответствие рассчитанных и измеренных расходов, хотя для отдельных лет ошибки расчетов оказались значительными.

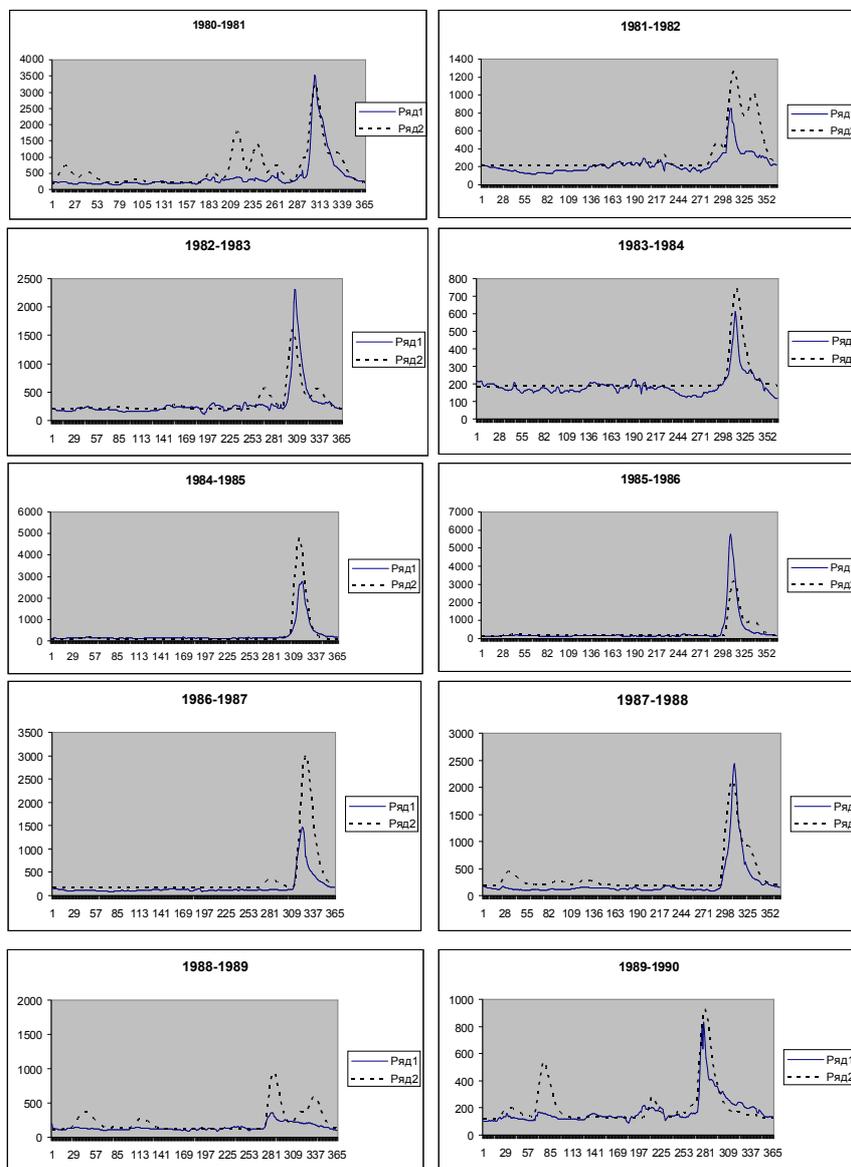


Рис. 2 – Измеренные (1) и рассчитанные (2) расходы воды
р. Дон у г. Лиски

Литература

1. *Мотовилов Ю.Г.* Моделирование снежного покрова и снеготаяние // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / под ред. Кучмента Л.С., Музылева Е.Л. Изд. НГК РАН, 1993. С. 9-37.
2. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М.: Гидрометеозда. 1963. 395 с.
3. *Кулик В.Я.* Инфильтрация воды в почву.– М.: Колос, 1978, 93 с.
4. *Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н.* Пространственная модель формирования тало-дождевого стока горной реки (на примере Верхней Кубани)// Метеорология и гидрология, 2010, № 12, с. 76-87.
5. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Гидрофизические процессы на водосборе. – Санкт-Петербург: Нестор-История, 2012, 616 с.
6. *Иванов Н.С.* Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. – М.: Наука. 1969, 240 с.

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРОГНОЗА СТОКА РЕК РОССИИ И МИРА В XXI ВЕКЕ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО АНТРОПОГЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Добровольский С.Г.
Институт водных проблем РАН, Москва,
sgdo@bk.ru

Основным методом сверхдолгосрочного прогноза изменений стока рек в настоящее время являются расчеты на численных моделях общей циркуляции атмосферы, соединенных с моделями океана, покровного оледенения и поверхности суши (МОЦАО или кратко КМ – климатические модели). Вместе с тем, современные КМ воспроизводят речной сток с заметными, зачастую большими ошибками. Существенными источниками неопределенности оценок изменений стока на протяжении XXI века являются следующие.

- Различия между имеющимися сценариями эмиссии парниковых газов в атмосферу.
- Различия между результатами моделирования климатической системы (в том числе речного стока) на различных КМ.
- Неопределенность в оценке среднего стока рек за «реперный»