

УДК 556.06; 556; 556.166

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕГО АМУРА (НА ПРИМЕРЕ Р. ОНОН)

Лариошкин Виктор Викторович,

Viktor\_L88@mail.ru

Красноярский государственный аграрный университет,  
Россия, 660049, г. Красноярск, ул. Мира, 90.

**Актуальность работы.** Бассейн Амура относится к паводкоопасному региону. Дождевые наводнения в бассейне верхнего Амура, носящие катастрофический характер, наблюдались за последнее столетие 8 раз. Они охватывали одновременно огромные территории, сопровождалась человеческими жертвами, разрушением жилых и производственных зданий, инженерных коммуникаций. Эффективным способом борьбы с наводнениями является регулирование речного стока путем создания водохранилищ. Существующих водохранилищ в речной системе Амура не хватает, чтобы эффективно регулировать сток воды. Их строительство предусмотрено в планах дальнейшего освоения региона. Прогнозы притока паводковых вод являются одной из ключевых задач, позволяющих минимизировать ущерб от паводков и определить наиболее рациональный режим эксплуатации существующих и вновь создаваемых водохранилищ.

**Цель работы:** на примере реки Онон исследовать процессы формирования наводнений и разработать методику их краткосрочного прогноза в бассейне верхнего Амура.

**Методы исследования:** методы водного баланса, географо-гидрологические, статистические, математическое моделирование процессов формирования стока.

**Результаты.** Для реализации прогноза ежедневных расходов (уровней) воды дождевых паводков адаптирована концептуальная модель Д.А. Буракова, используемая в сибирских подразделениях Росгидромета. В качестве ландшафтно-гидрологической основы построения модели принято деление бассейна на районы и высотные зоны. Исходной территориальной единицей осреднения гидрометеорологических характеристик в бассейнах горных рек является высотная зона. В пределах высотной зоны территориальная неравномерность распределения запасов снега и емкостного поглощения воды учитывается с помощью распределений вероятности. Отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна превышает суточное испарение и просачивание, образуют последовательные паводкообразующие периоды. Для каждого суток паводкообразующего периода рассчитывается водоотдача высотных зон на основе инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова, гравитационный запас воды на склонах и приток в русловую сеть. В основу модели расчета добегающего притока воды по русловой сети положен интеграл свёртки (генетическая формула паводка). В результате выполненных исследований разработана методика прогноза ежедневных уровней воды в русловой системе р. Онон. Испытания методики в оперативном режиме в Читинском гидрометеорологическом центре показали ее эффективность.

### Ключевые слова:

Дождевые паводки, уровни воды, наводнения, концептуальная математическая модель формирования стока, гидрологические прогнозы.

### Введение

Высокие, порой катастрофические наводнения в бассейне Амура, вызванные муссонными дождями, – характерная особенность гидрологического режима этой великой реки. Практически каждый год на одном или нескольких ее притоках формируются опасные паводки. Если они проходят одновременно на большинстве притоков, то затопления охватывают огромные территории. В этих условиях изучение паводковых наводнений и разработка методов их прогноза представляют не только научный, но и практический интерес. Цель настоящей работы – исследование условий формирования дождевых паводков в теплое время года и разработка методики краткосрочных (1–7 суток) прогнозов уровня воды в бассейне Верхнего Амура на примере р. Онон.

### Объект исследования

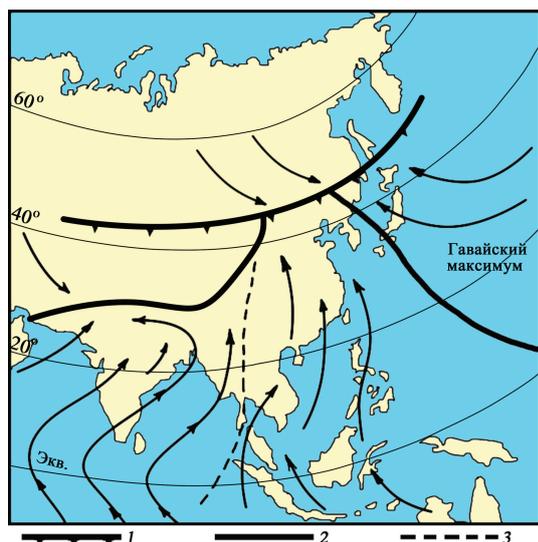
Река Онон берет начало в северных отрогах хребта Хэнтэй (Монголия), в 5 км к югу от горы Бэрэягин-Ям (высота 2099 м) [1, 2]. В пределах России Онон, сливаясь с рекой Ингода, образует реку Шилка, которая, в свою очередь, сливаясь с

рекой Аргунь, дает начало Амуру. Река Амур по размерам площади водосбора занимает четвертое место среди рек России (после Енисея, Оби и Лены) и десятое место среди рек мира.

Длина р. Онон составляет 1032 км. Длина верхней по течению монгольской части реки составляет 298 км, российская часть – 734 км. По условиям водного режима р. Онон относится к дальневосточному типу: сток весеннего половодья (апрель–май) составляет 10–15 % годового объема; в июне–октябре наблюдаются дождевые паводки, составляющие в годовом объеме 80–90 %; зимний сток (ноябрь–март) мал – около 5 %.

Таким образом, основным источником водного питания являются жидкие осадки, выпадающие в теплый период года. Их образование связано с летней дальневосточной депрессией, формирующейся в бассейне Амура и прилегающих районах Восточной Азии. Циклоническое поле образуется как из местных циклонов, так и из приходящих. Согласно [3, 4], пути циклонов и количество выпадающих осадков определяются особенностями расположения и интенсивностью развития фронтальной системы, разделяющей воздушные массы уме-

ренных широт и тропиков (рис. 1). При северном положении этой системы муссоны с Тихого и Индийского океанов могут достигать северных границ Монголии, включая бассейн Онона. При смещении фронтальной системы к югу наблюдается общее ослабление циркуляции и снижение количества осадков в районе Забайкалья, Монголии и северного Китая, тогда как область значительных осадков смещается в южные районы Китая.



**Рис. 1.** Приземные ветры, воздушные массы и фронты над муссонной Азией летом: 1 – среднее положение полярного фронта; 2 – среднее положение внутритропической зоны конвергенции; 3 – примерная граница между Индийским муссоном и Восточноазиатским муссоном ([4], Педелаборд, 1963)

**Fig. 1.** Surface winds, air masses and fronts over the summer monsoon Asia: 1 is the the medium position of the Polar Front; 2 is the medium position of the Intertropical Convergence Zone; 3 is the the approximate boundary between the Indian monsoon and East Asian monsoon ([4], P. Pedelabord, 1963)

В бассейне р. Онон ярко выражена высотная поясность в изменении речного стока [5–7]. На склонах гор, обращенных к влагоносным ветрам, средние годовые модули стока достигают 10 л/с·км<sup>2</sup>. Наименьшие модули (0–0,5 л/с·км<sup>2</sup>) приурочены к предгорным речным долинам и бессточным равнинам.

При выходе реки с гор на предгорный шлейф скачком возрастает мощность пролювия и делювия (с впитывающей способностью от значительной до провальной), в результате чего русловой сток по мере продвижения вниз по предгорному шлейфу непрерывно уменьшается. Наиболее ярко выражено явление русловых потерь стока на участке реки от с. Верхний Ульхун до с. Бытэв (протяженность 102 км), где средний многолетний расход воды р. Онон уменьшается от 248 до 197 м<sup>3</sup>/с. Речная долина представляет здесь чередование пойменных массивов шириной 1–6 км с ярко выраженной пойменной многоруканностью.

Для рассматриваемого участка прослеживается достаточно тесная линейная зависимость средних за месяц русловых потерь ( $\Delta Q$ , м<sup>3</sup>/с) от расхода воды во входном створе ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с):  $\Delta Q = -0,197Q$ , (коэффициент парной корреляции  $r = 0,98$ ).

В пределах Онон-Борзинской степи (юго-восток российской части бассейна в засушливой зоне с годовым количеством осадков 250–300 мм) господствуют бессточные области. Модуль годового стока здесь снижается практически до нуля [7].

Представленные в табл. 1 величины осадков являются заниженными, так как пункты наблюдений расположены на дне речных долин и не отражают возрастающее количество осадков в горах. Кроме того, необходимо учитывать, что редкая сеть пунктов наблюдений за атмосферными осадками позволяет приблизительно оценить только ход осадков фронтального происхождения, распространяющихся на обширные площади, тогда как территориальное распределение локальных дождей (ливней) существующая сеть осадкомеров надежно учесть не в состоянии.

**Таблица 1.** Осадки, сток и коэффициент стока за апрель–октябрь (1980–2010 гг.)

**Table 1.** Precipitation, runoff and runoff coefficient for April–October (1980–2010)

Речной бассейн River basin	Площадь бассейна F, км <sup>2</sup> Area of the basin F, km <sup>2</sup>	Осадки X, мм Precipitation X, mm	Сток Y, мм Streamflow Y, mm	Кэф. стока Y/X Runoff coefficient Y/X
р. Онон – с. Верхний Ульхун Onon River – Verkhniy Ulkhun	45000	334	107	0,32
р. Онон – ст. Оловянная Onon River – Olovyannaya	75100	330	65	0,20
р. Онон – с. Чирон Onon River – Chiron	95900	328	62	0,19
р. Кыра – с. Кыра Kyra River – Kyra	5100	351	164	0,47
р. Иля – с. Иля Ilya River – Ilya	1370	330	100	0,30
р. Ага – с. Агинское Aga River – Aginskoye	2190	328	47	0,14

Примечание. Данные предоставлены Забайкальским гидрометеорологическим центром.

Note. The data are provided by the Zabaykalsky hydrometeorological centre.

В многолетней динамике (1951–2010 гг.) ход водности реки Онон характеризуется циклическими колебаниями, вызванными положением внутритропической зоны конвергенции, о которой сказано выше. На рис. 2 представлены временной ход модульных коэффициентов и нормированная интегральная кривая дождевого стока (суммарный сток за май–сентябрь). Можно выделить многоводные и маловодные периоды, которые на рисунке обозначены римскими цифрами (маловодные – I, III, V; многоводные – II, IV).

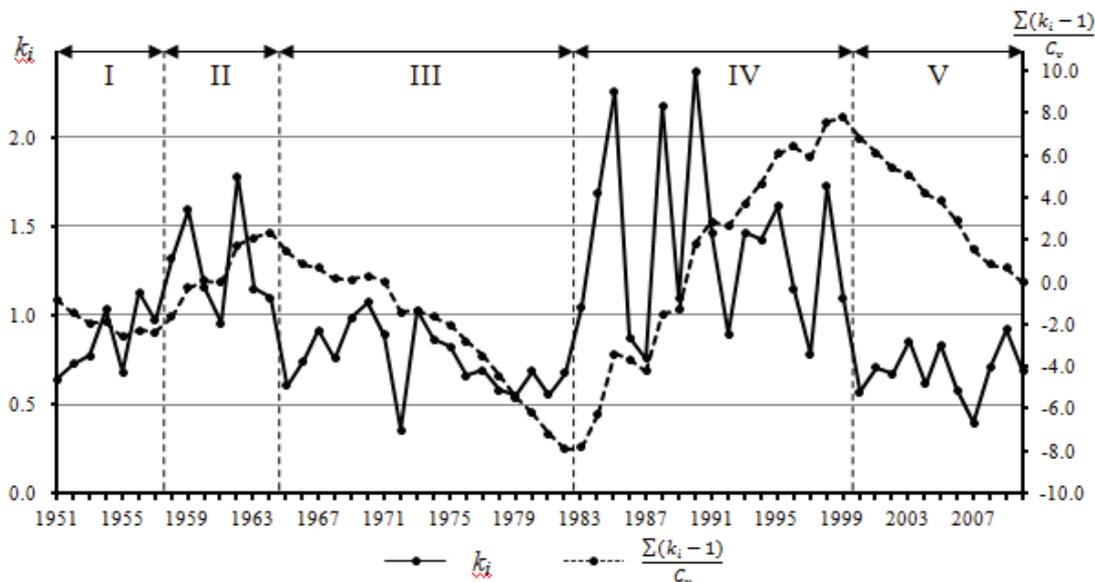


Рис. 2. Временной ход стока за теплый период (V–IX)

Fig. 2. Time course of a drain for the warm period (V–IX)

#### Постановка задачи

Для решения задачи прогноза характеристик паводка применяются два подхода. Первый из них – экспертно-статистический. Он подразумевает выбор с участием эксперта и с применением статистических методов оптимальных предикторов для прогнозируемой переменной и построение стохастической модели. Второй подход основывается на построении физико-математической модели формирования стока.

Анализ гидрометеорологической информации с применением различных методов позволил установить, что наиболее информативными предикторами прогностической модели являются паводкообразующие осадки ( $x$ ) и показатели предпаводочного увлажнения бассейнов ( $m_{t_d}$ ).

В расчетах стока дождевых паводков в качестве индекса предпаводочного увлажнения почвы  $m_{t_d}$  на момент начала дождя  $t_d$  использовались следующие косвенные показатели: 1) расход (уровень) воды в реке; 2) индекс предшествующих осадков [8]. Последний определяется по следующей усовершенствованной формуле:

$$m_{t_d} = (S + U)K^t + \sum_{j=0}^{t-1} x_{t-j} (K_{t-j})^j, \quad (1)$$

$$K_{t-j} = K_0 \exp[-c\theta_{t-j}],$$

где  $S$  – запас воды в снежном покрове в конце зимы;  $U$  – слой воды, заполняющий водоудерживающую емкость бассейна в конце зимы, определяемый по эмпирической зависимости от показателя осеннего увлажнения;  $K_0, c$  – коэффициенты;  $x_{t-i}$  – количество осадков за сутки  $t-i$ ,  $K_{t-i}$  – коэффициент, зависящий от среднесуточной температуры воздуха  $\theta$ .

Как показали расчеты, оба рассмотренных показателя предпаводочного увлажнения имеют примерно одинаковую репрезентативность.

Уравнения регрессии, выражающие зависимость слоя стока за паводок  $y$  от упомянутых аргументов, достаточно адекватно аппроксимируют реальные гидрометеорологические процессы, что подтверждается такими показателями корреляционной связи, как коэффициент множественной корреляции ( $R$ ), критерий качества прогностической зависимости ( $\sigma_0/\sigma$ ), и значениями  $t$ -статистик.

Для оценки критерия качества методики гидрологического прогноза используется отношение  $\sigma_0/\sigma$ , где  $\sigma_0$  – средняя квадратичная ошибка прогноза слоя стока  $y$ ,  $\sigma$  – его стандартное отклонение [9]. Методика считается «хорошей», если  $\sigma_0/\sigma$  меньше 0,50, «удовлетворительной» при  $\sigma_0/\sigma$  от 0,51 до 0,80 и «неудовлетворительной», если  $\sigma_0/\sigma$  больше 0,80.

Критерий « $t$ -статистика» численно равен отношению коэффициента регрессии к средней квадратичной ошибке его определения. Переменная считается репрезентативной, если « $t$ -статистика», рассчитанная при уровне значимости 5 %, достигает 2 и более [10. С. 341–343]. Данный критерий вычисляется программой Excel.

Например, для небольшой реки Ага – с. Агинское (бассейн р. Онон,  $F=2190$  км<sup>2</sup>) установлена связь паводочного стока с количеством осадков, сформировавших паводок (определены по среднему арифметическому из показаний двух пунктов: Агинское и Иля) и характеристикой увлажнения ( $m$ ) – уровнем воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с достаточно высокими значениями

$t$ -статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициент множественной корреляции превышает 0,80 (табл. 2).

Для бассейна р. Онон до с. Верхний Ульхун ( $F=45000 \text{ км}^2$ ) максимальный расход воды дождевого паводка в основном определяется двумя предикторами: суммой осадков на метеостанциях Кыра и Мангут, расположенных на российской территории, и расходом воды на дату начала дождя.

Критерий качества прогноза по этой зависимости, построенной на обучающей выборке, включающей 51 совместную реализацию, составил 0,56. Коэффициент множественной корреляции – 0,83, средняя квадратичная ошибка  $\delta=0,11$ . Подчеркнем, что почти весь бассейн р. Онон до с. Верхний Ульхун располагается на территории Монголии.

Коэффициент множественной корреляции аналогичной зависимости для прогноза слоя паводочного стока р. Онон – ст. Оловянная ( $F=75100 \text{ км}^2$ ) составляет 0,84. Для этого бассейна осадки рассчитаны по данным семи пунктов наблюдений. За показатель предшествующих влагозапасов принят расход воды р. Онон у ст. Оловянная в день выпадения осадков. Похожие результаты получаются и по другим бассейнам исследуемой территории.

**Таблица 2.** Уравнение регрессии для прогноза паводочного стока р. Ага – с. Агинское

**Table 2.** Regression equation for forecasting flood flow on the Aга River – Aginskoe

Показатель увлажнения – уровень воды р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков Moisture index – water level in Aга River – Aginskoe in the day of rainfall		
$R=0,83, \sigma_0/\sigma=0,58$		
Коэффициенты регрессии зависимости regression coefficient $y=a_1x+a_2m+b$ $m$ – показатель увлажнения (уровень воды) $m$ is the moisture index (water level) $y=a_1x+a_2m+b$		$t$ -статистики коэффициентов регрессии $t$ -statistic of regression coefficients
$a_1$	-33,05	-4,68
$a_2$	0,27	5,95
$b$	0,14	4,41

Детальные физико-математические модели гидрологических прогнозов с распределенными параметрами на практике пока не используются. Дело в том, что модели этого типа не обеспечены необходимой гидрометеорологической информацией. По этой причине выпуск краткосрочных гидрологических прогнозов как в России, так и в США, Японии и странах Европы реализуется на основе построения моделей, в которых используются общие представления (концепции) о процессах формирования стока, эмпирические зависимости и осредненные по водосбору метеорологические характеристики [11–15]. Л.С. Кучмент назвал модели такого типа концептуальными [16]. Параметры концептуальных моделей представляют агрегированные константы, которые калибру-

ются методами оптимизации по данным многолетних гидрометеорологических наблюдений.

Для реализации прогноза ежедневных уровней воды дождевых паводков на р. Онон адаптирована концептуальная модель формирования стока, разработанная под руководством Д.А. Буракова, широко используемая в сибирских подразделениях Росгидромета [17, 18]. Ниже рассмотрим ряд принципиальных вопросов построения этой модели.

#### Ландшафтно-гидрологическая основа построения модели

Так как невозможно обеспечить огромное число локальных природных геосистем гидрометеорологическими данными, необходимо определить принцип разложения речного бассейна на гомогенные подобласти. В нашей модели главным принципом выделения гидрологических районов является пространственная коррелированность временных колебаний гидрометеорологических характеристик, позволяющая приближенно учесть их изменчивость с использованием данных наблюдений ограниченного числа пунктов. Учет пространственного разнообразия элементов ландшафта внутри каждого района осуществляется путем его расчленения на высотные зоны. Таким образом, горная территория достаточно крупного бассейна делится на районы и высотные зоны, тогда как в бассейнах малых и средних рек выделяются только высотные зоны. При таком подходе исходной территориальной единицей осреднения гидрометеорологических характеристик в бассейнах горных рек является высотная зона. В пределах высотной зоны территориальная неравномерность распределения запасов снега и емкостного поглощения воды учитывается с помощью распределений вероятности [19, 20].

#### Подмодель склонового притока в русловую сеть

Отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна  $x$  превышает суточное испарение  $z$  и просачивание  $I$ , образуют последовательные паводкообразующие периоды. Для каждого суток паводкообразующего периода рассчитывается водоотдача высотных зон  $u(t)$ , определяемая на основе инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова [9]. С этой целью рассчитывается интегральный слой воды  $H_{x_i}(t)$ , заполняющий водоудерживающую емкость за период от начала паводкообразующего дождя  $t_d$  до рассматриваемых суток  $t$ :

$$H_{x_i}(t) = \sum_{j=t_d}^t (x_j - z_j - I)_j, \quad (2)$$

где индекс  $i$  указывает на принадлежность к  $i$ -й высотной зоне.

Средний для  $i$ -й высотной зоны слой осадков  $x_i$  определяется путем арифметического осреднения показаний соответствующих пунктов наблюдений и введения поправки на высотный градиент осадков. Питание подземных вод  $I$  (мм/сут) прибли-

женно принимается равным суточному расходу воды в конце типовой кривой спада, характеризующему среднее пополнение подземного (базисного) стока.

Для каждого суточного интервала паводкообразующего периода рассчитывается интегральный слой водоотдачи  $i$ -й высотной зоны  $Y_i(t)$ , характеризующий количество воды, поступающей в речную сеть [9, 18]:

$$Y_i(t) = \alpha [H_{x_i}(t) - P_{d_i} th(H_{x_i}(t) / P_{d_i})], \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий долю постоянно бессточной площади в пределах высотной зоны, а также возможную долю русловых потерь стока, которые, как показано выше на примере участка р. Онон, увеличиваются с ростом количества стекающей воды;  $P_{d_i}$  – параметр емкостного поглощения воды, характеризующий размеры вододерживающей емкости для высотной зоны;  $th$  – функция гиперболического тангенса.

Для начала дождевого периода параметр емкостного поглощения  $P_{0d_i}$  определяется в зависимости от индекса предпаводочного увлажнения почвы по следующей эмпирической формуле [18]:

$$P_{0d_i} = P_{\max d} - C_d \lg(m_{t_d} + 1) - \text{grad} p_i \times \frac{\Delta H}{100}, \quad (4)$$

где  $P_{\max d}$  – параметр емкостного поглощения для наиболее сухих предшествующих условий;  $C_d$  – эмпирический коэффициент;  $m_{t_d}$  – рассмотренный выше индекс предпаводочного увлажнения почвы;  $\text{grad} p_i$  – высотный градиент  $P_{\max d}$ ;  $\Delta H$  – превышение  $i$ -й высотной зоны над минимальной высотой района.

Суточная водоотдача высотной зоны определяется как

$$u_i(t + \Delta t) = Y_i(t + \Delta t) - Y_i(t), \quad (5)$$

где  $\Delta t$  – расчетная единица времени;  $u_i(t + \Delta t)$  – водоотдача высотной зоны.

В основу подмодели расчета склонового притока в русловую сеть  $q(t)$  положена концепция динамического (гравитационного) запаса воды  $W(t)$  на склонах, который определяется из условия водного баланса. Предполагается, что в общем случае связь между  $q(t)$  и  $W(t)$  может быть не линейна [17, 18]:

$$W_i(t + \Delta t) = W_i(t) + u_i(t + \Delta t) - q_i(t + \Delta t), \quad (6)$$

$$q_i(t + \Delta t) = \alpha(t + \Delta t) \left[ \frac{W_i(t) + W_i(t + \Delta t)}{2} \right]^n, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий гидравлические условия склонового стока.

Общая структура модели формирования стока для высотной зоны бассейна включает блоки, представленные на рис. 3.

#### Вероятностная модель руслового добегания

В условиях недостаточного информационного обеспечения для расчета добегания воды по руслам используются так называемые «инженерные» методы, основанные на применении интеграла свёрт-

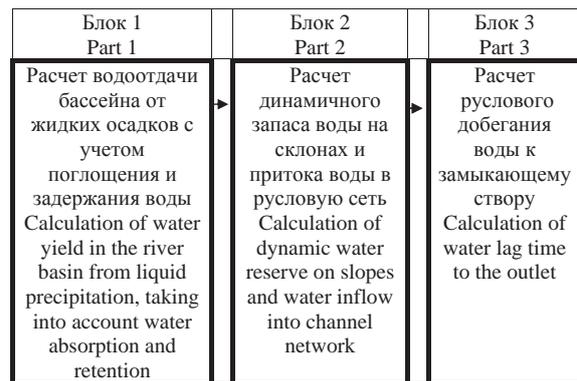


Рис. 3. Общая структура модели формирования стока [17]

Fig. 3. General structure of the flood flow formation model [17]

ки (генетическая формула паводка). В этих методах применяется кривая добегания  $f_j(\tau)$ , рассматриваемая как плотность распределения времени добегания элементарных объемов воды [17, 21, 22], поступающей со склонов в русловую сеть района  $j$  (или всего бассейна). Она аппроксимируется гибкими статистическими распределениями с оценкой моментов этих распределений по теоретическим коэффициентам, использующим агрегированные коэффициенты. Гидрограф притока в русловую сеть района (или бассейна)  $q_j(t)$  трансформируется в соответствующую составляющую расхода воды замыкающего створа  $Q_j^{(1)}(t)$  по выражению

$$Q^{(1)}(t + k\Delta t) = \sum_{j=1}^n \int_0^{k\Delta t} q_j(t + k\Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau, \quad (8)$$

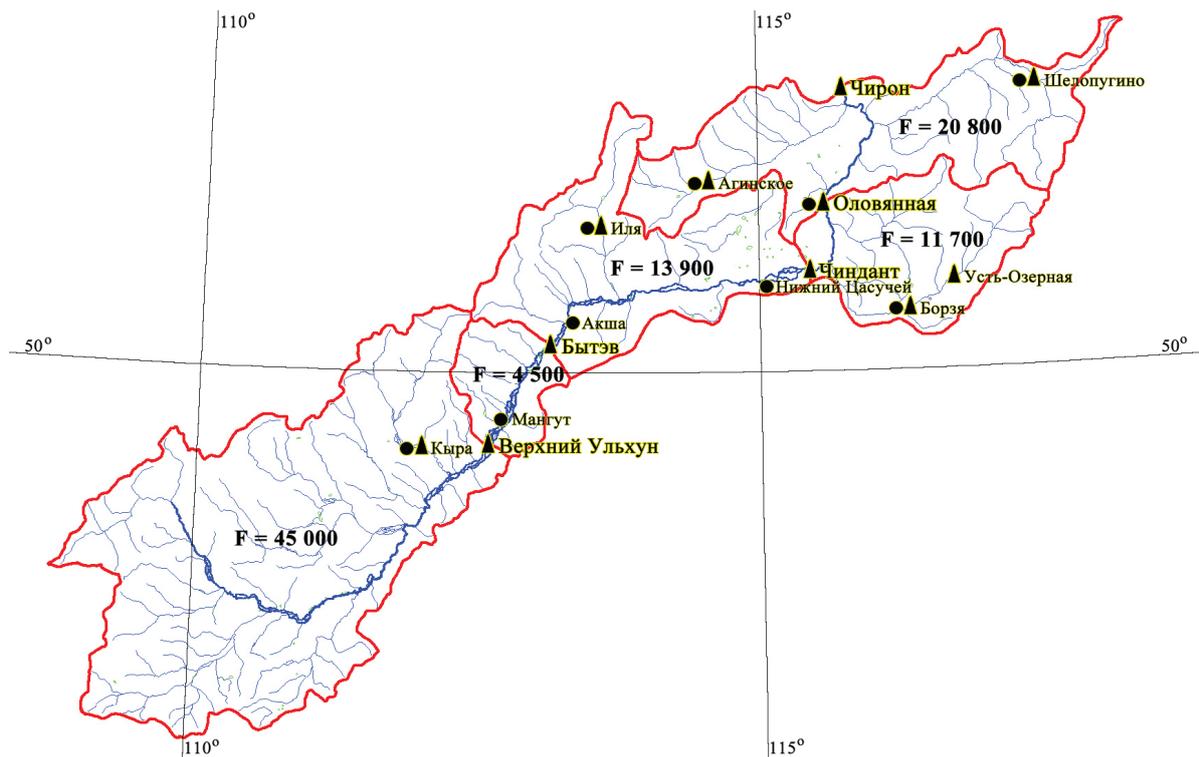
где  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – расчетная единица времени;  $k\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $j$  – номер района;  $n$  – количество районов в бассейне.

#### Учет уровней воды в речной сети на дату выпуска прогноза

Существенный вклад в повышение точности прогноза по уравнению (9) дает учет информации об уровнях воды  $H_i(t)$  в речной сети бассейна в 8 и 20 часов на дату выпуска прогноза, а также тенденций (изменений) уровней  $[H_i(t) - H_i(t - \Delta t)]$ . Тем самым учитываются начальные русловые запасы воды на эту дату. Выразив запас воды в русловой сети в зависимости от высот уровней воды  $H_i(t)$  в пунктах наблюдений речной системы, получим следующее уравнение [17, 18]:

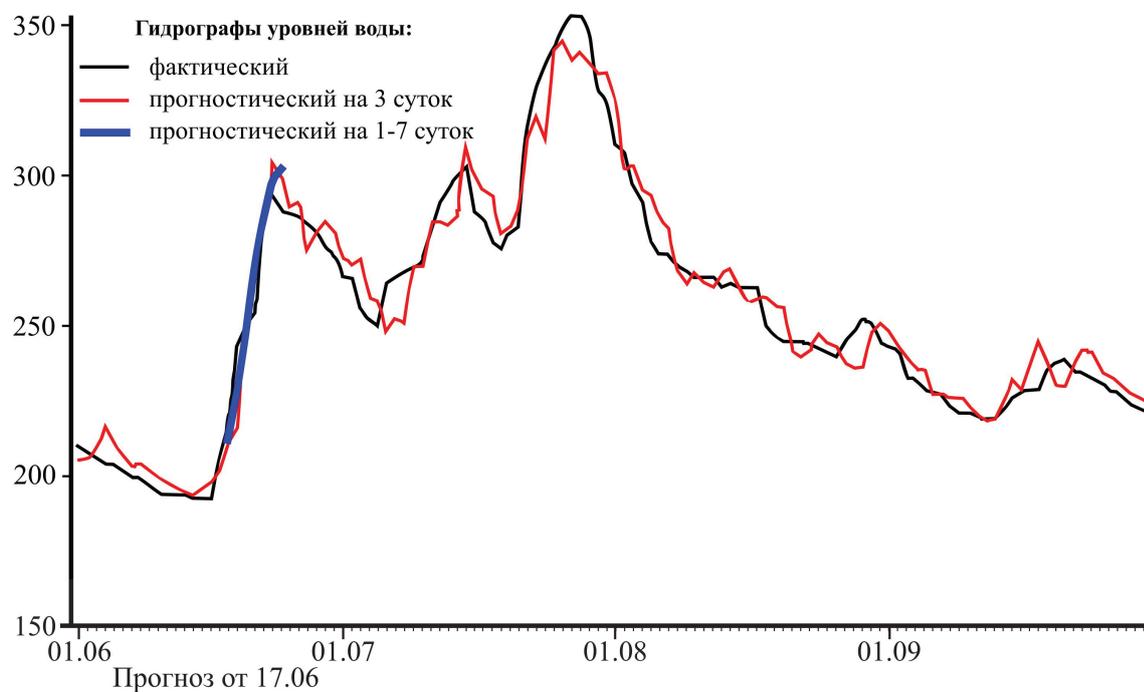
$$Q(t + k\Delta t) = \left( c_0 \sum_{j=1}^n \int_0^{k\Delta t} q_j(t + k\Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^m c_i (H_i(t) - H_{\min, i})^{y1} + \sum_{i=1}^m c_{i+m} (H_i(t) - H_i(t - \Delta t)) \right) + Q_{\min}, \quad (9)$$

где  $Q(t + k\Delta t)$  – расход воды в замыкающем створе;  $c_i, y1$  – коэффициенты;  $H_{\min, i}$  – минимальный уро-



**Рис. 4.** Схема расположения пунктов наблюдений в бассейне р. Онон (● – гидрологические наблюдения; ▲ – метеорологические наблюдения; F – площадь водосбора района)

**Fig. 4.** Scheme of location of observation points in the basin of the Onon River (● are the hydrological observations; ▲ are the meteorological observations; F is the drainage area)



**Рис. 5.** Фактический (линия черного цвета) и прогностические (заблаговременность – 3 суток и 1–7 суток) гидрографы уровней воды р. Онон – ст. Оловянная за 2014 г.

**Fig. 5.** Real (the black line) and forecasted (forecast-time interval – 3 and 1–7 days) hydrographs of water levels in the Onon River – Olovyanaya for 2014

вень воды в  $i$ -м пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета;  $m$  – число пунктов наблюдений за уровнями воды;  $Q_{\min}$  – расход воды в замыкающем створе.

### Прогноз ежедневных уровней воды

Для построения модели прогноза и ее реализации используются данные наблюдений о ежедневных уровнях воды на гидрологических постах (с 21 марта по 30 октября в сроки 8 и 20 часов). Также необходимы ежедневные данные о суточных величинах осадков и температуре воздуха (рис. 4). В качестве начальных условий необходимо задать величину запасов воды в снежном покрове на конец второй декады марта.

Описание русловой сети, используемое для реализации вероятностной модели руслового добегания, представляется в виде схемы эквидистант – линий, соединяющих точки, находящиеся на одинаковом расстоянии вдоль русел до замыкающего створа. Между смежными эквидистантами выделяются площадки  $F_i$ . В качестве примера для районов бассейна р. Онон – ст. Оловянная в табл. 3 представлены: расстояния от нижних границ каждой площадки до замыкающего створа; расстояния по руслам между эквидистантами, выделяющими каждую площадку в бассейне или районе; относительные размеры площадок  $f_i = F_i/F$  для бассейна или района. В той же таблице показаны размеры относительных площадей высотных зон в выделенных районах.

Гидрометеорологические наблюдения за 1980–2010 гг., включающие как многоводные, так и маловодные годы, использовались нами для оценки параметров математической модели прогноза ежедневных расходов (уровней) воды методом оптимизации. Методика оптимизации параметров модели приводится в [17].

В табл. 4 представлены результаты оценки показателя качества методики прогнозов за 2000–2010 гг. (данные зависимых наблюдений).

Качество проверочных расчетов по материалам наблюдений характеризуется как «хорошее» и «удовлетворительное». Точность прогнозов снижается с приближением к границе с Монголией, по территории которой данные наблюдений за осадками в оперативном режиме не поступают в отдел гидрологических прогнозов Забайкальского УГМС. Так, для р. Онон – с. Верхний Ульхун у границы с Монголией критерии качества для всех заблаговременностей прогноза превышают 0,70 (методика прогноза «удовлетворительная»). Для пунктов, расположенных ниже по течению реки, критерии качества улучшаются, а для створа Чиндант они в ряде случаев меньше 0,50, т. е. методика оказывается «хорошей».

**Таблица 3.** Морфометрические характеристики районов р. Онон (площадь водосбора 75 100 км<sup>2</sup>)

**Table 3.** Morphometric characteristics of areas of the Onon River (drainage area is 75100 km<sup>2</sup>)

Характеристики Characteristics	Район 1 (Бытэв – Оловянная), площадь $F=25600$ км <sup>2</sup> Area 1 (Bytev – Olovyanaya), $F=25600$ км <sup>2</sup>					
	1		2			
Номер площадки между эквидистантами Number of the area between equidistant lines	1		2			
Расстояние площадки до замыкающего створа, км From the beginning of the area to outlet section, km	0		144			
Расстояние между эквидистантами, км Distance between equidistant lines, km	111		111			
Размеры площадки (доли единицы) Area size (portion of unit)	0,56		0,44			
Номер высотной зоны Number of high-rise zone	1	2	3	4	5	
Средняя высота зоны, м Average height of a high-rise zone, m	841	1050	1290	1530	1784	
Доля площади высотной зоны Share of the area of a high-rise zone	0,354	0,395	0,181	0,057	0,012	
Характеристики Characteristics	Район 2 (исток – с. Бытэв), площадь района $F=49500$ км <sup>2</sup> Area 2 (riverhead – Bytev), $F=49500$ км <sup>2</sup>					
	1		2		3	
Номер площадки между эквидистантами Number of the area between equidistant lines	1		2		3	
Расстояние площадки до замыкающего створа, км From the beginning of the area to outlet section, km	288		399		510	
Расстояние между эквидистантами, км Distance between equidistant lines, km	111		111		111	
Размеры площадки (доли единицы) Area size (portion of unit)	0,091		0,118		0,318	
Номер высотной зоны Number of high-rise zone	1	2	3	4	5	6
Средняя высота зоны, м Average height of a high-rise zone, m	935	1190	1430	1670	1910	2150
Доля площади высотной зоны Share of the area of a high-rise zone	0,167	0,390	0,283	0,125	0,033	0,003

**Таблица 4.** Критерий качества методики расчета (прогноза) ежедневных уровней воды на р. Онон за 2000–2010 гг.

**Table 4.** Criterion of quality of a calculation procedure (forecast) of daily water levels in the Onon River for 2000–2010.

Заблаговременность прогноза, сутки Forecast-time interval, day	1	2	3	4	5	6	7
р. Онон – с. Верхний Ульхун Onon River – Verkhniy Ulkhun	0,776	0,736	0,736	0,731	0,761	0,756	0,738
р. Онон – с. Бытэв Onon River – Bytev	0,731	0,637	0,616	0,625	0,656	0,672	0,670
р. Онон – с. Чиндант Onon River – Chindant	0,657	0,558	0,482	0,436	0,416	0,429	0,464
р. Онон – ст. Оловянная Onon River – Olovyannaya	0,806	0,752	0,726	0,704	0,684	0,677	0,681
р. Онон – с. Чирон Onon River – Chiron	0,850	0,779	0,722	0,673	0,650	0,627	0,623

#### Заключение

Результаты выполненных исследований использованы для создания оперативной системы

прогноза ежедневных уровней воды на р. Онон с заблаговременностью до 7 суток. Авторские испытания метода и оперативные прогнозы оказались успешными.

В летне-осенний период 2014 г. в Гидрометцентре ФГБУ «Забайкальское УГМС» проведены производственные испытания автоматизированного метода прогноза ежедневных уровней воды в бассейне р. Онон. Испытания подтвердили возможность использования метода с заблаговременностью прогнозов до 4–7 суток. Для задания температуры и осадков за период заблаговременности используются данные оперативных метеорологических прогнозов систем метеорологического прогнозирования, регулярно поступающие в Гидрометцентр Забайкальского УГМС. По р. Онон в пунктах с. Верхний Ульхун, с. Бытэв, с. Чиндант, ст. Оловянная, с. Чирон оправдываемость прогнозов за этот период по результатам испытаний составила от 92 до 100 %. На рис. 5 представлен пример прогноза за 2014 г. для р. Онон – ст. Оловянное.

Работа проведена в рамках ФЦП Росгидромета «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Полеванов В.К. К истокам Амура в «Страну непобедимых» // Наука и жизнь. – 2008. – № 10. – С. 110–117.
- Бассейн реки Амур в Забайкалье в вопросах и ответах / под ред. к.г.н. Н.В. Помазковой. – Чита: Экспресс-издательство, 2011. – 208 с.
- Марченко О.Ю., Бережных Т.В., Мордвинов В.И. Экстремальная водность реки Селенги и особенности летней циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 10. – С. 81–93.
- Педелаборд П. Муссоны. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1963. – 195 с.
- Болгов М.В., Трубетцкова М.Д. О высотной зональности стока рек со значительной долей ледникового питания // Лед и снег. – 2011. – № 1. – С. 45–52.
- Bolgov M.V., Trubetskova M.D. The correlation between variations of climatic factors and zonal runoff of mountain rivers // Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions. IAHS Red Books. – 2014. – № 363. – P. 96–101.
- Ресурсы поверхностных вод СССР / под ред. А.П. Муранова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – Т. 18. – Вып. 1. – 800 с.
- Linsley R.K., Kohler M.A., Paulus J.L. Applied Hydrology. – New York: McGraw-Hill Publishing Co, 1949. – 689 p.
- Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1963. – 395 с.
- Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.
- Vijay P. Singh. Computer Models of Watershed Hydrology. – Highlands Ranch: Water Resources Pubns, 2012. – 1144 p.
- The distributed model intercomparison project – Phase 2: motivation and design of the Oklahoma experiments / M. Smith, V. Koren, S. Reed, Z. Zhang, Yu. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, N. Mizukami, E.A. Anderson, V.A. Cosgrove // J. Hydrol. – 2012. – V. 418–419. – P. 3–16.
- The distributed model intercomparison project – Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments / M. Smith, V. Koren, Z. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, B. Cosgrove, N. Mizukami, D. Kitzmiller, F. Ding, S. Reed, E. Anderson, J. Schaake, Y. Zhang, V. Andréassiane, C. Perrine, L. Coron, A. Valéry, B. Khakbaz, S. Sorooshian, A. Behrangi, B. Imam, K.L. Hsu, E. Todini, G. Coccia, C. Mazzetti, E.O. Andres, F. Francés, I. Orozco, R. Hartman, A. Henkel, P. Fickenscher, S. Staggs // Journal of Hydrology. – 2013. – № 507. – P. 300–329.
- Karamouz E.A., Thomas C.P. Flood Forecasting: a Global Perspective. – Boulder: Academic Press, 2016. – 478 p.
- Karamouz M., Nazif S., Falahi M. Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications. – Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. – 716 p.
- Кучмент Л.С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач // Сб. научных трудов «Научное обеспечение реализации "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г."». – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. – С. 74–81.
- Бураков Д.А., Кареева Е.Д., Шайдуров В.В. Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник Красноярского государственного университета (физико-математические науки). – 2006. – Вып. 4. – С. 3–19.
- Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 10. – С. 75–87.
- Бураков Д.А., Горошко Н.В. Ландшафтно-гидрологическое районирование в моделях прогноза речного стока (на примере бассейна Верхней Оби) // Географическая наука, туризм и образование: современные проблемы и перспективы развития: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2015. – С. 14–17.
- Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling // Hydrological Processes. – 2015. – № 29. – P. 2074–2078.

21. Бураков Д.А. К оценке параметров уравнений, аппроксимирующих кривую руслового добегаия // Водные ресурсы. – 1978. – № 4. – С. 21–24.
22. Nash J.E. Systematic determination of unit hydrograph parameters // J. Geophysical Research. – 1959. – V. 64. – № 1. – P. 111–115.

*Поступила 09.09.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Лариошкин В.В.**, старший преподаватель кафедры природообустройства Института землеустройства кадастров и природообустройства Красноярского государственного аграрного университета.

UDC 556.06; 556; 556.166

## TECHNIQUE OF FORECASTING RAIN FLOOD IN THE UPPER AMUR BASIN (BY THE EXAMPLE OF THE ONON RIVER)

**Viktor V. Larioshkin,**

Viktor\_L88@mail.ru

Krasnoyarsk State Agrarian University,  
90, Mira street, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

**Relevance.** The Amur basin is situated in a flood-inclined region. Over the course of the past century the disastrous pluvial flooding have occurred in the basin eight times. They covered huge territories, took peoples' lives and caused considerable damage to residential and industrial buildings, engineering systems. One of the efficient methods to struggle the floods is to regulate the river run-off developing flood-control reservoirs. The number of existing reservoirs on the Amur river system is insignificant to control efficiently the river run-off. Their building is tied with further region development. The forecast of flood water inflow allows minimizing damage and identifying the most rational reservoir release rules for the existing and expected reservoirs.

**Aim of the research** is to investigate the floods formation by the example of the Onon river and to develop the methods for short-term forecast of floods in the upper Amur basin.

**Research methods:** water balance method, geographical and hydrological methods, statistical method, mathematical modeling of run-off formation.

**Results.** The Burakovs' conceptual model is adapted to forecast daily rain floods water flows. This model is used by the Siberian department of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia. The landscape and hydrological basis for this model is the basin division into areas and altitudinal zones. The altitudinal zone is an initial territorial unit of averaging the hydrological characteristics of mountain rivers. Within the altitudinal zone, territorial irregularity of snow cover distribution and capacitive water absorption are taken into account by probability distribution. The periods, when the diurnal water entry to the surface of the basin exceeds the diurnal evaporation and infiltration, compose successive flood-forming periods. For each day of a flood-forming period, the water yield is estimated using the Popovs' infiltration capacitive model. Besides, the gravitational water storage on the slopes and the inflow in the channel network are calculated. The method, describing water lag along the river channels, is based on applying the convolution integral (the genetic flood formula). As a result of the research, the author has developed the method of forecasting daily water levels in the Onon riverbed system. The method was applied by the Chita department of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia and proved its efficiency.

### Key words:

Rain flood, water level, flood, conceptual mathematical model of flow formation, hydrological forecasts.

The research was carried out within the RosHydroMet Federal Special Purpose Program «Development of water utilization system in the Russian Federation in 2012–2020».

### REFERENCES

1. Polevanov V.K. K istokam Amura v «Stranu nepobedimyykh» [To the source of Amur to country of unconquerable]. *Nauka i zhizn*, 2008, no. 10, pp. 110–117.
2. *Bassein reki Amur v Zabaykale v voprosakh i otvetakh* [Basin of the Amur river in Transbaikalia in questions and answers]. Ed. by N.V. Pomazkova. Chita, Ekspres-Publ., 2011. 208 p.
3. Marchenko O.Yu., Bereznykh T.V., Mordvinov V.I. Ekstremalnaya vodnost reki Selengi i osobennosti letney tsirkulyatsii atmosfery [Extreme water content of the Selenga River and features of atmosphere summer circulation]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2012, vol. 10, pp. 81–93.
4. Pedelabord P. *Mussony* [Monsoons]. Moscow, Foreign Languages Publ., 1963. 195 p.
5. Bolgov M.V., Trubetskova M.D. O vysotnoy zonalnosti stoka rek so znachitelnoy doley lednikovogo pitaniya [On high-rise zonality of drain of the rivers with a considerable share of glacier-derived nourishment]. *Ice and Snow*, 2011, no. 1, pp. 45–52.
6. Bolgov M.V., Trubetskova M.D. The correlation between variations of climatic factors and zonal runoff of mountain rivers. *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*. IAHS Red Books, 2014, no. 363, pp. 96–101.
7. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR]. Ed. by A.P. Muranov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. P. 18, vol. 1, 800 p.
8. Linsley R.K., Kohler M.A., Paulus J.L. *Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill Publ. Co., 1949. 689 p.
9. Popov E.G. *Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka* [Theory and practice of river flow forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1963. 395 p.
10. Rozhdestvenskiy A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii* [Statistical methods in hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 424 p.
11. Vijay P. Singh *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, Water Resources Publ., 2012. 1144 p.
12. Smith M., Koren V., Reed S., Zhang Z., Zhang Yu., Moreda F., Cui Z., Mizukami N., Anderson E.A., Cosgrove B.A. The distributed model intercomparison project – Phase 2: motivation and design of the Oklahoma experiments. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 418–419, pp. 3–16.
13. Smith M., Koren V., Zhang Z., Moreda F., Cui Z., Cosgrove B., Mizukami N., Kitzmiller D., Ding F., Reed S., Anderson E., Schake J., Zhang Y., Andréassiane V., Perrine C., Coron L., Valéry A., Khakbaz B., Sorooshian S., Behrangi A., Imam B., Hsu K.L., Todini E., Coccia G., Mazzetti C., Andres E.O., Francés F., Orozco I., Hartman R., Henkel A., Fickenscher P., Staggs S. The distributed model intercomparison project – Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments. *Journal of Hydrology*, 2013, no. 507, pp. 300–329.

14. Karamouz E.A., Thomas C.P. *Flood Forecasting: A Global Perspective*. Boulder, Academic Press, 2016. 478 p.
15. Karamouz M., Nazif S., Falahi M. *Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications*. Boca Raton, CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. 716 p.
16. Kuchment L.S. Problemy vybora modeley formirovaniya stoka dlya resheniya prakticheskikh zadach [Problems of choosing the models of drain formation to solve practical tasks]. *Sbornik nauchnykh trudov: Nauchnoe obespechenie realizatsii «Vodnoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda»* [Collection of scientific works: scientific ensuring of implementation of «The water strategy of the Russian Federation for the period till 2020»]. Petrozavodsk, KarRC RAS, 2015. pp. 74–81.
17. Burakov D.A., Karepova E.D., Shaydurov V.V. Matematicheskoe modelirovanie stoka: teoreticheskie osnovy, sovremennoe sostoyaniye, perspektivy [Mathematical modeling of water flow: theoretical foundations, current status and prospects]. *Bulletin of the Krasnoyarsk State University (Physics and mathematics)*, 2006, vol. 4, pp. 3–19.
18. Burakov D.A., Avdeeva Yu.V. Tekhnologiya operativnykh prognozov ezhdnevnykh raskhodov (urovney) vody na osnove sputnikovoy informatsii o zasnezhennosti (na primere r. Nizhney Tunguski) [Technique of real-time forecasts of daily water consumption (levels) based on satellite data on snow cover (by the example of the river Nizhnyaya Tunguska)]. *Meteorology and Hydrology*, 1996, no. 10, pp. 75–87.
19. Burakov D.A., Goroshko N.V. Landshaftno-gidrologicheskoe rayonirovanie v modelyakh prognoza rechnogo stoka (na primere basseyna Verkhney Obi) [Landscape-hydrological regionalization in models of forecasting river flow (by the example of the Upper Ob Basin)]. *Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Geograficheskaya nauka, turizm i obrazovanie: sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya* [Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference. Geographical science, tourism and education: modern problems and prospects of development]. Novosibirsk, 2015. pp. 14–17.
20. Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 2015, no. 29, pp. 2074–2078.
21. Burakov D.A. K otsenke parametrov uravneniy, approksimiruyushchikh krivuyu ruslovogo dobeganiya [Estimation of the parameter of equations approximating the curve of flow lag channel]. *Vodnye resursy*, 1978, no. 4, pp. 21–24.
22. Nash J.E. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research*, 1959, vol. 64, no. 1, pp. 111–115.

*Received: 9 September 2016.*

#### Information about the authors

**Viktor V. Larioshin**, senior lecturer, Krasnoyarsk State Agrarian University.