

## МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.06; 556.166; 556, 512

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(188-195)

**В. В. ЛАРИОШКИН**

Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, 660130, Россия,  
Viktor\_L88@mail.ru

### ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ВОДНО-БАЛАНСОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА СТОКА ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ОНОН

*Рассмотрены процессы формирования стока дождевых паводков и разработана методика их краткосрочного прогноза на примере р. Онон, поскольку гидрологическому режиму рек бассейна верхнего Амура присущи значительные колебания уровня воды в летне-осенний период, вызванные дождевыми паводками. В основу исследования положен метод водного баланса. Построены графики изменения расходов воды во времени (гидрографы) и рассчитаны генетически связанные значения паводочного стока и паводкообразующих осадков за период многолетних наблюдений. Используются статистические характеристики для обоснования аргументов прогноза (предикторов): коэффициенты парной и множественной корреляции и критерии *t*-статистики, численно равные отношению коэффициента регрессии к средней квадратичной ошибке его определения. Установлено, что помимо атмосферных осадков, которые вносят основной вклад в формирование паводочного стока, важную роль играет степень увлажнения почвы перед выпадением паводкообразующих дождей. Рекомендовано применять в качестве показателя предпаводочного увлажнения уровень воды в реке перед началом паводка. Опробованы два подхода к решению задачи прогноза объема и максимального уровня воды дождевых паводков. Благодаря использованию инфильтрационно-емкостной модели Е. Г. Попова определена математическая структура зависимости паводочного стока от главных факторов его формирования, учитывающая основные составляющие потерь талых вод — емкостное задержание, инфильтрацию, испарение. Установленные зависимости рекомендованы для выпуска прогнозов объема и максимального уровня воды дождевых паводков на реках бассейна р. Онон.*

Ключевые слова: паводочный сток, водный баланс, модели формирования стока, гидрологические прогнозы.

**V. V. LARISHKIN**

Krasnoyarsk State Agrarian University, pr. Mira, 90, Krasnoyarsk, 660130, Russia,  
Viktor\_L88@mail.ru

### PHYSICAL-STATISTICAL AND WATER-BALANCE MODELS FOR FORECASTING THE RUNOFF OF RAINFALL FLOODS WITHIN THE ONON RIVER BASIN

*Formation processes of the runoff of rainfall floods are considered and the short-term forecast technique is developed by using the Onon river as an example, because the hydrological regime of the rivers within the Upper-Amur basin are characterized by significant water-level fluctuations caused by rainfall floods during the summer-autumn period. The investigation is based on the water-balance method. Plots of changes of the water flow rate over time (hydrographs) are constructed, and genetically related values of the flood runoff and flood-forming precipitation are calculated for the period of long-term observations. Statistical characteristics are used to substantiate the forecast arguments (predictors): the pair and multiple correlation coefficients and the criteria of *t*-statistics which are numerically equal to the ratio of the regression coefficient to the standard error of its determination. It is established that in addition to atmospheric precipitation that makes the main contribution to the formation of the flood runoff, an important role is also played by the degree of soil moistening prior to flood-forming rainfall. It is suggested that the water level in the river prior to the onset of a flood should be used as the indicator of pre-flood moistening. Two approaches are tested in dealing with the problem of forecasting the volume and the maximum water level of rainfall floods. E. G. Popov's infiltration-capacity model was used to determine the mathematical structure of the dependence of the flood runoff on the main factors for*

*its formation having regard to the main components of melt water losses (capacity retardation, infiltration, evaporation). The resulting dependences are recommended for making forecasts of the volume and the maximum water level of rainfall floods on the rivers within the Onon basin.*

Keywords: flood runoff, water balance, runoff formation models, hydrological forecasts.

### ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА И ВОДНЫЙ РЕЖИМ РЕКИ ОНОН

Онон — одна из типичных рек бассейна верхнего Амура. Ее длина 1032 км, она берет начало в северо-восточной части Монголии и протекает в Забайкальском крае Российской Федерации. Водосбор монгольской части реки составляет 46 % от площади всего бассейна (96 200 км<sup>2</sup>) [1, 2]. Вместе с Ингодой Онон является истоком Шилки, которая, сливаясь с Аргунью, образует Амур. Исследования условий формирования стока дождевых паводков, нередко вызывающих опасные наводнения в бассейне Амура, выступают частью решения острейшей проблемы современного этапа развития оперативной гидрологии — обеспечения гидрометеорологической безопасности рассматриваемого бассейна, его населения и экономики.

Река Онон начинается в северных отрогах хр. Хэнтийн-Нуру, вблизи вершины высотой 2407 м. По сведениям В. К. Полеванова [3], истоком Онона выступают верховья безымянного ручья. В бассейне реки основные элементы рельефа представлены водораздельными горными хребтами, слабо-расчлененными плато, межгорными впадинами и котловинами. Горные хребты располагаются примерно параллельно друг другу, имеют мягкие очертания с высотами от 1000 до 1500 м. Они сложены преимущественно гранитами, кристаллическими сланцами, сиенитами и гнейсами. Межгорные впадины заполнены песчаниками и глинами, перекрытыми аллювиальными и делювиальными отложениями. Равнинные, линейно вытянутые поверхности, обычно засушливые, получили распространение на дне межгорных впадин, а также в пределах речных долин. Речные долины представляют собой сложную, разветвленную и взаимосвязанную систему ландшафтов. Они четко обособлены в физико-географическом отношении и отличаются по своей морфологии от окружающих материковых поверхностей. Густота речной сети в рассматриваемом бассейне составляет в среднем 0,55 км/км<sup>2</sup>. Главные притоки р. Онон — Хурах-Гол, Агуца, Бальджа, Кыра, Акша, Иля, Борзя и др. [1, 2].

На склонах хребтов (кроме южных) доминируют лиственничные леса, кедр, сосна. Южные же склоны нередко безлесны (горные степи). На высотах от 1800 до 2000 м в основном наблюдается предгорьное редколесье, а выше 2000 м располагается зона голцов с зарослями кедрового стланика [3].

В сухих равнинах и котловинах преобладают степи, полупустыни и пустыни. В степях формируются черноземовидные и каштановые почвы под злаковой растительностью. В засушливых условиях встречаются засоленные земли и участки, лишенные почвенно-растительного покрова (пески, каменистые россыпи, солончаки) [1, 2].

Начиная от истока, долина р. Онон тянется в северо-восточном направлении. Высота склонов достигает 1400 м. В верхнем течении пойма не выражена. В районе с. Верхний Ульхун пойма изрезана протоками, ее ширина колеблется от 3 до 4,5 км, далее по течению сужается до 1 км. Ниже с. Акша долина и пойма вновь расширяются, ширина поймы достигает 5–8 км, она сложена песчано-галечниковыми отложениями, изрезана многочисленными протоками. По данным наблюдений в створах сел Верхний Ульхун и Бытэв [2], в теплый период года на рассматриваемом участке реки длиной более 80 км отмечаются значительные потери стока.

Ниже места впадения р. Улача направление русла Онона резко меняется на восточное. На всем протяжении этого участка ширина поймы колеблется в пределах 1–2,5 км, но у с. Кункур она достигает 8 км. Русло извилистое, изрезано рукавами и протоками. Здесь река вступает в пределы Борзинской степи, где преобладают бессточные и полубессточные области. От с. Усть-Борзя до устья р. Онон поворачивает на север, где сливается с р. Ингода, образуя Шилку. Ширина поймы на рассматриваемом участке нижнего течения колеблется в пределах 1,5–2 км.

Климат бассейна р. Онон континентальный. Зимой над ним располагается мощный отрог Сибирского антициклона, в котором происходит формирование холодного континентального воздуха. По спутниковым изображениям, средняя многолетняя заснеженность (доля площади снегового покрытия) на начало снеготаяния в среднем составляет около 55 %. Особенность территории — значительная изменчивость максимальной зимней заснеженности по годам (от 40 до 97 %).

Весна начинается в марте–апреле, ее продолжительность около 45 дней. Лето теплое, короткое. В период летних муссонов выпадает основная часть осадков. Осень наступает быстро, до середины октября устанавливается антициклональный характер погоды.

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

Речной бассейн – пункт (площадь, км <sup>2</sup> )	Осадки X, мм	Сток Y, мм	Коэф. стока Y/X
р. Онон – с. Верхний Ульхун (45 000)	334	107	0,32
р. Онон – пгт Оловянная (75 100)	330	65	0,20
р. Онон – с. Чирон (95 900)	328	62	0,19
р. Кыра – с. Кыра (5100)	351	164	0,47
р. Иля – с. Иля (1370)	330	100	0,30
р. Ага – с. Агинское (2190)	328	47	0,14

По водному режиму рассматриваемые реки относятся к дальневосточному типу с выраженным преобладанием дождевого стока. Летне-осенние дождевые паводки придают гидрографу гребенчатую форму. Доля каждого вида водного питания изменяется по сезонам года. Сток весеннего периода (апрель–май), составляющий в среднем 15 % годового объема, образуется в основном за счет талых вод; сток летне-осеннего периода (июнь–октябрь), составляющий 80–95 %, формируется преимущественно дождевыми водами; сток зимы (до 5 %) возникает в результате истощения запасов подземных вод.

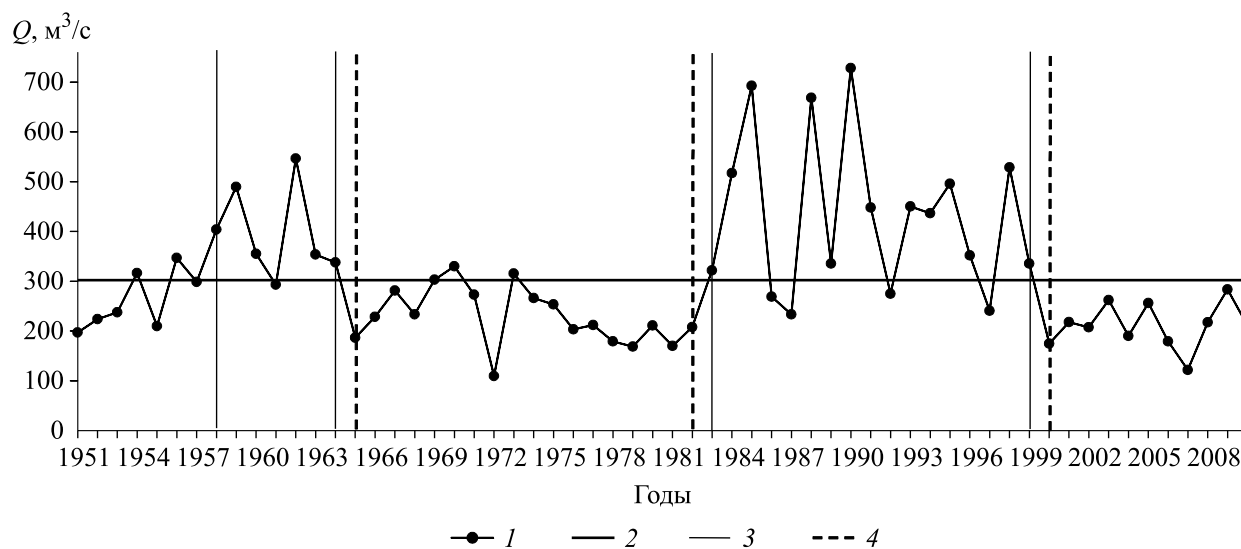
Средний слой стока р. Онон за теплый период (апрель–октябрь) снижается вниз по течению (табл. 1) вследствие увеличения в этом направлении степных и полупустынных площадей.

Сток небольших рек (Кыра, Иля, Ага и др.) изменяется в зависимости от характера рельефа, высоты и экспозиции склонов. Эти факторы влияют на количество выпадающих осадков. Так, для более низко расположенного бассейна р. Ага (с. Агинское, средняя высота 878 м) слой стока составляет 47 мм, для р. Иля (с. Иля, 1080 м) он увеличивается до 100 мм, для наиболее высоко расположенного бассейна р. Кыра (с. Кыра, 1330 м) достигает 164 мм. Коэффициент стока также увеличивается с высотой бассейна (см. табл. 1).

Следует подчеркнуть, что количество осадков, выпадающих на водосбор, вычисляется путем осреднения их значений в пунктах наблюдений. В связи с тем, что они расположены на дне речных долин, приведенные в табл. 1 суммы осадков в бассейнах несколько занижены.

Наиболее влагонесущими являются воздушные массы, вторгающиеся с юго-востока. Они приносят влагу с Индийского и Тихого океанов [4]. Значительное количество осадков связано также с северными, северо-западными и западными направлениями переноса. При обострении фронтальных зон осадки могут достигать 50–100 мм в сутки.

Многолетняя динамика водности рек рассматриваемого бассейна характеризуется циклическими колебаниями. За 1958–2010 гг. выделяются следующие периоды повышенной и пониженной водности: многоводный (1958–1964), маловодный (1965–1982), многоводный (1983–1999), маловодный (2000–2010) (см. рисунок).



Изменения водности р. Онон (с. Чирон) за период с 1951 по 2010 г.

1 — средний расход воды за теплый период года (апрель–октябрь); 2 — средний многолетний расход воды за тот же период; 3 — начало/конец многоводного периода; 4 — начало/конец маловодного периода.

Колебания водности могут быть вызваны различными синоптическими ситуациями [4]. Многоводный период 1958–1964 гг. связан с притоком влажного муссонного воздуха юго-восточных траекторий. Многоводный период 1983–1999 гг. отличается преобладанием северо-западных траекторий переносов и увеличением значения региональных циркуляций. Маловодные периоды 1965–1982 и 2000–2010 гг. можно объяснить потерей накопленной влаги до прибытия воздушной массы на территорию бассейна, чему благоприятствует малоградиентное распределение давления над рассматриваемой территорией [4].

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной вклад в формирование паводкового стока вносят атмосферные осадки. Важную роль играет также увлажнение почвы перед выпадением паводкообразующих дождей. В качестве исходной информации для построения и проверки моделей использованы данные об уровнях и расходах воды в речной системе, об атмосферных осадках и температуре воздуха.

Суточные суммы осадков вычислялись как среднее взвешенное значение по наблюдениям осадкомеров в бассейне, с учетом доли площадей, тяготеющих к соответствующим пунктам. Для определения паводочного стока по отобранным данным были построены графики изменения расходов воды во времени (гидрографы). Расчленение каждого гидрографа с помощью типовой кривой спада позволило рассчитать генетически связанные значения паводочного стока и паводкообразующих осадков.

Имеющаяся информация о влажности почвы ограничена и не всегда достаточно надежна, поэтому возникает необходимость подбора косвенных характеристик увлажнения бассейна по материалам наблюдений за прошлые годы. Опираясь на эти данные и основываясь на результатах предшествующих исследований процессов формирования стока, в качестве показателей увлажнения были выбраны: уровень воды на 08 ч ( $H_{x08}$ ) и расход воды ( $Q_x$ ) в день начала выпадения паводкообразующих осадков, а также индекс предшествующих осадков  $I_p$ , предложенный американскими гидрологами [5].

Для решения задачи прогноза характеристик паводка нами применены два подхода. Первый — физико-статистический, подразумевающий выбор с участием эксперта списка наиболее вероятных предикторов для прогнозируемой переменной и построение стохастической модели, аппроксимирующей такую зависимость [6]. В процессе построения модели могут уточняться список предикторов и оператор регрессии, аппроксимирующий зависимость паводкового стока от них.

При втором подходе более полно используются физические представления о закономерностях формирования стока. На их основе определяется не только список предикторов, но и в значительной степени математическая структура оператора описания зависимости паводочного стока от основных факторов его формирования. По сложившейся в гидрологии классификации, такие модели обычно относят к физико-математическим, или концептуальным. Они более трудоемки в построении, но объединяют в себе теоретическую и эмпирическую информацию и по этой причине, как правило, оказываются более точными или более надежными [7], особенно при недостатке эмпирических данных.

В основу моделей, которые строятся в рамках второго подхода, закладываются водно-балансовые соотношения, поэтому такие модели также называются водно-балансовыми. При их построении используется теория поглощения и задержания воды речными бассейнами, разработанная Е. Г. Поповым и его учениками [8, 9].

### ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Для выбора наиболее репрезентативных предсказателей (предикторов) паводочного стока были использованы следующие способы.

*Способ 1* — выбор приоритетов на основе расчета коэффициентов парной корреляции (табл. 2) между стоком дождевых паводков ( $Y$ ) и факторами их формирования. Как и следовало ожидать, наиболее тесная связь оказалась между стоком паводков и паводкообразующими осадками ( $X$ ) за период их выпадения (обычно от одних до нескольких суток). Показатели предпаводочного увлажнения бассейнов  $H_{x08}$  и  $Q_x$  также коррелируют со слоем стока  $X$  (см. табл. 2). Для не-

Таблица 2

Коэффициенты парной корреляции  $r$  паводочного стока с факторами его формирования

Река – пункт	$r_{Y,X}$	$r_{Y,H_{x08}}$	$r_{Y,I_p}$	$r_{Y,Q_x}$
р. Онон – с. Верхний Ульхун	0,76	0,39	0,86	0,46
р. Онон – пгт Оловянная	0,78	0,56	0,13	0,42
р. Онон – с. Чирон	0,75	0,36	0,15	0,36
р. Кыра – с. Кыра	0,70	0,50	0,57	0,62
р. Иля – с. Иля	0,70	0,66	0,56	0,69
р. Ага – с. Агинское	0,68	0,52	0,59	0,42

больших рек эта связь достаточно прочная. Менее тесная связь ( $r < 0,15$ ) для показателя  $I_t$  со стоком относительно крупных рек (Онон — пгт Оловянная, Онон — с. Чирон), что объясняется влиянием неравномерности распределения осадков на обширной площади этих бассейнов.

Способ 2 основан на определении коэффициентов множественной корреляции для зависимостей вида

$$Y = a_1X + a_2m + b, \quad (1)$$

включающих в правую часть уравнения вместе с осадками показатель предшествующего увлажнения ( $m$ ), который при реальных расчетах заменяется на одну из упомянутых выше характеристик —  $Q_x$ ,  $H_{x08}$  или  $I_t$ .

Репрезентативность переменных, входящих в формулу (1), характеризуется коэффициентом множественной корреляции ( $R$ ), критерием качества зависимости ( $\sigma_0/\sigma$ ) и значениями  $t$ -статистик (табл. 3). Для оценки критерия качества методики прогноза используется отношение  $\sigma_0/\sigma$ , где  $\sigma_0$  — средняя квадратичная ошибка расчета стока  $Y$ ,  $\sigma$  — его стандартное отклонение [8]. Методика считается «хорошей», если  $\sigma_0/\sigma < 0,50$ , «удовлетворительной» при  $\sigma_0/\sigma$  от 0,51 до 0,80 и «неудовлетворительной», если  $\sigma_0/\sigma > 0,80$ . Критерий  $t$ -статистика численно равен отношению коэффициента регрессии к средней квадратичной ошибке его определения. Переменная считается репрезентативной, если параметр  $t$ -статистика превышает 2.

Результаты расчетов (см. табл. 3) подтверждают возможность применения расхода воды ( $Q_x$ ) и уровня воды ( $H_{x08}$ ) в качестве показателей предпаводочного увлажнения. В режиме прогноза удобнее использовать уровень воды  $H_{x08}$ , поскольку для оценки расхода воды  $Q_x$  требуется дополнительно учитывать кривую связи расхода и уровня. Показатель увлажнения  $I_t$  эффективен только для прогноза дождевого стока небольших рек. Значения критерия качества  $\sigma_0/\sigma$  позволяют оценить полученные связи как «удовлетворительные» и «хорошие». Контрольные расчеты по этим зависимостям с

Таблица 3

Статистические характеристики зависимостей

Вид уравнения $Y = a_1X + a_2m + b$	Коэффициент множественной корреляции ( $R$ )	Критерий качества методики ( $\sigma_0/\sigma$ )	Значение $t$ -статистики ( $a_1; a_2$ )	Доля детерминированного вклада предиктора, %	
				$\Delta_x$	$\Delta_m$
<i>р. Онон — с. Верхний Ульхун</i>					
$Y = 0,11X + 0,02H_{x08} - 0,53$	0,81	0,59	8,49; 3,46	83	17
$Y = 0,12X + 0,04I_t + 2,57$	0,76	0,66	8,14; 0,79	99	1
$Y = 0,11X + 0,01Q_x + 0,78$	0,83	0,56	8,76; 4,31	77	23
<i>р. Онон — пгт Оловянная</i>					
$Y = 0,12X + 0,03H_{x08} - 3,89$	0,86	0,52	8,10; 4,63	71	29
$Y = 0,14X - 0,02I_t + 0,36$	0,78	0,64	7,53; -0,26	100	0
$Y = 0,13X + 0,04Q_x + 1,32$	0,84	0,55	8,30; 3,66	81	19
<i>р. Онон — с. Чирон</i>					
$Y = 0,10X + 0,01H_{x08} - 5,49$	0,83	0,58	7,69; 3,49	82	18
$Y = 0,1X - 0,01I_t + 0,07$	0,75	0,68	6,58; 0,28	99	1
$Y = 0,1X + 0,002Q_x + 0,99$	0,82	0,59	7,42; 3,17	83	17
<i>р. Кыра — с. Кыра</i>					
$Y = 0,36X + 0,17H_{x08} - 17,87$	0,84	0,56	7,48; 5,07	68	32
$Y = 0,33X + 0,21Q_x + 12,58$	0,88	0,48	8,12; 6,89	57	43
<i>р. Иля — с. Иля</i>					
$Y = 0,19X + 0,25H_{x08} - 22,99$	0,86	0,53	5,69; 5,19	54	46
$Y = 0,20X + 9,48I_t + 5,83$	0,79	0,64	4,82; 3,15	66	34
$Y = 0,19X + 0,61Q_x + 4,20$	0,87	0,50	5,97; 5,83	51	49
<i>р. Ага — с. Агинское</i>					
$Y = 0,27X + 0,14H_{x08} - 33,05$	0,83	0,58	5,95; 4,41	64	36
$Y = 0,26X + 7,52I_t + 12,96$	0,86	0,53	6,36; 5,38	58	42
$Y = 0,29X + 0,18Q_x + 6,78$	0,81	0,61	6,03; 3,90	71	29

применением программ «Стохастическое моделирование» [6], выполненные с учетом предложенной А. В. Игнатовым [10] оценки меры надежности модели, также подтвердили удовлетворительное качество прогностических уравнений.

### ВОДНО-БАЛАНСОВЫЕ МОДЕЛИ

На основе закона сохранения массы можно записать водно-балансовое соотношение

$$Y = X - p, \quad (2)$$

где  $Y$  — слой паводкового стока;  $X$  — слой выпавших на водосбор осадков;  $p$  — суммарные потери дождевого стока.

Величина  $p$  включает в себя затраты дождевых вод, которые не попадают в паводочный сток. Они расходуются на смачивание растительности и почвенного покрова, испарение, заполнение бессточных понижений и пустот почвы, восполнение запаса грунтовых вод, расположенных достаточно близко к дневной поверхности, заполнение водой подсохшего деятельного слоя болот [9, 11]. Е. Г. Попов [8] разработал инфильтрационно-емкостную теорию поглощения воды речными бассейнами, которая послужила теоретической основой для развития моделей гидрологических прогнозов стока весеннего половодья и дождевых паводков. Уравнение инфильтрационно-емкостной модели для прогноза стока имеет вид:

$$Y = (1 - w) \left( \int_0^{X-J-Z} \varphi(h) dh \right), \quad (3)$$

где  $w = \frac{F_0}{F}$  — доля постоянно бессточной площади ( $F_0$  — бессточная площадь;  $F$  — площадь бассейна);  $X$ , как и прежде, — слой паводкообразующих осадков;  $J$  — инфильтрация воды через уплотненные иллювиальные или подпахотные горизонты почвы за пределы ее верхнего рыхлого слоя;  $Z$  — слой испарившейся воды в период выпадения осадков;  $\varphi(h)$  — доля действующей (дающей сток) площади как функция слоя поступившей воды ( $h$ ).

Используя подходящую аппроксимацию функции  $\sigma(h)$  и учитывая потери стока в период спада паводка [8], после интегрирования (3) приходим к уравнению

$$Y = \alpha \left\langle H - P_{\max} \left[ 1 + \left( \frac{H}{P_{\max}} \right)^{-n} \right]^{-1/n} \right\rangle, \quad (4)$$

где  $\alpha = k_c(1 - \omega)$  — учитывает долю постоянно бессточной площади ( $\omega$ ) и относительные потери ( $k_c$ ) паводочного стока в период спада;  $H = (X + U) - (J + Z)$  — слой воды, заполняющий водоудерживающую емкость, т. е. избыток поступившей воды ( $X + U$ ) над просачиванием и испарением ( $J + Z$ );  $U$  — слой начального заполнения водоудерживающей емкости перед выпадением паводкообразующих осадков;  $P_{\max}$  — параметр, учитывающий водоудерживающую емкость бассейна при наиболее низком предшествующем увлажнении (принят 170 мм [9]);  $n$  — параметр, характеризующий нелинейный характер распределения водоудерживающей емкости на площади водосбора [12, 13].

Эмпирическую зависимость для слоя начального заполнения водоудерживающей емкости ( $U$ ) как функцию показателя начального увлажнения бассейна будем искать в следующем виде [9]:

$$U = d + c \lg \left[ k (m - m_{\min})^{St} + 1 \right], \quad (5)$$

где  $d$  — минимальный слой начального заполнения водоудерживающей емкости ( $U_{\min}$ ) для наиболее сухих предшествующих условий (в засушливых районах близок или равен нулю);  $c$  — параметр, характеризующий степень влияния предпаводочного увлажнения;  $m$  — показатель предпаводочного увлажнения бассейна;  $\bar{m}$  и  $m_{\min}$  — средняя многолетняя и минимальная его величина;  $St$  — показатель степени;  $k$  — масштабный множитель (при  $\bar{m} \geq 5$  принимаем  $k = 0,10$  при  $\bar{m} < 5$  принимаем  $k = 1$ ).

С учетом того, что с увеличением осадков ( $X$ ) возрастает доля испарения и впитывания ( $J + Z$ ) [14], уравнение для расчета  $J + Z$  аппроксимируется выражением

$$J + Z = b(X + U) \left[ 1 - f \left( \frac{m - m_{\min}}{\bar{m} - m_{\min}} \right)^{St} \right], \quad (6)$$

где  $b$  и  $f$  — эмпирические коэффициенты [15].

Параметры и критерий качества ( $\sigma_0/\sigma$ ) уравнений (4)–(6) для прогноза стока паводков  
(при  $d = 0$  и  $P_{\max} = 170$  мм)

Река – пункт	Параметры уравнений модели (4)–(6)						Критерий $\sigma_0/\sigma$
	$c$	$b$	$f$	$n$	$a$	$St$	
р. Онон – с. Верхний Ульхун	25,36	0,54	0,01	0,50	0,427	1,432	0,63
р. Онон – пгт Оловянная	12,57	0,22	0,58	1,00	0,278	2,707	0,44
р. Онон – с. Чирон	31,28	0,09	0,00	1,13	0,289	1,018	0,50
р. Кыра – с. Кыра	16,26	0,25	0,01	1,24	0,738	4,922	0,51
р. Иля – с. Иля	8,13	0,55	0,29	1,00	0,875	3,784	0,37
р. Ага – с. Агинское	22,39	0,76	0,61	1,00	1,000	0,819	0,43

Оценка констант в формулах (4)–(6) выполняется по данным наблюдений за прошлые годы. Для этой цели требуется рассчитать сток паводков ( $Y$ ), паводкообразующие осадки ( $X$ ) и показатели предпаводочного увлажнения бассейна ( $m$ ). Способ такой оценки на основе минимизации средней квадратичной ошибки расчета паводочного стока рассмотрен в [9]. Описанный подход в разных вариантах применялся для расчета стока половодья или паводков разными авторами [9, 12, 15].

В результате выполнения работы по построению моделей (табл. 4), описываемых формулами (4)–(6), с разными показателями предпаводочного увлажнения установлено, что использование уровня воды  $H_{x08}$  в качестве такого показателя отвечает «хорошей» или «удовлетворительной» оценкам качества методики прогноза. Это подтверждает возможность практического применения полученных уравнений в гидрологических прогнозах.

Между слоем стока и максимальными уровнями воды дождевых паводков существуют достаточно тесные связи. Как показали выполненные расчеты, эти связи могут быть положены в основу прогноза максимальных уровней воды в пунктах наблюдений бассейна р. Онон.

Характерная особенность рассматриваемой территории — наличие практически бессточных участков водосбора на дне межгорных впадин, в пределах речных долин, на равнинах, где преобладают степи, полупустыни и пустыни с засоленными почвами и бессточными озерами. Относительная площадь ( $\omega$ ) таких участков увеличивается в бассейнах крупных рек (Онон – пгт Оловянная, Онон – с. Чирон). Именно для этих бассейнов параметры  $a_1$  и  $\alpha = k_c(1 - \omega)$  уравнений (1) и (4) снижаются до 0,10–0,28. В рассмотренных бассейнах малых рек (Кыра, Иля, Ага) доля бессточной площади существенно сокращается, поэтому параметр  $\alpha$  увеличивается до 0,738–1,00 (см. табл. 4).

## ВЫВОДЫ

1. В результате выполненного анализа установлены зависимости паводочного стока от основных факторов его формирования, рекомендованные для выпуска прогнозов объема и максимального уровня воды дождевых паводков на реках бассейна р. Онон. Максимальные уровни имеют достаточно тесные связи со стоком паводков.

2. В качестве предсказателей выступают количество паводкообразующих осадков и косвенные характеристики предпаводочного увлажнения бассейна. Из трех рассмотренных характеристик наиболее приемлемым с точки зрения как репрезентативности, так и удобства использования в оперативных прогнозах является уровень воды замыкающего створа бассейна в день выпадения паводкообразующих осадков.

3. Методика прогноза может быть реализована в двух вариантах. Наиболее простое решение — использование уравнения множественной линейной регрессии. Другой способ — нелинейные уравнения на основе инфильтрационно-емкостной модели. Судя по величине критерия качества  $\sigma_0/\sigma$ , применение нелинейных уравнений может благоприятно сказаться на точности результатов.

4. Преимущество нелинейных уравнений для прогноза стока паводков состоит в том, что они более обоснованно аппроксимируют его зависимость от действующих факторов. Согласно [7, 8], учет физически обоснованной нелинейности оператора модели может иметь существенное значение в годы с экстремально высокими или экстремально низкими значениями исходных аргументов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каракин В. П., Шейнгауз А. С.** Земельные ресурсы бассейна реки Амур // Ресурсы Дальнего Востока. — 2004. — № 4. — С. 23–37.
2. **Ресурсы** поверхностных вод СССР / Под ред. А. П. Муранова. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — Т. 18, вып. 1. — 782 с.
3. **Полеванов В. К.** К истокам Амура в «Страну непобедимых» // Наука и жизнь. — 2008. — № 10. — С. 110–117.
4. **Марченко О. Ю.** Условия формирования и долговременные изменения экстремальной водности в бассейне реки Селенги: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М., 2013. — 19 с.
5. **Линслей Р., Колер М., Паулюс Д.** Прикладная гидрология. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 759 с.
6. **Игнатов А. В., Кравченко В. В., Чекмарёв А. А.** Стохастическое моделирование [Электронный ресурс]. — <http://www.irigs.irk.ru/work.html> (дата обращения 19.03.2015).
7. **Игнатов А. В.** Сравнение различных моделей годового гидрологического цикла и расчетных оценок месячного стока с водосбора // География и природ. ресурсы. — 2011. — № 4. — С. 114–118.
8. **Попов Е. Г.** Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. — М.: Гидрометеиздат, 1963. — 295 с.
9. **Бураков Д. А.** Основы гидрологических прогнозов объема и максимума весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. — 1978. — Вып. 11. — С. 3–49.
10. **Игнатов А. В.** Идея алгоритма экстраполяции нестационарного гидрометеорологического ряда с использованием оптимизированной эмпирической модели // География и природ. ресурсы. — 2010. — № 1. — С. 136–143.
11. **Гарцман Б. И., Шамов В. В., Третьяков А. С.** Система водно-балансовых моделей малого речного бассейна // География и природ. ресурсы. — 1993. — № 3. — С. 27–36.
12. **Бураков Д. А., Иванова О. И.** Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири // Метеорология и гидрология. — 2010. — № 6. — С. 87–100.
13. **Бураков Д. А., Литвинова О. С.** Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природ. ресурсы. — 2010. — № 3. — С. 111–120.
14. **Паршин В. Н.** Территориально общий метод прогноза стока — основа гидрологического обслуживания сельского хозяйства // Метеорология и гидрология. — 1965. — № 12. — С. 3–10.
15. **Литвинова О. С.** Условия формирования и прогнозы весеннего половодья на реках южнотаежного, лесостепного и степного междуречья Оби и Иртыша: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Новосибирск: Изд-во Новосиб. пед. ун-та, 2011. — 24 с.

*Поступила в редакцию 21 апреля 2015 г.*