

УДК 556.06.8:556.166:556.512

## МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЕЖЕДНЕВНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД НА РЕКАХ СЕЛЕНГА И ОНОН

*Д.А. Бураков<sup>1</sup>, В.В. Лариошкин<sup>1</sup>, В.В. Алешина<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск;*

<sup>2</sup>*Забайкальское управление по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды, г. Чита  
daburakov@yandex.ru, gidroprognoz2013@mail.ru*

Развитие современной методической базы гидрологических прогнозов нового поколения в Сибирских УГМС опирается на широкую компьютеризацию прогностических центров. Методы, основанные на эмпирической корреляции, постепенно уходят в прошлое. Им на смену приходят комбинированные модели гидрологических прогнозов, описывающие процессы формирования стока на склонах и в руслах. Разработанная методика прогноза ежедневных уровней воды на реках Селенга и Онон, основанная на использовании концептуальной модели формирования стока, позволяет выпускать прогноз с заблаговременностью до 4 суток. Эффективность методики была оценена на архивных данных, а также в ходе оперативных испытаний в летне-осенний период 2014 года.

*Ключевые слова:* уровни воды, речная система, паводки, краткосрочные гидрологические прогнозы.

### Введение

Река Селенга – самый крупный приток озера Байкал, начинается в Монголии, в месте слияния рек Идэр и Мурэн. Селенга, Байкал и вытекающая из него Ангара входят в бассейн Енисея – самой многоводной реки России. Общая площадь бассейна Селенги равна 447 060 км<sup>2</sup>, 63 % этой площади находится в Монголии и 37 % – в пределах Российской Федерации. Сток Селенги составляет примерно половину притока речных вод, поступающих в Байкал.

С бассейном Селенги граничит бассейн реки Онон. Ее верхнее течение расположено в северо-восточной Монголии, среднее и нижнее – в Забайкальском крае России. Длина 1032 км, площадь водосбора 96 200 км<sup>2</sup>. В Монголии находится 46 % водосборной площади, в России 54 %. Сливаясь с рекой Ингода, Онон образует р. Шилку. От слияния рек Шилки и Аргуни начинается река Амур, одна из крупнейших рек восточной Азии.

Для водного режима рек рассматриваемой территории характерно низкое весеннее половодье, дождевые паводки летом и осенью и низкая

зимняя межень. По своим природным условиям бассейны Селенги и Онона относятся к паводкоопасным регионам. Периодически наблюдаются наводнения, носящие иногда катастрофический характер и причиняющие значительные убытки экономике. Наводнения в 1897, 1948, 1958, 1971, 1984, 1988, 1991 и 1998 гг. охватывали одновременно огромные территории, сопровождались человеческими жертвами, причинили значительный материальный ущерб [6, 9, 12].

Ниже объектом исследований является система краткосрочного прогнозирования характеристик паводкового стока трансграничных рек Селенга и Онон на основе информации о ежедневных осадках и уровнях воды в российской части их бассейнов. Краткосрочные гидрологические прогнозы позволяют своевременно оповестить об опасности наводнений. Кроме этого, прогнозирование речного стока является необходимым условием эффективного использования водных ресурсов.

### **Условия формирования дождевого стока рек Селенга и Онон**

Основными элементами рельефа рассматриваемых бассейнов являются горные хребты, слаборасчлененные плато, межгорные впадины, долины и котловины. Преобладающие высоты местности от 700 до 2000 м, наибольшая высота 4031 м (гора Отгон-Тэнгэр, исток реки Идэр). На вершинах гор, поднимающихся выше 2000 м, располагается зона гольцов с зарослями кедрового стланика, а на высотах от 1800 до 2000 м преобладает предгольцовое редколесье. На склонах хребтов (кроме южных) господствуют лиственничные, кедровые и сосновые леса, покрывающие около 40 % территории рассматриваемых бассейнов. Южные склоны – нередко безлесны. Межгорные впадины заполнены песчаниками и глинами, перекрытыми аллювиальными и делювиальными отложениями. Сухие равнины и котловины представлены степями, полупустынями и пустынями. В засушливых условиях встречаются засоленные земли и участки, лишенные почвенно-растительного покрова (пески, каменистые россыпи, солончаки). Густота речной сети составляет в среднем 0,55 км/км<sup>2</sup>. Наименьшей густотой речной сети характеризуется Онон-Борзинская степь, где господствуют бессточные и полубессточные области (сток только в периоды обильных дождей) [6, 9, 14].

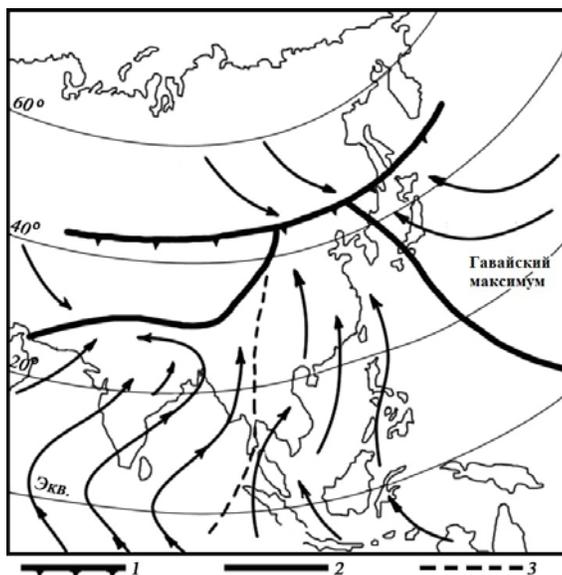
Климат рассматриваемой территории континентальный. Зимой, суровой и малоснежной, здесь располагается мощный отрог Сибирского антициклона. Лето теплое, короткое. Годовое количество осадков изменяется от 600 мм в горно-таежной части бассейна до 200–300 мм в сухостепных районах. Основная часть осадков выпадает в период летних муссонов.

В летнее время над бассейном Амура распространяется летняя дальневосточная депрессия, накрывающая Северо-Восточный Китай,

Восточное Забайкалье, Приамурье и Монголию. Наличию летней дальневосточной депрессии способствует блокирующий барический гребень в тропических водах северной части Тихого океана – Гавайский максимум (рис. 1), который в годы активизации выноса влажного тихоокеанского муссона в Приамурье и Забайкалье смещается к северо-западу и, наоборот, в годы ослабленного переноса занимает юго-восточное положение [12, 13].

Циклоническое поле создается как циклонами, приходящими из других районов Азии, так и местными циклонами. После местных наибольшую повторяемость имеют циклоны, возникающие на монгольской ветви полярного фронта, затем прибайкальские. Наименьшую повторяемость имеют циклоны, смещающиеся по тихоокеанской траектории. [12, 16].

Фронтальная система, разделяющая воздушные массы умеренных широт и тропиков, схематически представлена на рис. 1 [12, 13]. С возникающими на ней циклоническими возмущениями связано выпадение осадков в мае – сентябре. Расположение и интенсивность развития рассмотренной фронтальной системы определяют количество выпадающих осадков. При северном положении этой системы, а также Тихоокеанского гребня (Гавайский максимум) наблюдается усиление циклонической циркуляции, муссон может достигать северных границ Китая, Монголии и Забайкалья (включая бассейны Селенги и Онона).



**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.

При смещении рассматриваемой системы к югу наблюдается общее ослабление циркуляции и снижение количества осадков в районе Забайкалья, Монголии и Северного Китая. В этом случае внутритропическая зона конвергенции (рис. 1) и область значительных осадков смещаются в южные районы Китая.

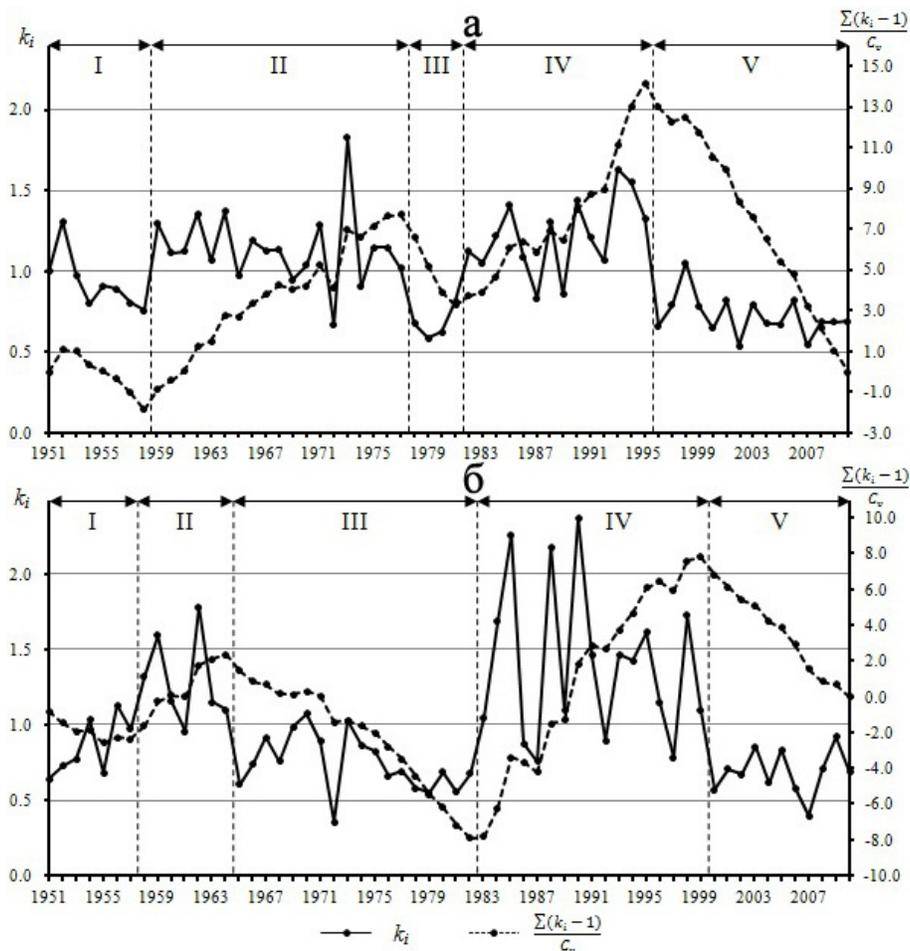
Согласно Б.Д. Зайкову [7], водный режим рассматриваемых рек относится к дальневосточному типу – с низким снеговым половодьем в апреле, и следующими друг за другом дождевыми паводками в мае – сентябре. Зимний сток (ноябрь – март) не превышает 5–10 % годового объема.

Весенний сток значительно уступает дождевому, формирующемуся в теплое время года в виде следующих друг за другом паводков, прерывающихся периодами низкого стока различной продолжительности.

На рис. 2 представлен временной ход модульных коэффициентов и нормированная интегральная кривая дождевого стока (суммарный сток за май – сентябрь) для рек Селенга и Онон за период совместных наблюдений (1951–2010 гг.).

Многолетние периоды высокой и низкой водности, связанные, как показано выше, с положением внутритропической зоны конвергенции, обозначены римскими цифрами (маловодные I, III, V; многоводные II, IV). Границы этих периодов на реках Селенга и Онон не вполне совпадают: периоды II и III существенно различаются по продолжительности (рис. 2). По этой причине временной ход дождевого стока за 1951–1981 гг. на реках Селенга и Онон не отличается высокой степенью синхронности (коэффициент парной корреляции 0,43). Периоды IV (многоводный) и V (маловодный) для сравниваемых рек близко совпадают во времени (рис. 2), что предопределяет сравнительно высокую степень синхронности временного хода стока рассматриваемых рек за 1982–2010 гг. (коэффициент парной корреляции 0,78). 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 на реках Селенга и Онон. Статистические характеристики (средний расход воды и коэффициент его вариации) за расчетный (1980–2010 гг.) и полный (1951–2010 гг.) ряды наблюдений практически совпали.

По обеспеченности максимальных расходов воды мы выделяем катастрофические паводки обеспеченностью менее 1 %, выдающиеся (1–5 %), высокие (5–25 %), значительные (25–50 %), средние и низкие (50–90 %). Для рассматриваемых бассейнов за период 1980–2010 гг. наблюдался один катастрофический паводок на р. Селенге – с. Новоселенгинск. Повторяемость выдающихся паводков не превышает 2 %, высоких 9–11 %, значительных 12–26 %, средних и низких 64–76 % (табл. 1).



**Рис. 2.** Временной ход стока за теплый период (май – сентябрь):  
 р. Селенга – с. Новоселенгинск (а); р. Онон – с. Чирон (б).  
 1 – хронологический ход модульных коэффициентов; 2 – разностная интегральная кривая.

Вследствие многообразия процессов формирования речного стока, а также ограниченности данных наблюдений, при разработке практических методов прогноза уровней и расходов воды дождевых паводков приходится прибегать к схематизации моделей формирования стока. Ландшафтно-гидрологическая основа, обеспечивающая реализацию модели формирования речного стока, не может включать такие локальные природные геосистемы, как фация, урочище, местность, поскольку в этом случае придется выделить сотни мелких природных комплексов, которые невозможно обеспечить гидрометеорологической информацией.

**Таблица 1.** Повторяемость (%) паводков различных градаций\* по данным наблюдений за 1980–2010 гг.

Градации паводков по максимальным расходам воды**	р. Селенга		р. Онон	
	с. Новоселенгинск (F = 360000 км <sup>2</sup> )	с. Кабанск (F = 445000 км <sup>2</sup> )	ст. Оловянная (F = 75100 км <sup>2</sup> )	с. Чирон (F = 95900 км <sup>2</sup> )
Катастрофические <1 %	1	–	–	–
Выдающиеся 1–5 %	1	1	2	1
Высокие 5–25 %	11	9	10	11
Значительные 25–50 %	23	26	23	12
Средние и низкие 50–90 %	64	64	65	76

*Примечания:* \* Оценка повторяемости паводков различных градаций производилась по всей совокупности паводков.

\*\* Максимальные расходы различной обеспеченности получены по наивысшим максимумам в году.

С учетом сказанного в основу разработки концептуальных моделей прогноза речного стока целесообразно положить следующие принципы ландшафтно-географического районирования [4].

1. В пределах района или высотной зоны коэффициенты парной корреляции декадных сумм осадков в пунктах наблюдений должны быть достаточно высокими, что позволяет приближенно учесть их изменчивость с использованием данных наблюдений ограниченного числа пунктов. Заметим, что в пределах летней дальневосточной депрессии циклоны имеют обыкновение стационаривать. По этой причине осадки, формирующие дождевые паводки, охватывают нередко обширные площади.

2. Учет пространственного разнообразия элементов ландшафта внутри каждого района осуществляется путем его расчленения на высотные зоны. Тем самым учитывается высотная поясность ландшафтно-климатических условий. 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.

### Концептуальная математическая модель прогноза

Физико-математические модели гидрологических прогнозов с распределенными параметрами на практике пока не используются в связи с тем, что, как правило, они не обеспечены необходимой гидрометеорологической информацией [10].

Концептуальная модель формирования стока, используемая в сибирских подразделениях Росгидромета, основывается на следующих предпосылках [1, 3, 5]:

- в бассейнах рек выделяются ландшафтно-гидрологические районы и высотные зоны;
- в районах и высотных зонах пространственная неравномерность снегонакопления и емкостного поглощения учитывается с применением вероятностных распределений;
- русловое добегание воды рассчитывается с применением функции плотности вероятностного распределения времени добегания элементарных объемов воды и теоретических формул моментов времени добегания [2, 5].

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

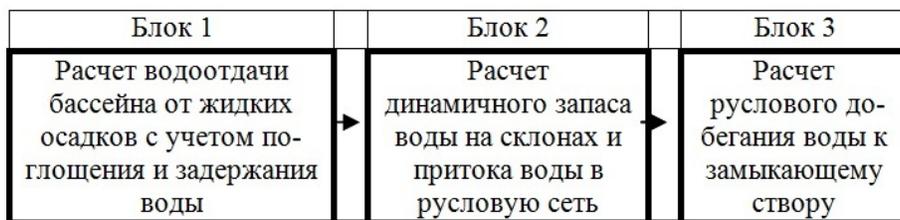


Рис. 3. Общая структура модели формирования стока.

Рассмотрим расчетные соотношения модели. В каждом бассейне, в зависимости от его размеров, выделено от одного до трех районов, в замыкающих створах которых проводятся измерения стока воды (табл. 2, 3).

Прогнозируемый расход (уровень) воды  $Q(t + \Delta t)$  представляется в виде:

$$Q(t + \Delta t) = Q_1(t + \Delta t) + Q_w(t + \Delta t), \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза, сут.;  $Q_1(t + \Delta t)$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с, обусловленный поступлением притока в русловую сеть  $q(t)$  рассматриваемого района за период заблаговременности  $\Delta t$ , рассчитывающийся с применением интеграла Дюамеля (свертки):

$$Q_1(t + \Delta t) = \int_0^{\Delta t} q(t + \Delta t - \tau) \times f(\tau) \times d\tau, \quad (2)$$

$f(\tau)$  – кривая добегания, методы количественного описания которой, основанные на вероятностных моделях, рассмотрены в [2];  $Q_w(t + \Delta t)$  –

характеризует составляющую расхода воды, сформированную за счет истощения начального запаса воды в русловой сети бассейна [1, 3, 5].

**Таблица 2.** Морфометрические характеристики районов р. Онон

Характеристики	Номер площадки					
	1	2	3	4	5	6
<b>р. Онон – ст. Оловянная, площадь водосбора 75100 км<sup>2</sup></b>						
<b>Район 1 (Бытэв – ст. Оловянная), площадь 25600 км<sup>2</sup></b>						
Расстояние площадки до замыкающего створа, км	0	144				
Расстояние между эквидистантами, км	144	144				
Размеры площадки (доли единицы)	0,56	0,44				
Средняя высота высотной зоны, м	841	1050	1290	1530	1784	
Доля площади высотной зоны	0,354	0,395	0,181	0,057	0,012	
<b>Район 2 (исток – Бытэв), площадь района 49500 км<sup>2</sup></b>						
Расстояние площадки до замыкающего створа, км	288	399	510	621	732	
Расстояние между эквидистантами, км	111	111	111	111	111	
Размеры площадки (доли единицы)	0,091	0,118	0,318	0,318	0,155	
Средняя высота высотной зоны, м	935	1190	1430	1670	1910	2150
Доля площади высотной зоны	0,167	0,390	0,283	0,125	0,033	0,003

Расчеты водоотдачи и притока в русловую сеть проводятся за последовательные паводкообразующие периоды – отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна превышает суточное испарение и просачивание.

Для каждого суточного интервала паводкообразующего периода рассчитывается интегральный слой водоотдачи  $i$ -й высотной зоны  $Y_i(t)$  по инфильтрационно-емкостной схеме Е.Г. Попова [15]:

$$Y_i(t) = (1 - \omega)[H_{x_i}(t) - P_{d_i} th(H_{x_i}(t) / P_{d_i})], \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $\omega$  – доля постоянно бессточной площади;  $H_{x_i}(t)$  – интегральный слой воды, поступивший для заполнения водоудерживающей емкости бассейна от начала паводкообразующего дождя до момента  $t$ ;  $P_{d_i}$  – параметр емкостного поглощения воды, характеризующий размеры водоудерживающей емкости для высотной зоны;  $th$  – функция гиперболического тангенса.

Суточная водоотдача высотной зоны  $u_i(t)$  определяется как

$$u_i(t) = Y_i(t) - Y_i(t-1). \quad (4)$$

Таблица 3. Морфометрические характеристики районов р. Селенга

Характеристики	Номер площадки						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>р. Селенга – г. Улан-Удэ, площадь водосбора 440000 км<sup>2</sup></b>							
<b>Район 1 (Усть-Кяхта – г. Улан-Удэ), площадь района 158000 км<sup>2</sup></b>							
Расстояние площадки до замыкающего створа, км	0	61	122	221	320		
Расстояние между эквидистантами, км	61	61	99	99	99		
Размеры площадки (доли единицы)	0,03	0,10	0,23	0,31	0,34		
Средняя высота высотной зоны, м	609	920	1220	1250	1820	2103	
Доля площади высотной зоны	0,16	0,37	0,28	0,15	0,04	0,005	
<b>Район 2 (исток – Усть-Кяхта), площадь района 282000 км<sup>2</sup></b>							
Расстояние площадки до замыкающего створа, км	419	518	617	716	815	914	1013
Расстояние между эквидистантами, км	99	99	99	99	99	99	160
Размеры площадки (доли единицы)	0,11	0,15	0,12	0,13	0,16	0,14	0,19
Средняя высота высотной зоны, м	743	1140	1560	1980	2400	2820	3238
Доля площади высотной зоны	0,07	0,26	0,33	0,22	0,09	0,03	0,002
<b>р. Селенга – с. Кабанск, площадь водосбора 445000 км<sup>2</sup></b>							
<b>Район 1 (Усть-Кяхта – с. Кабанск), площадь района 163000 км<sup>2</sup></b>							
Расстояние площадки до замыкающего створа, км	0	90	151	212	311	410	
Расстояние между эквидистантами, км	90	61	61	99	99	99	
Размеры площадки (доли единицы)	0,03	0,05	0,09	0,22	0,29	0,32	
Средняя высота высотной зоны, м	609	920	1220	1520	1820	2103	
Доля площади высотной зоны	0,16	0,37	0,28	0,15	0,04	0,005	
<b>Район 2 (исток – Усть-Кяхта), площадь района 282000 км<sup>2</sup></b>							
Расстояние площадки до замыкающего створа, км	509	608	707	806	905	1004	1103
Расстояние между эквидистантами, км	99	99	99	99	99	99	160
Размеры площадки (доли единицы)	0,11	0,15	0,12	0,13	0,16	0,14	0,19
Средняя высота высотной зоны, м	743	1140	1560	1980	2400	2820	3238
Доля площади высотной зоны	0,07	0,26	0,33	0,22	0,09	0,03	0,002

В (3) интегральный слой воды  $H_{x_i}(t)$  определяется с учетом осадков  $x_i$ , испарения  $z_i$  и питания подземных вод  $I$ :

$$H_{x_i}(t) = \sum_{j=t_d}^t (x_i - z_i - I)_j, \quad (5)$$

где  $t_d$  – момент начала паводкообразующего периода.

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  $I$  приближенно принимается равным суточному расходу воды в конце типовой кривой спада, мм/сут, характеризующему среднее пополнение подземного (базисного) стока.

Для дождевого периода параметр емкостного поглощения  $P_{0di}$  зоны равен

$$P_{0di} = P_{\max d} - C_d \lg(m_{td} + 1) - \text{grad}p_i \times \frac{\Delta H}{100}, \quad (6)$$

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

В расчетах стока дождевых паводков за индекс предпаводочного увлажнения почвы  $m_{td}$  на момент начала дождя  $t_d$  использовались следующие косвенные показатели: расход (уровень) воды в реке, и индекс предшествующих осадков  $m_t$  [1, 11], определяемый по следующей усовершенствованной формуле:

$$m(t) = (S + U)K^t + \sum_{j=0}^{j=t} x_{t-j} (K_{t-j})^j, \quad K_{t-j} = K_0 \exp[-c\theta_{t-j}], \quad (7)$$

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.

В период истощения склонового стока, когда суточные осадки меньше потерь на испарение и впитывание  $x \leq (z + I)$ , водоотдача высотной зоны  $u_i(t)$  принимает отрицательное значение. Уравнение для ее расчета получает вид:

$$u_i(t) = g_i(t) \times (x_i - z_i - I)_t, \quad (8)$$

где  $(x_i - z_i - I)_t \leq 0$ ;  $g(t)$  – доля площади речного бассейна, с которой формируются потери динамического запаса воды. Размеры  $g(t)$  в период

истощения сокращаются по мере уменьшения динамичного запаса воды и спада склонового притока в русловую сеть  $q_i(t)$ , что позволяет записать

$$g_i(t) = (1 - w)\{1 - \exp[-a_{c_i} q_i(t)]\}, \quad (9)$$

где  $a_{c_i}$  – коэффициент;  $w$  – доля постоянно бессточной площади в бассейне [3].

Результаты расчета водоотдачи высотной зоны положены в основу определения динамичного запаса воды на склонах и притока воды в русловую сеть (рис. 3). Подмодель склонового притока в русловую сеть  $q_i(t)$  основывается на концепции динамичного (гравитационного) запаса воды на склонах  $W_i(t)$ , связанного с  $q_i(t)$  в общем случае нелинейно [3, 5]:

$$W_i(t+1) = W_i(t) + u_i(t+1) - q_i(t+1), \quad (10)$$

$$q_i(t+1) = \alpha \left[ \frac{W_i(t) + W_i(t+1)}{2} \right]^n, \quad (11)$$

где  $\alpha$  – переменный коэффициент, учитывающий гидравлические условия склонового стока;  $n$  – показатель степени.

В общем случае, когда речной бассейн включает  $n_j$  районов, суммарный приток в русловую сеть определяется суммированием:

$$q_i(t+1) = \sum_{i=1}^{n_j} q_{ij}(t+1) \varphi_{ij}, \quad (12)$$

где  $q_i(t+1)$  – суммарный приток в русловую сеть для района  $j$ ;  $\varphi_{ij}$  – доля площади  $i$ -й высотной зоны в районе  $j$ ;

С учетом формул (1), (2), (12) запишем:

$$Q(t + \Delta t) = \left[ \sum_{j=1}^{n_j} \int_0^{\Delta t} q_j(t + \Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{\min}, \quad (13)$$

где  $Q(t + \Delta t)$  – расход воды в замыкающем створе;  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $f_j(\tau)$  – кривая добега бокового притока для района  $j$ ; рассматриваемая как плотность распределения времени добега элементарных объемов воды в гидрологической системе [2, 5];  $Q_w(t + \Delta t)$  – составляющая расхода воды, обусловленная истощением начального (на момент  $t$ ) запаса воды в русловой сети;  $Q_{\min}$  – устойчивое подземное («базисное») питание реки.

Выразив запас воды в русловой сети и расход воды в замыкающем створе в зависимости от высот уровней воды  $H_i(t)$  в пунктах наблюдений речной системы и обозначив сборные коэффициенты через  $C_k$ , получим следующее уравнение [3, 5]:

$$H(t + \Delta t) = \left[ c_0 \sum_{j=1}^{n_j} \int_0^{\Delta t} q_j(t + \Delta t - \tau) f_j(\tau) d\tau + \sum_{k=1}^{n_H} c_k (H_k(t) - H_{\min k})^{Y_1} + \sum_{k=1}^{n_H} c_{k+n_H} (H_k(t) - H_k(t-1)) \right]^{1/Y_2} + H_{\min} \quad (14)$$

где  $H(t + \Delta t)$  – прогнозируемый уровень воды в замыкающем створе;  $c_i$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$  – коэффициенты;  $H_{i\min}$  – минимальный уровень воды в  $i$ -м пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета;  $H_{\min}$  – то же в замыкающем створе;  $n_H$  – количество створов с наблюдениями за уровнями воды в речном бассейне (без учета замыкающего створа);  $Y_1$ ,  $Y_2$  – показатели степени, учитывающие нелинейность зависимостей площади поперечного сечения ( $Y_1$ ) и расхода воды ( $Y_2$ ) от уровней воды.

Методика оптимизации параметров модели приводится в [3].

### Прогноз ежедневных уровней воды

Для реализации вероятностной модели руслового добегания описание русловой сети представляется в виде схемы эквидистант (рис. 4) – линий, соединяющих точки, находящиеся на одинаковом расстоянии вдоль русел до замыкающего створа.

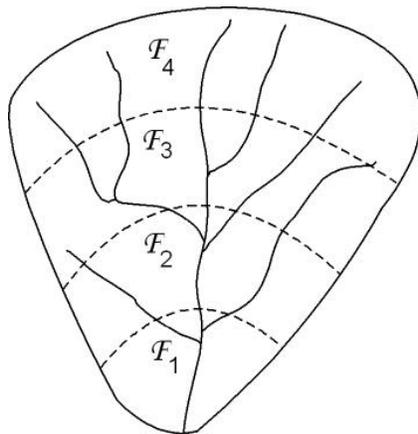


Рис. 4. Схема расположения эквидистант в бассейне реки.

Пусть  $F_i$  – размеры площадки между смежными эквидистантами.

Для бассейнов рек Онона и Селенги в табл. 2, 3 представлены:

- 1) расстояния от нижних границ каждой площадки до замыкающего створа;
- 2) расстояния по руслам между эквидистантами, выделяющими каждую площадку в бассейне или районе;
- 3) Относительные размеры площадок  $f_i = \frac{F_i}{F}$  для бассейна или

района.

Напомним, что районы выделяются на достаточно крупных реках для приближенного учета неравномерности выпадения осадков по площади их водосборов. В горных бассейнах выделяются высотные зоны – для учета высотной поясности в распределении гидрометеорологических характеристик. В табл. 2 и 3 приведены средние высоты этих зон и доли их площади по отношению к площади района для р. Онон – ст. Оловянная и р. Селенга – г. Улан-Удэ.

Реки Селенга и Онон являются трансграничными, что накладывает определенные трудности на возможности решения задач гидрологических прогнозов. Отсутствие информации по территории Монголии в Гидрометцентре Забайкальского УГМС снижает точность прогнозов. Точность прогнозов возрастает ниже по течению по мере увеличения площади водосбора, освещенной гидрометеорологическими наблюдениями.

Сеть пунктов наблюдений атмосферных осадков, используемая для разработки методик и выпуска гидрологических прогнозов, позволяет приближенно оценить только ход осадков фронтального происхождения, распространяющихся на большие площади порядка тысяч квадратных километров. Территориальное распределение локальных (конвективных) ливневых осадков существующая сеть осадкомеров надежно учесть не в состоянии из-за недостаточной ее густоты. Кроме того, пункты наблюдений приурочены к речным долинам и не вполне учитывают количество осадков на склонах гор.

Для реализации модели используются данные наблюдений о ежедневных уровнях воды на гидрологических постах с 21 марта по 30 октября в сроки 08 и 20 ч (табл. 4, 5). Также необходимы ежедневные данные о суточных величинах осадков и температуры воздуха (табл. 6). В качестве начальных условий необходимо задать величину запасов воды в снежном покрове на конец второй декады марта.

Опыт предшествующих исследований показывают, что наиболее информативными предикторами прогностической модели, учитывающей только данные метеорологических наблюдений, являются паводкообразующие осадки и показатели предпаводочного увлажнения бассейнов.

**Таблица 4.** Список пунктов гидрологических наблюдений в бассейне р. Онон

№	Пункты наблюдений	F вод., км <sup>2</sup>	Лесистость, %	Заболоченность, %	Н, см	Q, м <sup>3</sup> /с	Ср. высота водосбора, м БС
1	р. Онон – с. Верхний Ульхун	45000			уров.	расх.	
2	р. Онон – с. Бытэв	49500			уров.	расх.	
3	р. Онон – с. Чиндант	63400			уров.		
4	р. Онон – ст. Оловянная	75100			уров.	расх.	
5	р. Онон – с. Чирон	95900			уров.	расх.	
6	р. Кыра – с. Кыра	5100	50	5	уров.	расх.	1330
7	р. Иля – с. Иля	1370	80	10	уров.	расх.	1080
8	р. Борзя – с. Усть-Озерная	1920	25	5	уров.		944
9	р. Борзя – г. Борзя	3980	20	5	уров.	расх.	900
10	р. Ага – с. Агинское	2190	50	10	уров.	расх.	878
11	р. Унда – с. Шелопугино	2960	70	10	уров.	расх.	921

**Таблица 5.** Список пунктов гидрологических наблюдений в бассейне р. Селенга

№	Пункты наблюдений	F вод., км <sup>2</sup>	Лесистость, %	Заболоченность, %	Н, см	Q, м <sup>3</sup> /с	Ср. высота водосбора, м БС
1	р. Селенга – с. Усть-Кяхта	282000			уров.		
2	р. Селенга – с. Новоселенгинск	360000			уров.	расх.	
3	р. Селенга – г. Улан-Удэ	440000			уров.		
4	р. Селенга – с. Кабанск	445000			уров.	расх.	
5	р. Джиды – с. Хамней	8480	85	<10	уров.	расх.	1520
6	р. Чикой – с. Черемхово	8890			уров.		
7	р. Чикой – с. Гремячка	15600	85	<5	уров.	расх.	1300
8	р. Чикой – с. Чиккожзавод	41400	75	<5	уров.		
9	р. Чикой – с. Поворот	44700			уров.	расх.	1260
10	р. Менза – с. Укыр	6550			уров.		
11	р. Хилок – с. Малета	25700	85	<5	уров.	расх.	1050
12	р. Уда – с. Удинск	20800			уров.		
13	р. Уда – с. Первомаевка	28300			уров.		
14	р. Уда – г. Улан-Удэ	49863	95	<5	уров.	расх.	933
15	р. Курба – с. Новая Курба	58500	85	<5	уров.	расх.	1080

**Таблица 6.** Список пунктов наблюдений за осадками ( $x$ ) и температурой воздуха ( $t$ )

Бассейн р. Онон		Бассейн р. Селенга	
Пункты наблюдений	Используемые характеристики	Пункты наблюдений	Используемые характеристики
с. Кыра	$x, t$	г. Кяхта	$x, t$
с. Мангут	$x, t$	с. Красный Чикой	$x, t$
с. Акша	$x, t$	г. Улан-Удэ	$x, t$
с. Иля	$x, t$	с. Кабанск	$x, t$
с. Нижний Цасучей	$x, t$		
г. Борзя	$x, t$		
ст. Оловянная	$x, t$		
с. Агинское	$x, t$		
с. Шелопугино	$x$		

Например, для небольшой реки Ага – с. Агинское ( $F = 2190 \text{ км}^2$ ) с применением программного пакета [8] установлена линейная зависимость паводочного стока с количеством паводкообразующих осадков, которые определены по данным двух пунктов: с. Агинское и с. Иля. В качестве показателя увлажнения  $m$  приняты уровни воды в пункте р. Ага – с. Агинское в день выпадения осадков. Указанные предикторы входят в уравнение с высокими значениями  $t$ -статистик, что подтверждает их репрезентативность. Коэффициенты множественной корреляции превышают 0,80. Аналогичные зависимости установлены для бассейнов р. Иля – с. Иля, р. Онон – с. Верхний Ульхун, р. Онон – ст. Оловянная.

Существенный вклад в повышение точности прогноза дает учет информации об уровнях воды в 8 и 20 ч в речной сети бассейна на дату выпуска прогноза. Тем самым учитываются начальные русловые запасы воды на эту дату. В табл. 7 представлены результаты оценки показателя качества методики прогнозов за 2000–2010 гг. (данные зависимых наблюдений).

Качество проверочных расчетов по материалам наблюдений характеризуется как «удовлетворительное» и «хорошее» (табл. 7). Точность прогнозов снижается с приближением к границе с Монголией. Так, для р. Онон – с. Верхний Ульхун у границы с Монголией, критерии качества для всех заблаговременностей прогноза превышают 0,70. 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».

Бассейн р. Селенги на площади 299 000 км<sup>2</sup> (территория Монголии) не освещен данными наблюдений. Критерии качества прогноза

при заблаговременности более 2 суток у Новоселенгинска превышают 0,67–0,70 (табл. 7). Для г. Улан-Удэ при заблаговременности 1–5 суток качество прогнозов оценивается критерием от 0,48 до 0,60, т. е. «хорошее» и «удовлетворительное». Оценка качества прогноза за 2013 год, который не использовался при разработке методики, дает аналогичные и несколько лучшие результаты.

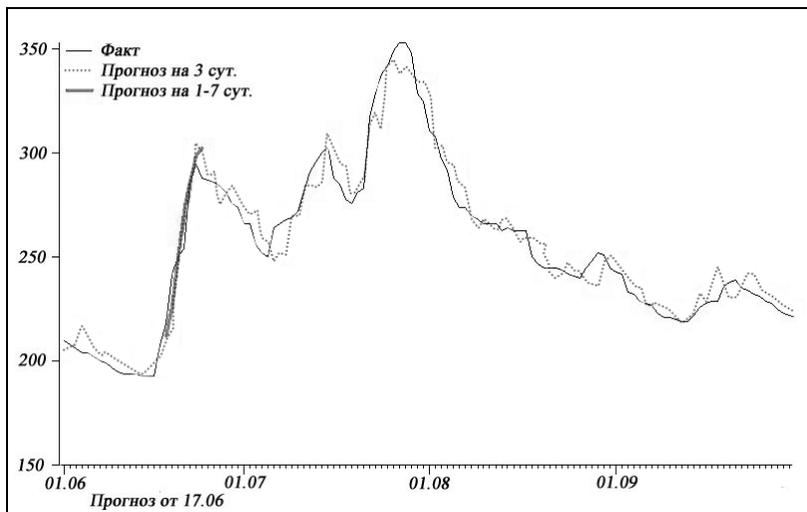
**Таблица 7.** Характеристики точности расчетов ежедневных уровней воды на реках Онон и Селенга за 2000-2010 гг.

Заблаговременность прогноза, сутки	1	2	3	4	5	6	7
р. Онон – с. Верхний Ульхун	0,776	0,736	0,736	0,731	0,761	0,756	0,738
р. Онон – с. Бытэв	0,731	0,637	0,616	0,625	0,656	0,672	0,670
р. Онон – с. Чиндант	0,657	0,558	0,482	0,436	0,416	0,429	0,464
р. Онон – ст. Оловянная	0,806	0,752	0,726	0,704	0,684	0,677	0,681
р. Онон – с. Чирон	0,850	0,779	0,722	0,673	0,650	0,627	0,623
р. Селенга – с. Новоселенгинск	0,665	0,660	0,669	0,703	0,735	0,756	0,775
р. Селенга – г. Улан-Удэ	0,484	0,488	0,500	0,542	0,601	0,647	0,683
р. Селенга – с. Кабанск	0,713	0,692	0,663	0,647	0,649	0,670	0,665

Производственные испытания автоматизированного метода прогноза ежедневных уровней воды проведены в Гидрометцентре Забайкальского УГМС в летне-осенний период 2014 года. Модель позволяет выпускать прогноз с заблаговременностью до 4–7 суток. Для задания температуры и осадков за период заблаговременности используются данные оперативных метеорологических прогнозов систем метеорологического прогнозирования COSMO-Ru (Росгидромет) и других. 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 % (рис. 5). По р. Селенге в пунктах с. Новоселенгинск, г. Улан-Удэ, с. Кабанск оправдываемость прогнозов составила от 97 до 100 %. По итогам испытаний по всем перечисленным пунктам метод внедрен в практику прогнозов Забайкальского УГМС в качестве основного.

Рассмотрим влияние информационного обеспечения на точность прогноза паводков на примере р. Селенги (пункты с. Новоселенгинск, г. Улан-Удэ, с. Кабанск).

В настоящее время в нижнем створе (с. Кабанск) прогнозы даются только по наблюдениям пунктов, расположенных на территории России: 10 пунктов – уровни воды; 4 пункта – осадки; 4 пункта – температура воздуха.



**Рис. 5.** Расчетный (линия черного цвета), и прогностические (заблаговременность – 3 суток) гидрографы уровней воды р. Онон – ст. Оловянная.

За период с 2007 по 2010 г. в отделе гидрологических прогнозов Забайкальского УГМС имеются данные наблюдений не только по российской, но и по монгольской части бассейна (всего по бассейну 18 пунктов – уровни воды; 11 пунктов – осадки, 12 пунктов – температура воздуха). Сравним, как изменятся показатели качества методики прогноза для указанных выше пунктов при включении монгольских данных в обучающую выборку. В табл. 8 приведены результаты оценки качества методики для различной заблаговременности прогноза.

На ход уровней в нижнем створе (с. Кабанск) при заблаговременности прогноза 1–7 суток основное влияние оказывает приток воды с российской части водосбора р. Селенги. По этой причине качество методики при учете монгольских данных улучшается незначительно. Однако для пунктов, расположенных выше по течению, критерий качества прогноза для заблаговременности 3–4 суток различается уже на 0,10 и выше, что свидетельствует о повышении точности прогноза при использовании монгольских данных.

Таким образом, в процессе дальнейшего развития сотрудничества России и Монголии целесообразно предусмотреть обмен гидрометеорологической информацией, разработку методов прогнозов и выпуск прогнозов в режиме оперативного обслуживания для всех заинтересованных сторон. Это позволит повысить уровень гидрометеорологической безопасности населения и экономики наших стран, поскольку сток дождевых паводков является преобладающим источником водного питания рассматриваемых рек.

**Таблица 8.** Критерий качества  $\sigma_{\Delta} / \sigma$  прогноза ежедневных уровней воды

Заблаговременность, сутки	1	2	3	4	5	6	7
<b>р. Селенга – с. Кабанск</b>							
По наблюдениям пунктов на территории России	0,582	0,495	0,476	0,494	0,497	0,515	0,519
По наблюдениям пунктов на территории России и Монголии	0,536	0,461	0,435	0,441	0,436	0,460	0,480
<b>р. Селенга – г. Улан-Удэ</b>							
По наблюдениям пунктов на территории России	0,630	0,585	0,544	0,569	0,607	0,616	0,614
По наблюдениям пунктов на территории России и Монголии	0,611	0,535	0,459	0,467	0,520	0,543	0,574
<b>р. Селенга – с. Новоселенгинск</b>							
По наблюдениям пунктов на территории России	0,768	0,727	0,715	0,727	0,726	0,731	0,726
По наблюдениям пунктов на территории России и Монголии	0,710	0,638	0,603	0,616	0,640	0,670	0,710

### Заключение

В результате выполненных исследований создана оперативная система прогноза ежедневных уровней воды на реках Селенга и Онон с заблаговременностью до 7 суток. Важной составляющей технологической линии прогноза дождевых паводков, помимо методики и программного обеспечения собственно прогнозов, является организация передачи данных от сервера УГМС на компьютер отдела гидропрогнозов в требуемом формате, что избавляет гидропрогнозиста Забайкальского УГМС от рутинного ввода числовых данных и при этом за ним сохраняется возможность их контроля и коррекции.

Проведенные авторские испытания методик и прогнозы в оперативном режиме показали их эффективность. Дальнейшее усовершенствование методики прогнозов прежде всего связано с организацией усвоения гидрометеорологических данных с монгольской части рассматриваемых бассейнов.

Работа выполнена при поддержке Росгидромета (в рамках выполнения темы 1.7.49 плана НИР и ОКР Росгидромета за 2011–2013 гг.).

*Поступила в редакцию 23.06.2017 г.*

### Список использованных источников

1. Борщ С.В., Бураков Д.А., Симонов Ю.А. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 106-127.
2. Бураков Д.А. К оценке параметров уравнений, аппроксимирующих кривую руслового добегания // Водные ресурсы. 1978. № 4. С. 21-24.
3. 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.

4. 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.: НГПУ, 2015. С. 14-17.

5. Бураков Д.А., Карпова 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.

6. Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 236 с.

7. Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР. Серия IV. // Труды НИУ ГУГМС. 1946. Вып. 24.

8. Игнатов А.В., Кравченко В.В., Чекарчев А.А. Стохастическое моделирование – <http://www.irigs.irk.ru/science/im.html> (дата обращения 16.06.2016).

9. Кузнецов Н.Т. Основные закономерности режима рек Монгольской Народной Республики. М.: АН СССР, 1955. 104 с.

10. Кучмент Л.С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»: Сборник научных трудов. Т. 1. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 74-80.

11. Линслей Р., Колер М., Паулюс Д. Прикладная гидрология. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 759 с.

12. 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.

13. Педлаборд П. Муссоны. М.: Изд-во ин. лит-ры, 1963. 195 с.

14. Полеванов В.К. К истокам Амура в "Страну непобедимых" // Наука и жизнь. 2008. № 10. С. 110-117.

15. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М.: Гидрометеоиздат, 1963. 256 с.

16. Хуторянская Д.Ф. Региональная синоптика. Иркутск: ИГУ, 2012. 227 с.

## SUMMARIES

**Method of the operational forecast of daily water levels in the summer and autumn on the rivers Selenga and Onon / Burakov D.A., Larioshkin V.V., Aleshina V.V. // Proceedings of the Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 365. P. 163-181.**

In the Siberian Hydrometeorology and Environmental Monitoring Department, the development of the modern methodological basis of the new generation hydrological forecasts is based on a wide computerization of the forecast centers. Today the methods based on the empirical correlation are replaced by the hydrological forecasts combined models, describing the processes of formation of the runoff on the slopes and in the river beds. The developed technique of the forecast of daily water levels on the Selenga and Onon Rivers, based on the use of the runoff formation conceptual model, allows to issue the forecast up to four days in advance. Efficiency of the technique has been evaluated both on the basis of the archival data and in the course of the operational tests in the summer and autumn 2014.

*Keywords:* water level, river system, floods, model of flow formation, short-range hydrological forecasts.