

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ РАСХОДОВ ВОДЫ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ РУСЛОВЫХ ВОДНЫХ БАЛАНСОВ

Т.И. Яковлева

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург*

В статье рассматривается метод краткосрочного прогноза расходов воды в замыкающем створе участка на основе расчета динамических (краткосрочных) русловых водных балансов. Известно, что расчет и анализ русловых водных балансов для участков рек является одним из наиболее эффективных методов контроля учета речного стока. На примере участков рек Обь от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби и Амур от г. Хабаровска до г. Комсомольска-на-Амуре в статье показано, что метод расчета краткосрочных русловых водных балансов с учетом времени добегания и параметров трансформации паводочной волны на расчетном участке может быть успешно использован для краткосрочного прогнозирования расходов воды в замыкающем створе участка с заблаговременностью от 1 до 3 суток.

***Ключевые слова:** расход воды, русловые водные балансы, русловое регулирование, трансформация паводочной волны.*

SHORT-TERM FORECAST OF WATER DISCHARGE BASED ON THE CALCULATION OF DYNAMIC CHANNEL WATER BALANCES

T.I. Yakovleva

State Hydrological Institute, St. Petersburg

The article discusses the method of short-term forecasting of water discharges in the outlet section of the site based on the calculation of dynamic (short-term) channel water balances. It is known that the calculation and analysis of channel water balances for river sections is one of the most effective methods for monitoring the accounting of river runoff. On the example of sections of the Ob river from the city of Barnaul to the city of Kamen-on-Ob and the Amur river from Khabarovsk to Komsomolsk-on-Amur, the article shows that the method of calculating short-term channel water balances, taking into account the travel time and parameters of

flood wave transformation in the calculated section, can be successfully used for short-term forecasting of water flow in the outlet section with a lead time of 1 to 3 days.

Key words: *water discharge, channel water balances, channel storage, flood wave transformation.*

Введение

Методы балансов широко используются в практике гидрологических расчетов и прогнозов при изучении закономерностей формирования речного стока и преобразований его режима под влиянием климата и антропогенных воздействий. Речной сток рассматривается, прежде всего, как один из видов природных водных ресурсов. Контроль надежности учета речного стока и его использования осуществляется на основе анализа русловых водных балансов (РВБ), как соотношения потерь и приращений стока по длине реки.

Русловые водные балансы составляются для выделенных участков рек и являются инструментом для изучения условий формирования речного стока, выделения его отдельных генетических составляющих; а также оценки надежности учета стока в гидрометрических створах, ограничивающих расчетный участок. РВБ позволяют проанализировать и понять механизм перемещения и трансформации волн паводков и половодий при их продвижении по руслам и поймам рек в пределах фиксированных участков [1, 2].

Русловые водные балансы выражают соотношение между поступлением воды на участок реки (канала) через верхний ограничивающий створ и стоком в нижнем, замыкающем створе с учетом притока, изъятий, потерь и сбросов воды между ними [1]. В зависимости от характера решаемых задач могут быть использованы различные уравнения РВБ. Общая структура РВБ зависит как от климатических условий, факторов подстилающей поверхности (ландшафта, характера почвогрунтов, строения водосбора, лесистости и заболоченности, наличия озер и др.), видов хозяйственного использования водных ресурсов, так и от местоположения расчетного участка по длине реки: элементы РВБ в зоне формирования стока (верхнее течение) и зоне транзита (среднее и нижнее течение) существенно различаются.

Детальное уравнение РВБ включает три группы данных: гидрометрическую, гидрофизическую и гидрогеологическую. Если значения элементов первой группы могут быть определены по данным основной сети, то для получения сведений об элементах двух других групп необходимы специальные наблюдения. Поэтому часто ограничиваются составлением гидрометрических РВБ, которые включают составляющие, полученные

непосредственно по данным наблюдений и измерений в пунктах гидрологических наблюдений, и гидроморфологические характеристики гидрометрических створов и в целом расчетного участка, определяющие механизм перемещения и трансформации волн паводков.

Уравнение РВБ по гидрометрическим данным может быть представлено в следующем виде:

$$Q_v - Q_n + Q_{\text{бпиз}} + Q_{\text{бпрасч}} + Q_{\text{рпр}} - Q_{\text{прп}} + Q_o = 0, \quad (1)$$

здесь $Q_{\text{бпиз}}$ – расход боковых притоков, определенный гидрометрическим способом; $Q_{\text{бпрасч}}$ – рассчитанный расход неучтенного бокового притока; $Q_{\text{рпр}}$ – расходы руслового и пойменного регулирования, обусловленные потерей воды на аккумуляцию в емкостях русла и поймы или возвратом из них при изменении наполнения русла; $Q_{\text{прп}}$ – суммарные потери стока в русле и на пойме на испарение, заполнение бессточных участков поймы, а также инфильтрацию при выходе воды на надпойменные террасы; Q_o – остаточный член руслового водного баланса.

В уравнении (1) представлены лишь элементы, определяемые гидрометрическим способом или по данным нивелировок гидрометрических створов и русловых съемок участка.

Русловые водные балансы составляются для различных интервалов времени: декада, месяц, год или характерный период хозяйственного использования вод. В ГГИ наряду с методами расчета РВБ за указанные интервалы времени разработан метод расчета РВБ за короткие интервалы времени – сутки, метод расчета динамических русловых водных балансов [3, 4]. Особенность метода расчета РВБ за суточные интервалы времени заключается в том, что расчет необходимо проводить с учетом времени добегания на участке и механизма трансформации паводочной волны при ее перемещении.

Разработка методов краткосрочного прогноза расходов воды на основе расчета динамических русловых водных балансов

Для краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды на участках рек в случаях, когда необходим учет механизма трансформации паводочной волны, как правило, используются методы, основанные на приближенных уравнениях трансформации волны или на численном интегрировании уравнений Сен-Венана [5]. В настоящей статье в таких случаях оценку расхода воды в нижнем створе участка предлагается выполнять по измеренным и рассчитанным элементам РВБ на вышерасположенном участке:

$$Q_n(t) = Q_v(t - \tau_v) + \sum_1^k Q_{i\text{бпиз}}(t - \tau_{i\text{бпиз}}) + \\ + Q_{\text{бпрасч}}(t - \tau_{\text{бпрасч}}) \pm Q_{\text{рпр}}(t - \tau_v) - Q_{\text{прп}}(t - \tau_v), \quad (2)$$

где τ_v – время добегания на участке от верхнего до нижнего створа; k – количество боковых притоков на расчетном участке, на которых измеряется сток; $Q_{i\text{бпиз}}$ – расход воды, измеренный на i -том боковом притоке; $Q_{\text{бпрасч}}$ – расход воды, рассчитанный для неучтенного бокового притока; $\tau_{i\text{бпиз}}$ – время добегания от гидрометрического створа на i -м боковом притоке; $\tau_{\text{бпрасч}}$ – время добегания, рассчитанное для неучтенного бокового притока.

Уравнение (2) может быть использовано для краткосрочного прогноза расхода воды в нижнем створе с заблаговременностью прогноза $\tau_{\pi} = \min(\tau_v, \tau_{i\text{бпиз}}, \tau_{\text{бпрасч}})$.

В рамках научных работ по исследованию причин и последствий катастрофического паводка 2013 г. в бассейне р. Амур был выполнен расчет и анализ РВБ за различные интервалы времени (декада, месяц, год) для участка от г. Хабаровска до г. Комсомольска-на-Амуре и разработана методика расчета динамических русловых водных балансов, которая позволила по данным о расходах в Хабаровске и боковых притоков на этом участке рассчитать ежедневные расходы воды в период открытого русла 2013 г. в Комсомольске-на-Амуре с заблаговременностью 4–5 сут [3]. Использование метода расчета динамических РВБ для краткосрочного прогноза расходов воды в створе гидрологического поста (ГП) р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре было проверено по данным многоводных лет.

Для прогноза применялись данные о расходах воды по ГП г. Хабаровска, расходы боковых притоков, на которых ведутся измерения, неучтенный боковой приток с площади водосбора, неосвещенной измерениями, расходы руслового и пойменного регулирования, суммарные потери в русле и на пойме.

Боковой приток на расчетном участке учитывался по данным наблюдений на трех притоках р. Амур на следующих гидрологических постах: р. Тунгуска – ГП с. Архангеловка, р. Маном – ГП с. Маном 1-я, р. Гур – ГП пос. Снежный. Суммарная площадь водосборов этих притоков, освещенная наблюдениями за стоком, составляет 39 680 км². Неосвещенная наблюдениями площадь водосбора на участке составляет 60 320 км². Сток с территории, не освещенной наблюдениями за стоком, оценивался по методу аналогии с корректирующим коэффициентом 0,9. В качестве аналогов использованы все три указанных выше притока, на которых ведется учет стока воды.

Расходы руслового и пойменного регулирования рассчитывались по формуле

$$Q_{pp} = -\frac{\Delta W}{T}. \quad (3)$$

Здесь ΔW – изменение объема в русле и пойме за расчетный интервал времени РВБ (T).

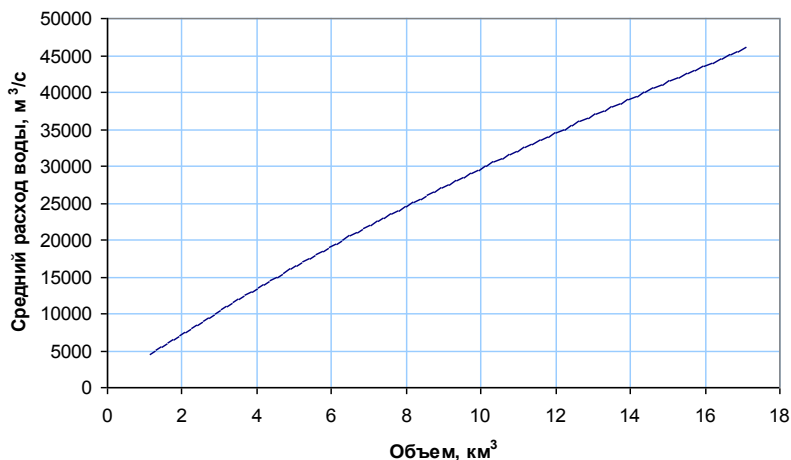


Рис. 1. Кривая объемов русла и поймы на участке р. Амур от Хабаровска до Комсомольска

Для участка реки Амур от Хабаровска до Комсомольска получена зависимость объемов русла и поймы от среднего значения расхода воды на участке (рис. 1). Для этого были использованы данные нивелировок трех морфометрических створов: выше моста в г. Хабаровск, в с. Елабуга, выше моста в г. Комсомольск – и полученные на их основе зависимости площадей поперечного сечения от уровней воды ближайших гидрологических постов.

С использованием кривой объемов воды на участке W , как функции расхода $W(Q)$ или уровня воды $W(H)$, отражающей в суммарном виде главнейшие особенности морфометрии и гидравлики участка реки и позволяющей учесть при расчете элементы неустановившегося движения речного потока, обуславливающие трансформацию расходов воды по его длине и изменения объема воды в русле (русловых емкостях) и, при выходе воды на пойму, в пойменных емкостях.

Для оценки потерь стока на пойме получена эмпирическая зависимость их величины от расходов руслового и пойменного регулирования.

$$Q_{\text{при}} = -0,66Q_{\text{при}} - 2216. \quad (4)$$

Анализ остаточных членов суточных РВБ показал, что при превышении транзитным расходом воды значений близких к 20 тыс. м³/с имеют место систематические односторонние невязки стока. Эти невязки можно объяснить потерями воды на испарение, заполнение бессточных участков поймы, а также инфильтрацией при выходе воды на надпойменные террасы. Механизм формирования потерь трудно формализовать, поэтому для

их учета была получена эмпирическая зависимость (4) на основе выявления зависимости невязок ежедневных РВБ многоводного 2013 от рассчитанных расходов пойменного и руслового регулирования для периода, когда транзитный расход превышал 20 тыс. м³/с. Несмотря на то, что относительное среднеквадратическое значение рассеяния связи (4) превышает 30 %, эффективность ее использования была подтверждена расчетами РВБ в многоводные 1959 и 1984 гг. [3].

Краткосрочные прогнозы расходов воды по методу расчета динамических РВБ составлены для периодов свободного состояния русла лет повышенной водности: 1959, 1984, 2013, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.

В рамках исследований была выполнена проработка, в ходе которой для прогноза расхода воды в створе ГП р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре получено уравнение множественной линейной регрессии, в котором закономерности перемещения паводочной волны на расчетном участке оценивались на основе идентификации параметров регрессионной зависимости, включающей в качестве предикторов расходы воды в ограничивающих створах с заблаговременностью 6 сут и суммарные расходы бокового притока с заблаговременностью 5 сут.

Уравнение для прогноза расхода воды в г. Комсомольске-на-Амуре получено в виде

$$Q_{\text{К-н-А}}(t) = a_0 + a_1 Q_{\text{К-н-А}}(t-6) + a_0 + a_2 Q_X(t-6) + a_3 \sum Q_{\text{бп}}(t-5), \quad (5)$$

где $Q_{\text{К-н-А}}(t)$ – расход воды в г. Комсомольске-на-Амуре на дату прогноза t ; $Q_{\text{К-н-А}}(t-6)$ и $Q_X(t-6)$ – расход воды в г. Комсомольск-на-Амуре и г. Хабаровске на дату $(t-6)$; $\sum Q_{\text{бп}}(t-5)$ – суммарный боковой приток на участке на дату $(t-5)$.

Идентификация параметров уравнения (5), приведенных в табл. 1, выполнена по данным многоводного 1959 г. и многоводного 2013 г. В табл. 1 приведены также характеристики качества полученных уравнений: относительное значение несмещенной оценки стандарта рассеяния $\tilde{\sigma}_{\text{ур}}$ и коэффициент множественной линейной регрессии R .

Таблица 1

**Параметры уравнения множественной линейной регрессии
для прогноза расхода воды р. Амур на ГП г. Комсомольск-на-Амуре**

Совокупность исходных данных	Параметры уравнения				Характеристики качества УР	
	a_0	a_1	a_2	a_3	$\tilde{\sigma}_{\text{ур}}, \%$	R
1959 г.	1239,152	0,486089	0,446743	0,238067	3,8	0,995
2013 г.	–1434,65	0,597323	0,423132	0,27413	1,9	0,998

Для оценки эффективности разработанных методов краткосрочного прогноза были использованы следующие критерии:

- широко используемый для оценки качества гидрологических моделей критерий Нэша–Сатклиффа;
- критерий на основе сравнения погрешности разработанного метода с погрешностью инерционного прогноза с заблаговременностью 5 сут.

Критерий Нэша–Сатклиффа (NSE) [6] применялся в следующем виде

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{ЕДС}i} - Q_{\text{пр}i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{ЕДС}i} - \bar{Q}_{\text{ЕДС}})^2}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{ЕДС}}$ – значение расхода воды, рассчитанное в режимном варианте учета стока и опубликованное в справочнике водного кадастра «Ежегодные данные суши» (ЕДС); $Q_{\text{пр}}$ – прогнозное значение расхода воды; $\bar{Q}_{\text{ЕДС}}$ – среднее арифметическое ряда за период сравнения; n – длина периода сравнения в сутках.

Критерий на основе сравнения погрешности разработанного метода прогноза S с погрешностью альтернативного метода расчета – инерционного прогноза с заблаговременностью 5 сут. В отечественной практике применение методики гидрологического прогнозирования считается оправданным, если ее погрешность явно ниже погрешности альтернативного прогноза [7].

Вывод о применимости метода прогноза делается на основании отношения S/c . В зависимости от этого показателя и длины расчетного ряда n оценивается эффективность метода. По полученным оценкам метод относится к одной из трех возможных категорий: при $n > 25$ метод считается хорошим при $S/c < 0,50$, удовлетворительным при $0,50 < S/c < 0,80$ и неудовлетворительным при $S/c > 0,80$ [5, 7].

Здесь S – среднее квадратическое значение погрешности краткосрочного прогноза по разработанному методу (абсолютное, м³/с); c – среднее квадратическое значение погрешности инерционного прогноза.

В табл. 2 приведены оценки эффективности данных прогноза, полученные при использовании метода расчета динамических РВБ и вариантов уравнения множественной регрессии с параметрами, рассчитанными по данным 1959 и 2013 гг.

Как видно из табл. 2, при использовании обоих методов (метода расчета динамических РВБ и метода множественной линейной регрессии) получены оценки качества прогноза не ниже удовлетворительной. Лучшие результаты прогнозных значений для 2018–2021 гг. выявлены при использовании комбинированного метода прогноза, в котором прогнозное зна-

Таблица 2

**Результаты оценки эффективности предлагаемых методов прогноза
для ГП р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре**

Год	Период	Длительность периода, n	Средний расход, м³/с	Метод	Относительные расхождения, %			Оценки эффективности	
					среднее	средне-квадратичное	наибольшее	S/c	NSE
1959	01.05–07.11	190	19 800	РВБ	3,8	8,52	29,6	0,62	0,97
				УРМ_2013	–6,5	11,1	–47,2	0,81	0,96
1984	05.05–06.11	185	19 580	РВБ	0,36	7,08	–26,9	0,7	0,94
				УРМ_1959	4,5	8,40	–29,0	0,63	0,95
2013	15.05–10.11	180	24 500	РВБ	–4,07	7,05	–26,0	0,63	0,95
				УРМ_1959	2,4	4,4	15,4	0,38	0,99
2018	10.05–16.11	190	14 400	РВБ	–3,6	9,0	–27,1	0,6	0,96
				УРМ_1959	2,8	8,5	25,5	0,61	0,97
				УРМ_2013	–9,2	12,2	–32,9	0,94	0,93
				Комб.	–2,6	5,3	–15,8	0,97	0,60
2019	02.05–07.11	190	20 300	РВБ	–3,35	9,0	26,6	0,97	0,67
				УРМ_1959	1,0	7,6	37,7	0,99	0,46
				УРМ_2013	–5,8	10,8	–33,3	0,98	0,57
				Комб.	2,2	6,6	20,1	0,99	0,43
2020	04.05–07.11	188	19 350	РВБ	2,19	8,26	–26,5	0,96	0,75
				УРМ_1959	4,3	7,9	31,0	0,97	0,68
				УРМ_2013	–4,9	7,8	–17,7	0,97	0,71
				Комб.	0,3	4,4	14,0	0,99	0,47
2021	02.05–10.11	193	23 050	РВБ	0,33	7,2	38,3	0,9	0,71
				УРМ_1959	2,5	5,7	22,7	0,95	0,62
				УРМ_2013	–2,8	4,8	–28,2	0,95	0,6
				Комб.	–0,2	3,9	16,1	0,97	0,44

чение на расчетную дату рассчитано как средняя величина из значений, полученных по методу РВБ и методу множественной регрессии (УРМ):

$$Q_{\text{Комб}}(t) = Q_{\text{РВБ}}(t) + Q_{\text{УРМ}}(t)/2. \quad (7)$$

Здесь $Q_{\text{Комб}}(t)$ – прогнозное значение расхода воды по комбинированной методике; $Q_{\text{РВБ}}(t)$ – прогнозное значение расхода воды по методу динамических РВБ; $Q_{\text{УРМ}}(t)$ – прогнозное значение расхода воды по методу множественной регрессии.

На рис. 2 и 3 приведены гидрографы стока для наиболее многоводных лет – 2013 и 2021 гг.: фактический и прогнозные, полученные с помощью разных методов прогноза.

Следует обратить внимание на тот факт, что для проверки эффективности методов использовались данные таблиц справочников водного кадастра, полученные в режимном варианте учета стока, т. е. после всесто-

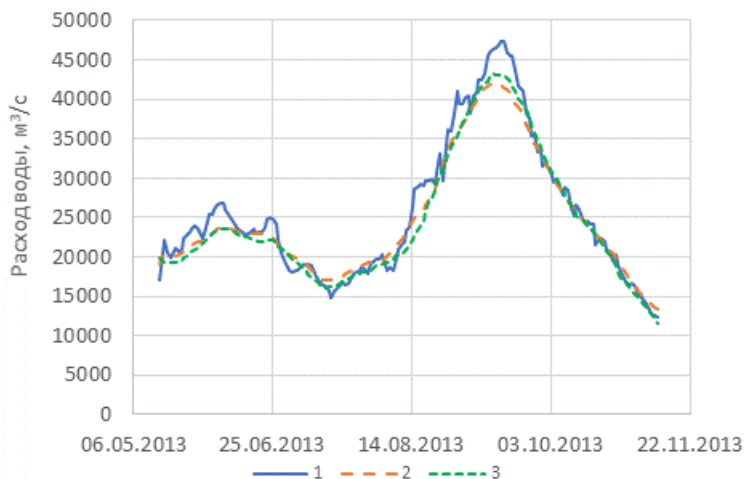


Рис. 2. Гидрографы стока р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.
1 – прогноз по РВБ, 2 – прогноз по УРМ, 3 – фактический

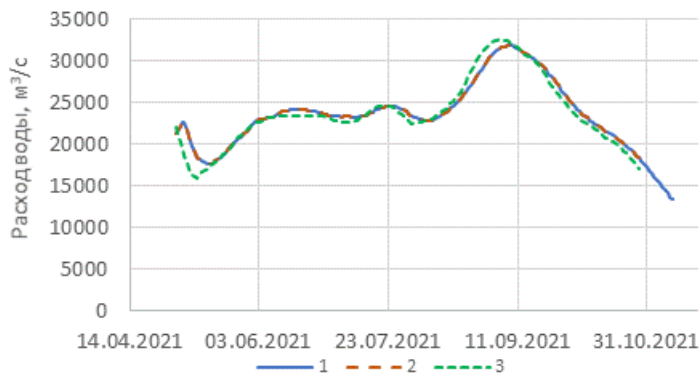


Рис. 3. Гидрографы стока р. Амур – г. Комсомольск-на-Амуре, 2021 г.
1 – прогноз по РВБ, 2 – прогноз по УРМ, 3 – фактический

ронного анализа данных наблюдений на гидрологических постах за весь расчетный год. В оперативной обстановке для прогнозирования приходится использовать данные оперативного учета стока, погрешности которого заведомо больше погрешностей режимного, поэтому и ошибки реальных прогнозов могут оказаться несколько выше приведенных в табл. 2. При этом расчет элементов динамических русловых водных балансов и анализ надежности их расчета являются единственными объективными инструментами контроля учета стока в оперативном режиме. Следует помнить, что главной задачей расчета РВБ остается вопрос оценки надежности расчета элементов РВБ и увязка речного стока по длине реки.

Метод расчета динамических РВБ был разработан также для участка р. Оби от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби [4]. Для прогноза расхода воды на ГП р. Обь – г. Камень-на-Оби с заблаговременностью 3 сут. используются данные наблюдений за стоком воды в створах ГП Барнаула, на притоке ГП р. Чумыш – пгт. Тальменка, расчетные данные неучтенного бокового притока, руслового и пойменного регулирования с использованием зависимости объема русла и затапливаемой поймы от среднего уровня на участке, полученной на основе анализа и обработки картографического материала и спутниковых снимков. Были получены характеристики заполнения русловых и пойменных форм на участке р. Оби от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби в период прохождения половодья и паводков различной обеспеченности [4].

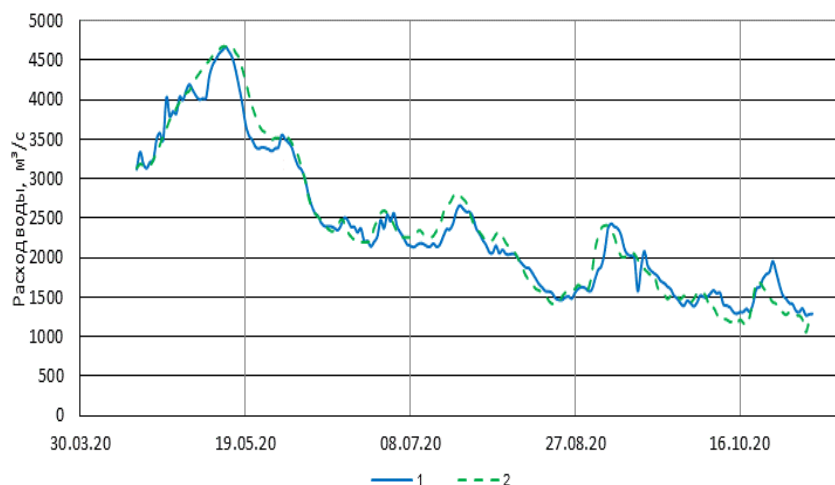


Рис. 4. Гидрографы стока р. Обь – г. Камень-на-Оби, 2020 г.

1 – прогноз по РВБ, 2 – фактический

Таблица 3

**Результаты оценки эффективности метода краткосрочного прогноза
для ГП р. Обь – г. Камень-на-Оби**

Период	Длительность периода, п	Метод	Относительные расхождения, %			Оценки эффективности	
			среднее	средне-квадратичное	наибольшее	S/c	NSE
16.04–07.11	206	РВБ	0,7	8,7	36,1	0,89	0,97
		Инерционный	1,9	8,9	32,5		0,96
18.04–18.06	60	РВБ	–2,0	4,9	–13,1	0,83	0,98
		Инерционный	1,4	7,2	19,0		0,97

По критерию NSE метод прогноза с использованием РВБ везде должен быть признан хорошим, а сравнение результатов прогноза по методу расчета динамических РВБ с данными инерционного прогноза показывает, что качество метода прогноза можно признать удовлетворительным только при прохождении пиков волн половодий и паводков. При плавном изменении расходов воды результаты прогнозирования с использованием динамических РВБ сопоставимы с результатами инерционного прогноза.

На рис. 4 представлены прогнозный и фактический гидрографы стока в створе ГП р. Обь – г. Камень-на-Оби за 2020 г., а в табл. 3 – результаты оценки эффективности метода прогноза за различные интервалы времени.

Как видим по значениям критерия S/c , даже для периода прохождения пика половодья метод прогноза с использованием динамических РВБ следует с натяжкой отнести к категории «удовлетворительный», несмотря на то, что среднеквадратическая и наибольшая ошибки прогноза для периода прохождения основной волны половодья с 18 апреля по 18 июня 2020 г. ниже, чем при использовании инерционного прогноза, на 2,3 и 4,9 % соответственно.

Выводы

Результаты исследований и численных экспериментов показали, что разработанная методика расчета суточных (динамических) РВБ на примере участков рек Амур и Обь может быть рекомендована как для анализа надежности учета стока в гидрометрических створах, так и для использования при оперативном мониторинге водного режима, в том числе как дополнительный инструмент при краткосрочном прогнозировании расходов воды в замыкающих створах.

Литература

1. Методические указания управлениям гидрометслужбы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. № 90. 104 с.
2. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
3. Яковлева Т.И., Шарина Ю.В. Расчет и анализ русловых водных балансов на участке реки Амур: г. Хабаровск – г. Комсомольск-на-Амуре // Сборник «Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты». СПб., 2015. С. 122–134.
4. Яковлева Т.И., Изъюрова Ю.В., Терехов А.В. Контроль данных учета стока в гидрометрических створах на основе расчета русловых водных балансов (на примере участка реки Обь) // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии»: В 3 т. Т. 1. Барнаул, 2022. С. 263–271.
5. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
6. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Binger R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations // Transactions of the ASABE. 2007. Vol. 50, No. 3. P. 885–900.
7. Бориц С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Спец. вып. 355. 198 с.