

УДК 556.532

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РУСЛОВЫХ ВОДНЫХ БАЛАНСОВ ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ УЧЕТА И УВЯЗКИ СТОКА РЕКИ САМУР

© 2016 г. Т.М. Аксянов

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

Ключевые слова: водные ресурсы, потери стока, гидрологический пост, расход воды, учет стока, увязка стока, русловой водный баланс, погрешности расчета водного баланса, допустимая невязка стока, р. Самур.



Т.М. Аксянов

Рассмотрены особенности применения метода русловых водных балансов для анализа надежности учета стока на реках со сложным гидроморфологическим режимом (горная река с широкой поймой и многорукавным руслом). Оценен вклад отдельных составляющих баланса. Получены оценки погрешностей гидрометрического учета стока в створах р. Самур и ее притоков. Приведены результаты расчетов русловых водных балансов за различные интервалы времени: суточные, декадные, месячные, годовые. При анализе многолетнего ряда наблюдений за стоком р. Самур на участке между гидрологическими постами Ахты и Усуччай выявлены систематические невязки (потери) стока. Сформулированы предположения о возможных причинах потери части стока на подходе к замыкающему створу. Метод рекомендован при условии учета наиболее полного комплекса приходных и расходных составляющих баланса.

Надежная оценка водных ресурсов пограничной р. Самур является одной из важнейших гидрологических проблем для территории Республики Дагестан. Особую актуальность данная проблема приобрела после подписания соглашения между Российской Федерацией и Республикой Азербайджан «О рациональном использовании и охране водных ресурсов пограничной реки Самур», регламентирующего деление водных ресурсов реки между государствами [1].

В 2013–2014 гг. Государственным гидрологическим институтом проведена работа по теме «Выявление причин невязок стока р. Самур на основе проведения полевых экспериментальных работ и результатов их научного анализа», некоторые итоги которой приведены в данной статье [2].

Одним из способов контроля водных ресурсов реки выступает метод русловых водных балансов (РВБ). РВБ 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. Анализ данных РВБ является основой для увязки стока и оценки его надежности в гидрометрических створах [3, 4].

Метод РВБ выражает соотношение между поступлением воды на участок реки через верхний ограничивающий створ и стоком в нижнем, замыкающем створе с учетом притока, изъятий, потерь и сбросов воды между ними [3]. В зависимости от характера решаемых задач могут быть использованы различные уравнения РВБ. В развернутом уравнении РВБ (1) учитывается полный комплекс приходных и расходных составляющих баланса:

$$Q_v - Q_n + Q_{бп} + Q_{ск} - Q_{вз} + Q_{сб} - Q_{ит} + Q_{ос} + Q_{нп} \pm Q_{рр} \pm Q_{бр} - Q_{ф} - Q_{\lambda} + Q_o = 0 \quad (1)$$

где Q_v и Q_n – расходы воды в верхнем и нижнем створах, м³/с;

$Q_{бп}$ – расходы воды боковых притоков, м³/с;

$Q_{ск}$ – расходы воды со склонов, м³/с;

$Q_{вз}$ и $Q_{сб}$ – расходы воды водозаборов и сбросных вод на коллекторно-дренажной сети, м³/с;

$Q_{ит}$ – испарение с поверхности воды и транспирация влаги растительностью в зоне затопления и подтопления поймы, м³/с;

$Q_{ос}$ – поступление воды от осадков и таяния снегов запасов в русле, м³/с;

$Q_{нп}$ – приток напорных подземных вод, м³/с;

$Q_{рр}$ – расходы руслового регулирования, обусловленные потерей воды на аккумуляцию в емкостях русла и поймы или возвратом из них при изменении наполнения русла, м³/с;

$Q_{бр}$ – расходы берегового регулирования – фильтрационный отток в берега или приток из них при изменении наполнения русла, м³/с;

$Q_{ф}$ – фильтрация воды в почву, м³/с;

Q_{λ} – расход воды, потраченный на ледообразование, м³/с;

Q_o – остаточный член руслового водного баланса, м³/с.

По результатам обследования бассейна р. Самур для расчета РВБ были выделены три участка: от с. Лучек до с. Ахты, от с. Ахты до с. Усухчай и от с. Лучек до с. Усухчай (рис. 1).

Сокращенные уравнения РВБ для каждого участка записаны в следующем виде:

от с. Лучек до с. Ахты

$$Q_o = Q_{ca} - Q_{cl} - Q_{kc} - Q_{ноп} \pm Q_{рр}, \quad (2)$$

от с. Ахты до с. Усухчай

$$Q_o = Q_{cy} - Q_{ca} - Q_{aa} - Q_{yy} \pm Q_{рр}, \quad (3)$$

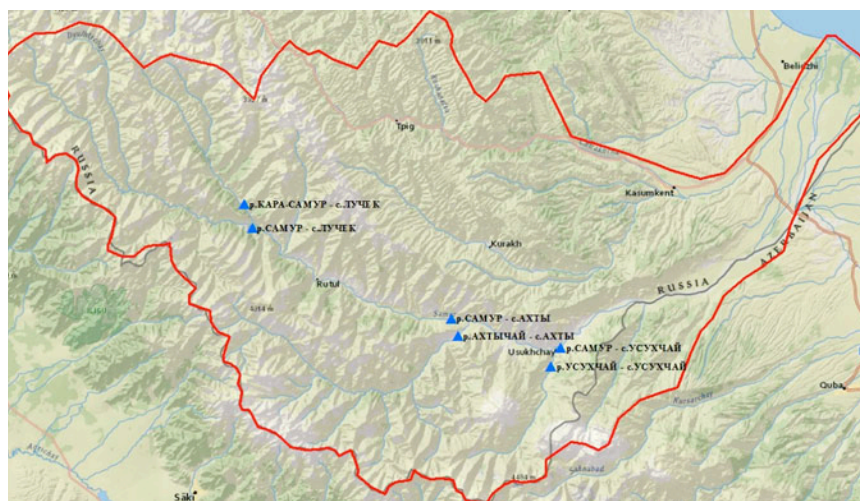


Рис. 1. Бассейн реки Самур.

от с. Лучек до с. Усухчай

$$Q_o = Q_{cy} - Q_{ca} - Q_{kc} - Q_{aa} - Q_{yy} \pm Q_{pp}, \quad (4)$$

здесь Q_{ca} , Q_{cy} , Q_{ca} , Q_{kc} , Q_{aa} , Q_{yy} – расходы воды соответственно в створах: гидрологические посты (г/п) р. Самур – с. Лучек, р. Самур – с. Усухчай, р. Самур – с. Ахты, р. Кара-Самур – с. Лучек, р. Ахтычай – с. Ахты, р. Усухчай – с. Усухчай.

При расчете РВБ для указанных участков не учитывались такие составляющие, как испарение с водной поверхности, осадки на водное зеркало и береговое регулирование из-за их незначительности. Кроме того, из-за отсутствия наблюдений не учитывалась составляющая подземных вод.

Для пентадных, декадных и месячных интервалов времени в уравнения (2), (3) и (4) добавляется еще один элемент водного баланса – расход руслового регулирования ($\pm Q_{pp}$) [5, 6], который имеет переменный знак: элемент Q_{pp} входит в расходную часть РВБ, если в течение месяца на рассматриваемом участке наблюдался подъем уровней воды и в приходную часть – в противном случае. Расходы руслового регулирования приблизительно рассчитывались по формуле (5):

$$Q_{pp} = -\frac{\Delta W}{T} = -\frac{\Delta \omega \cdot L}{T}, \quad (5)$$

где ΔW – среднее для участка приращение объема воды, м³;

$\Delta \omega$ – среднее на участке приращение площади водного сечения за расчетный интервал времени, м²;

T – расчетный интервал времени, с;

L – длина участка, м.

Расчет показал, что расходы руслового регулирования на исследуемых участках для всех интервалов времени изменяются от 0,005 до 0,8 м³/с даже при прохождении значительных паводков, поэтому их значениями также можно пренебречь.

В уравнение РВБ на участках с. Лучек – с. Ахты и с. Лучек – с. Усуччай добавлен элемент РВБ – расход воды с неосвещенной измерениями площади водосбора между створами Лучек и Ахты ($Q_{\text{нбп}}$). Площадь водосбора неосвещенной области составляет 803 км². В этом случае расходы воды $Q_{\text{нбп}}$ вычисляли по формуле

$$Q_{\text{нбп}} = \frac{M_{\text{ср}} \cdot A}{1000}, \quad (6)$$

где A – площадь водосбора в км², $M_{\text{ср}}$ – среднее значение модуля стока для гидрологических постов на р. Ахтычай – с. Ахты и р. Кара-Самур – с. Лучек, характеризующее условия формирования стока на участке р. Самур между селами Лучек и Ахты.

Составляющие РВБ измеряются или рассчитываются с различной погрешностью, величина которой при уменьшении интервала осреднения, как правило, возрастает [7, 8]. Следствие этого – увеличение невязок РВБ для малых интервалов времени, компенсирующих погрешности определения учтенных элементов и неучтенные составляющие баланса. Поэтому при анализе РВБ важной задачей является оценка вклада каждого элемента в остаточный член детального уравнения РВБ. Именно этим определяется необходимость выявления источников погрешностей расчета баланса и их количественная и качественная оценка.

Согласно методическим указаниям [4] результирующая погрешность расчета РВБ определяется методом частных погрешностей, т. е. оценивается совокупной погрешностью расчета его элементов σ_0 , вычисляемой как корень квадратный из суммы квадратов средних квадратических погрешностей определения всех составляющих уравнения РВБ

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i Q_i)^2}, \quad (7)$$

где n – число элементов РВБ;

i – порядковый номер элемента;

σ_0 , σ_i – средние квадратические погрешности определения соответственно остаточного члена баланса и его отдельных составляющих;

δ_i – относительная средняя квадратическая погрешность определения i -го элемента баланса.

Допустимая невязка баланса зависит от p – доверительной вероятности оценки надежности РВБ. Для $p = 95\%$ остаточный член Q_0 РВБ должен находиться в интервале

$$-1,96 \sigma_0 \leq Q_0 \leq 1,96 \sigma_0. \quad (8)$$

Выполнение этого критерия свидетельствует о том, что остаточный член баланса не значим – соизмерим с совокупной погрешностью его определения, а расчет РВБ надежен.

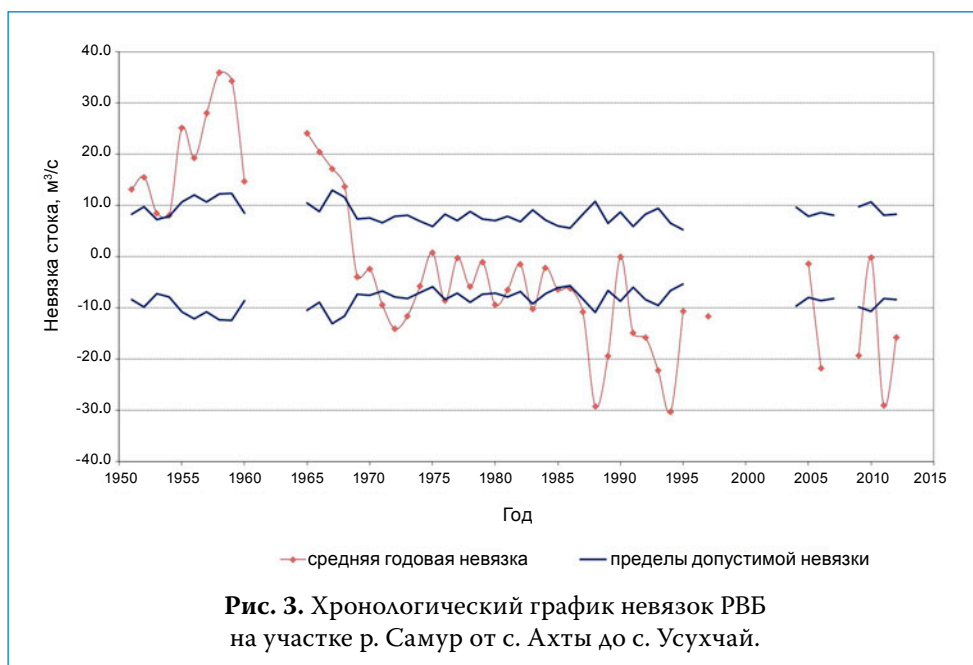
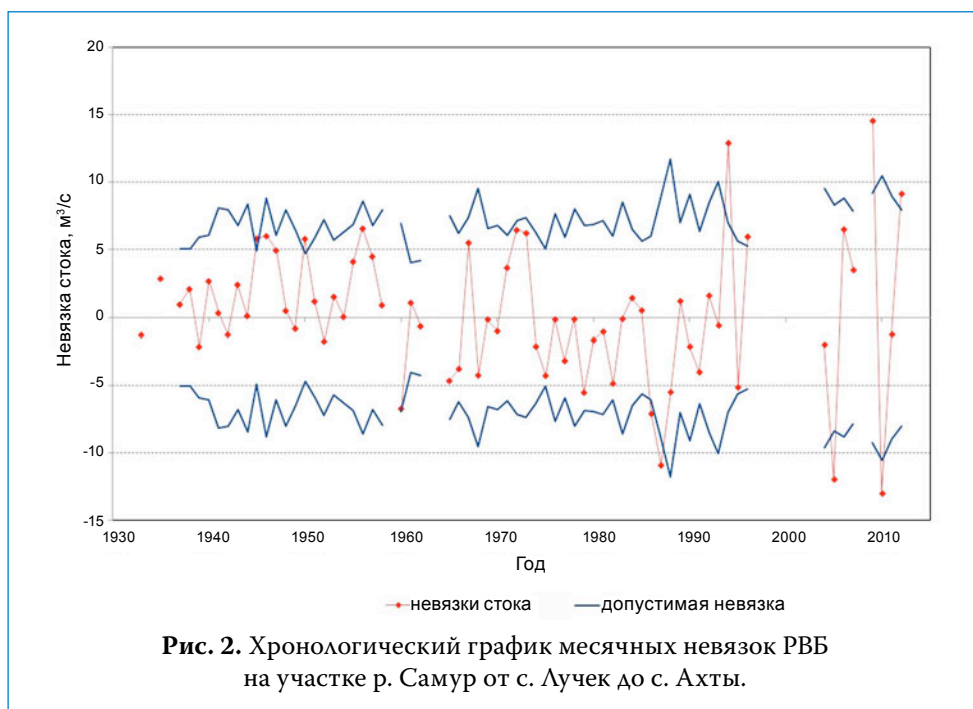
На основе многолетних рядов наблюдений за стоком воды были рассчитаны РВБ для всех трех участков р. Самур. В отдельные годы РВБ не рассчитывались по причине пропусков наблюдений за стоком воды на том или ином гидрологическом посту участка. Хронологические графики остаточных членов годовых РВБ представлены на рис. 2–4, на которых также нанесены границы доверительного интервала их невязки с вероятностью не превышения 95%. В табл. 1 приведены значения погрешностей элементов РВБ, принятые при расчете допустимых значений невязок РВБ.

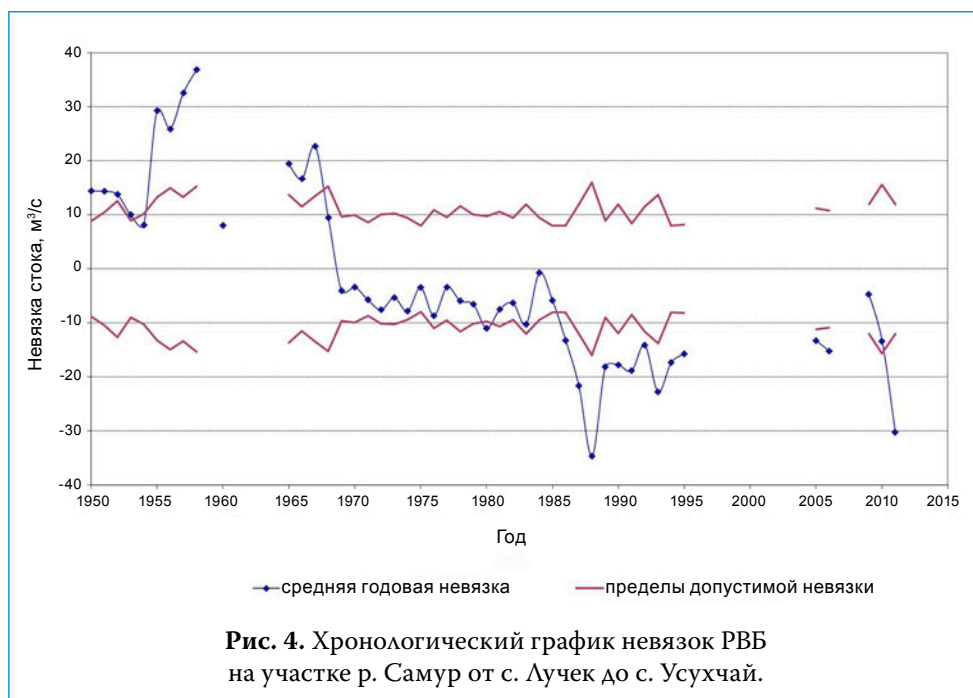
Таблица 1. Погрешности расчета элементов РВБ для различных интервалов времени, %

Река – пост	Среднемесячный сток	Годовой сток
Самур – с. Лучек	6	5
Самур – с. Ахты	6	5
Самур – с. Усуччай	6	5
Кара-Самур – с. Лучек	6	5
Ахтычай – с. Ахты	10	6
Усуччай – с. Усуччай	15	15
Неучтенный боковой приток	30	25

Анализ графиков показывает, что на первом участке (рис. 2) за весь период наблюдений остаточные члены РВБ находятся в пределах допустимых невязок стока и, хотя в отдельные периоды их значения выходят за границы доверительного интервала, это может иметь объяснение как недоучет притока на участке.

При анализе невязок стока на втором участке между гидрологическими постами Ахты и Усуччай (рис. 3) и на общем участке от с. Лучек до с. Усуччай (рис. 4) четко выделяются три периода: 1948–1966, 1967–1985 и 1986–2012 гг.





В течение первого периода до 1967 г. остаточные члены РВБ на участках положительны: учтенный сток в замыкающем створе Усуччай существенно превышал приток к нему, рассчитанный по элементам руслового водного баланса (приходная часть РВБ превышает расходную в среднем на $20 \text{ м}^3/\text{с}$).

С 1967 г. наблюдается постепенное уменьшение притока к створу Усуччай. Начиная с 1969 г. остаточный член РВБ приобретает отрицательный знак, т. е. учтенный сток в замыкающем створе становится меньше суммы расходов р. Самур во входном створе участка с. Ахты и в замыкающих створах ее притоков рек Ахтычай и Усуччай. При этом в период с 1969 по 1985 гг. значения остаточных членов РВБ находятся в пределах допустимых погрешностей расчета РВБ. Начиная с 1986 г. невязки стока на участках с. Ахты – с. Усуччай и с. Лучек – с. Усуччай, оставаясь отрицательными, выходят за пределы допустимых значений. По данным инструментальных наблюдений за период с 1969 по 2010 гг. по невыясненным причинам на подходе к замыкающему створу Усуччай наблюдались потери стока в среднем до $2,8 \text{ км}^3/\text{год}$. В разные годы эта цифра изменяется от $0,73$ до $9,5 \text{ км}^3/\text{год}$.

Можно предположить, что одна из возможных причин потерь стока на рассматриваемом участке заключается в изменении режима взаимодей-

ствия поверхностных и подземных вод, которое произошло в результате тектонической подвижки земной коры во время крупного сейсмического события 1966 г. (землетрясения интенсивностью 8 баллов по шкале Рихтера), отмеченного в этом районе [9]. В результате чего в области геологического разлома Предкейдынский [10], расположенного в бассейне р. Самур, могли образоваться дополнительные разрывы, способствующие оттоку воды в нижележащие горизонты.

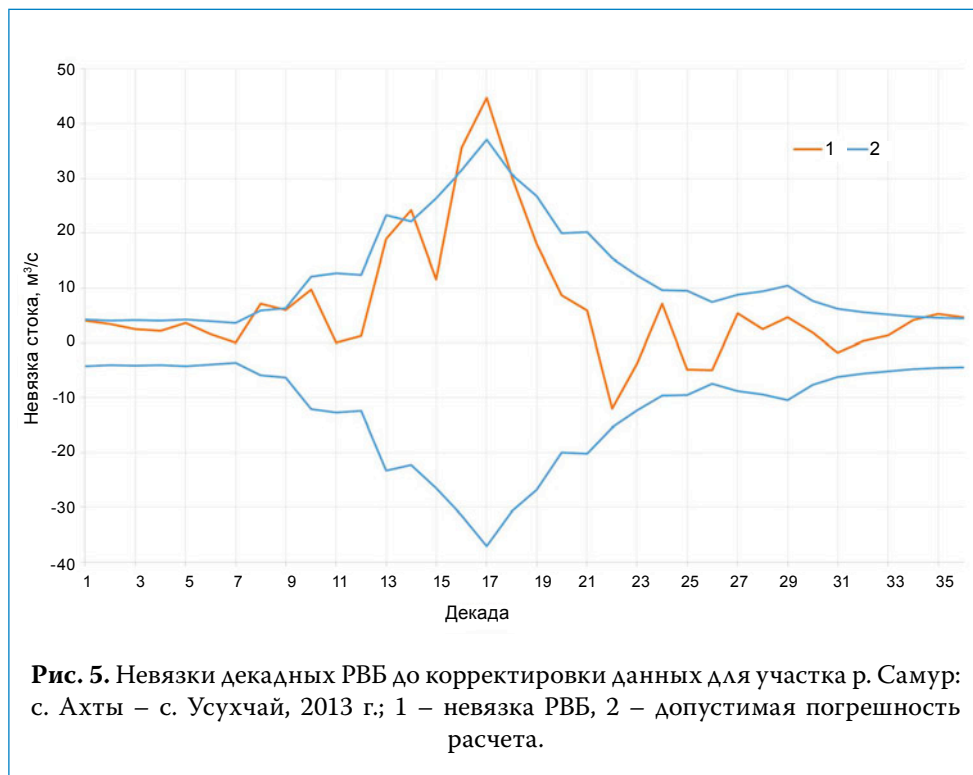
Также выявление истинных причин невязок стока на рассматриваемом участке осложняет низкое качество и пропуски наблюдений в гидрометрических створах: в створе р. Самур – с. Усухчай в условиях повышенной водности (при расходах $> 250 \text{ м}^3/\text{с}$) и на притоках Ахтычай и Усухчай. Значительные случайные погрешности измерения расходов воды и гидрометрического учета стока обусловлены объективными факторами: сложностью гидрологического и руслового режима р. Самур и ее притоков. Случайные погрешности измерения расходов воды могут достигать в условиях паводочного режима горных рек 20 % и более. В свою очередь пониженная точность измерения расходов воды, а также неполная освещенность измерениями (из-за плохого оборудования гидрометрических створов) всей амплитуды изменения уровня воды обуславливают наличие в отдельные периоды недопустимых погрешностей гидрометрического учета стока. В результате случайные погрешности определения осредненных характеристик стока (среднемесячных и среднегодовых значений) могут достигать 5–10 %.

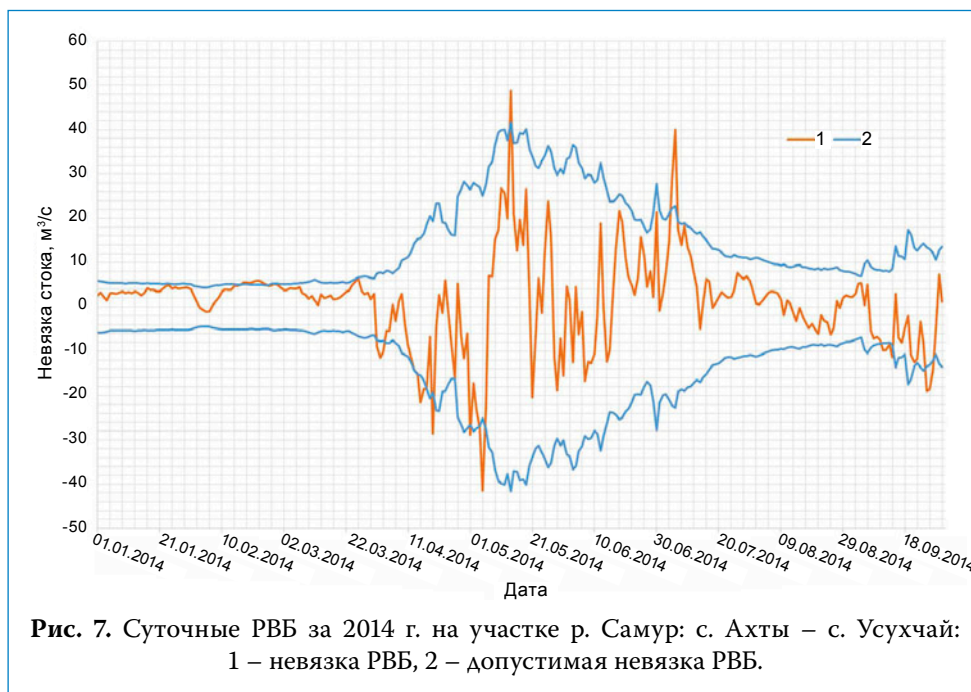
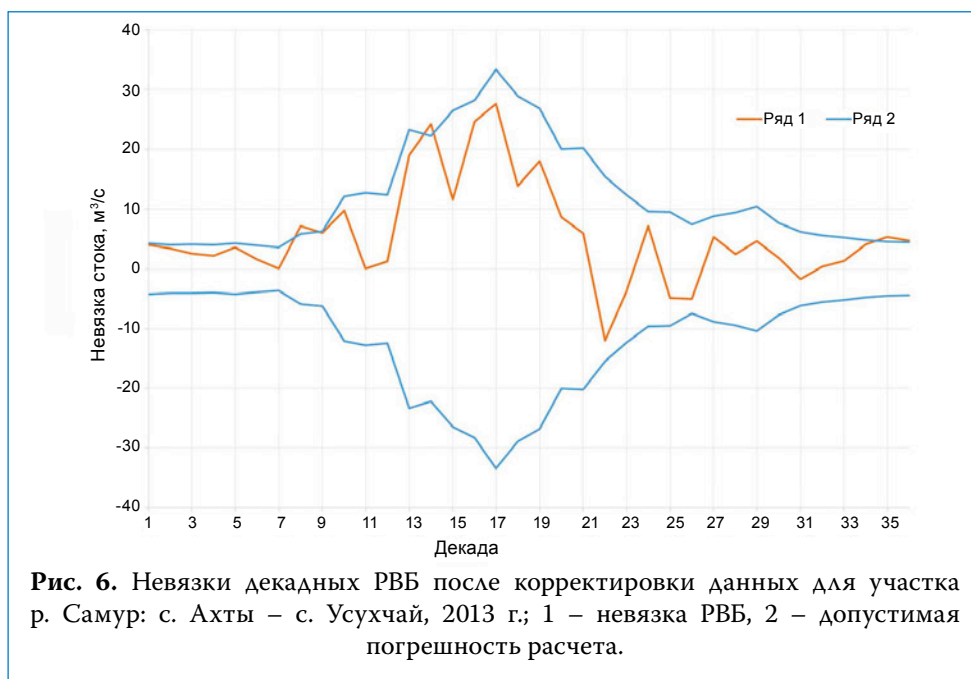
Так, в ходе исследований выяснилось, что в 2013–2014 гг. существенно ухудшились зависимости расходов от уровней воды в створе р. Самур – с. Усухчай, что повлияло на надежность учета стока. Предполагаем, что причиной стало изменение способа измерения расходов воды – переход с люлочной переправы на гидрометрическую установку ГР-70 без достаточного опыта работы наблюдателя с последней. За эти годы дополнительно выполнялся анализ РВБ за суточные, декадные и пентадные интервалы времени, позволивший уточнить и скорректировать ежедневные расходы воды, рассчитываемые по данному створу.

Анализ РВБ за 2013 г. показал, что недопустимая невязка на участке Ахты – Усухчай наблюдалась в июне и составляла $38,5 \text{ м}^3/\text{с}$ в среднемесячных значениях с положительным знаком, это означает, что сток по г/п Усухчай существенно превышал приток с верхних створов. Такая же картина наблюдалась и для участка Лучек – Усухчай, положительная невязка среднемесячных балансов для которого составила $24,3 \text{ м}^3/\text{с}$. На вышерасположенном участке Лучек – Ахты невязки среднемесячных балансов в 2013 г.

находились в допустимых пределах, что свидетельствует о завышении стока по г/п Усуччай. С учетом этого были внесены корректировки в значения среднемесячного расхода за июнь 2013 г. и среднегодового расходов воды по г/п р. Самур – с. Усуччай. Среднемесячный расход июня уменьшен на величину среднего значения невязки РВБ для участков Ахты – Усуччай и Лучек – Усуччай ($31,4 \text{ м}^3/\text{с}$). После корректировки средний за июнь 2013 г. расход по гидрологическому посту Усуччай уменьшился на 20 % и составил $150 \text{ м}^3/\text{с}$ (вместо $181 \text{ м}^3/\text{с}$), а среднегодовой уменьшился на 4,2 % и составил $61,9 \text{ м}^3/\text{с}$. Графики РВБ за декадные интервалы времени до и после корректировки приведены на рис. 5, 6.

Невязки суточных РВБ 2013 г. на всех балансовых участках, полученные по уточненным ежедневным расходам воды в большинстве своем укладываются в пределы допустимых погрешностей расчета. Их превышение в отдельные дни объясняется недоучетом времени добегающего на участках и динамической составляющей – расходов руслового и пойменного регулирования (рис. 7).





В заключение следует отметить, что метод русловых водных балансов может быть рекомендован для анализа надежности учета стока на реках со сложным гидрологическим режимом при условии включения в расчет наиболее полного комплекса составляющих водного баланса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Азербайджанской Республики о рациональном использовании и охране водных ресурсов трансграничной реки Самур. Распоряжение Правительства РФ от 28 августа 2010 г. № 1416-р // Бюллетень междунар. договоров. 2011. № 9. 96 с.
2. Выявление причин невязок стока р. Самур на основе проведения полевых экспериментальных работ и результатов их научного анализа. Отчет по НИР / ФГБУ ГГИ, рук. В.Ю. Георгиевский. СПб. 2014.
3. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 310 с.
4. Методические указания управлениям гидрометслужбы. № 90. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 104 с.
5. Зажимаров С.А. Применение одномерных сплайнов при расчете русловых емкостей и суточного руслового регулирования // Сб. научн. трудов РГГУ. 1999. Вып. 120. С. 67–74.
6. Зажимаров С.А. Сравнительный анализ и область применения упрощенных методов расчета неустановившегося движения воды // Сб. научн. трудов РГГУ. 1999. Вып. 120. С. 58 – 66.
7. Карасев И.Ф., Яковлева Т.И. Методы оценки погрешностей гидрометрического учета стока // Метеорология и гидрология. 2001. № 6. С. 96–106.
8. Зажимаров С.А. Критерии и условия надежности расчета русловых водных балансов. СПб.: ГГИ, Деп. в ВИНТИ № 2695-В94. 1994. 7 с.
9. Физическая география Дагестана / под ред. Б. А. Акаев [и др.]. М.: Школа, 1996. 383 с.
10. Атлас Республики Дагестан. М.: Роскартография, 1999. 64 с.

Сведения об авторах:

Аксянов Тимур Менирович, научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (ФГБУ ГГИ), Россия, 199053, Санкт-Петербург, В.О., 2-я линия, д. 23; e-mail: oggc@yandex.ru