

ДВУХКОМПОНЕНТНОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ ГИДРОГРАФА РЕКИ ПРОТВЫ

Ю.Н. Чижова¹, Е.П. Рец², Н.А. Тебенкова³, А.В. Козачек⁴, А.Н. Верес⁵, А.А. Екайкин⁶,
А.В. Горбаренко⁷, Н.А. Варенцова⁸, М.Б. Киреева⁹, Н.Л. Фролова¹⁰, И.Д. Еремина¹¹,
А.Г. Косицкий¹²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, лаборатория изотопной геохимии и геохронологии, канд. геогр. н., ст. науч. с.; e-mail: eacentr@yandex.ru

²Институт водных проблем РАН, лаборатория региональной гидрологии, канд. геогр. н., науч. с.; e-mail: retska@mail.ru

^{3–6}Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, лаборатория изменений климата и окружающей среды

^{7–10, 12}Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши

⁸ФГБУ «Центральное УГМС», начальник отдела гидрологических прогнозов

¹¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, лаборатория метеорологическая, канд. хим. н., вед. науч. с.; e-mail: meteo@rambler.ru

³Мл. науч. с.; e-mail: tebenkova@aari.ru

⁴Мл. науч. с.; e-mail: kozachek@aari.ru

⁵Инженер; e-mail: veres@aari.ru

⁶Канд. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: ekaykin@mail.ru

⁷Студент; e-mail: aar44i@yandex.ru

⁸Инженер; e-mail: efrnatalie@gmail.com

⁹Канд. геогр. н., доцент; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

¹⁰Профессор; e-mail: frolova_nl@mail.ru

¹²Канд. геогр. н., доцент; e-mail: alexhydro@mail.ru

Выполнено расчленение стока р. Протвы графоаналитическим методом при помощи программного комплекса GrWat для 2009, 2010, 2011, 2019 и 2020 гг. на быструю и базисную составляющие. Данный алгоритм позволяет автоматически отделять весеннее половодье, базисный сток, дождевые и оттепельные паводки в зависимости от особенностей водного режима и использует метеоданные ре-анализа. Для отдельных дней летней межени выполнено изотопное расчленение стока на два генетических компонента – грунтовые воды и атмосферные осадки. Изотопное расчленение выполнено балансовым уравнением по значениям $\delta^{18}\text{O}$, определенным в речном стоке и выходах грунтовых вод. За изотопный состав кислорода атмосферных осадков принимались среднемесячные значения $\delta^{18}\text{O}$ Москвы. Для летней межени в алгоритме происходит расчленение на быстрый (атмосферные осадки, поверхностный сток) и базисный сток. Отчлняемый в алгоритме GrWat базисный сток представляет собой все подземное питание и состоит из собственно грунтовых вод и вод верховодки. В изотопном методе оценка грунтовой составляющей не включает верховодку. Таким образом, применяя совместно оба метода расчленения, можно оценить, какую долю в базисном стоке имеют воды верховодки. Целью исследования являлось установление характера формирования базисного стока р. Протвы и оценка объемов грунтового питания, атмосферных осадков и вод, поступающих в основное русло через почвенные горизонты (верховодку) в условиях летней межени. Установлено, что вклад грунтовой составляющей в базисный сток составляет около 70–80%, а 20–30% базисного стока формируется атмосферными осадками, поступающими через верховодку. Изучение формирования базисного стока и отчленение его в автоматизированном алгоритме GrWat актуально для водосборов с нерегулярными наблюдениями. Эта актуальность возрастает в условиях резких межгодовых изменений водного режима, вызванных изменениями климата.

Ключевые слова: речной сток, базисный сток, грунтовое питание, расчленение гидрографа, изотопный состав кислорода

ВВЕДЕНИЕ

Важными показателями отклика гидрологической системы на меняющийся климат является внутригодовая и многолетняя изменчивость изотопных характеристик речного стока. Для установления связи изменения гидрографа реки с метеорологическими условиями, отклика речной системы на

выпадение осадков и формирования речного стока в периоды разного увлажнения необходимо количественно оценить характеристики подземного питания реки. Изотопное расчленение гидрографа стока широко используется в мировой практике и является хорошо разработанным методом для изучения процессов образования стока [Dinçer et al.,

1970; Fritz et al., 1976; Herrmann, Stichler, 1980; Burns, 2002; Klaus, McDonnell, 2013; Laudon et al., 2002; Fisher et al., 2017; Klaus et al., 2013; Segura et al., 2019]. Преимуществом изотопного расчленения является его точность и возможность количественной оценки вклада генетических компонент по природным трассерам (величине $\delta^{18}\text{O}$ или δD). Однако для такого расчленения требуются наблюдения за изотопными характеристиками компонент стока, что предусматривает детальный отбор речной воды, грунтовых вод и выпадающих атмосферных осадков. Не для всех водосборов возможно проведение такого вида работ, однако быстро меняющиеся условия климата ставят задачу изучения гидрографа стока на реках разных типов и разных географических условий. Альтернативой простым графическим методам расчленения являются автоматизированные методы. Представленный в настоящей работе графоаналитический метод является авторским автоматизированным алгоритмом генетического расчленения гидрографа GrWat по составляющим: подземной, талой в период половодья, талой в периоды оттепелей и дождевой [Kireeva et al., 2020]. В основу разработанного алгоритма положены графоаналитические подходы Б.И. Куделина [Куделин, 1960] по расчленению гидрографа средних рек. Для сезона летней межени в алгоритме GrWat происходит расчленение гидрографа на быстрый и базисный стоки.

Исследования подземного стока рек осложнены отсутствием единообразия в терминологии в определении подземного стока и его различных компонент как в рамках российской научной школы, так и в мировой практике [Владимиров, 1976; Воронков, 1986; Куделин, 1960; Личков, 1960; Попов, 1968; Руководство..., 1989; Freeze, 1972; Hall, 1968]. Термин «подземные воды» в настоящем исследовании используется в трактовке [Попов, 1968]: капельно-жидкая вода под дневной поверхностью, заполняющая поры и пустоты почвы или горной породы при общей сплошности и обладающая способностью вытекать из естественных или искусственных разрезов. В русскоязычной литературе существует широкий спектр трактовок термина «базисный сток» от некоторой части подземного питания реки, определяемой в каждом случае в соответствии с задачей исследования [Губарева и др., 2019], до части годового стока воды при расходе, равном «норме» и меньше [Евстигнеев, 1990; Джамалов и др., 2015]. В данной работе базисный сток используется в смысле, наиболее часто встречающемся в международной литературе, как часть речного стока, которая дренируется из подземных горизонтов бассейна и других источников с отложенным добеганием (*base flow* в работе [Hall, 1968]). Как правило, это воды

почвенных горизонтов или верховодки, которые добегают до основного русла с запаздыванием по сравнению с поверхностным стоком и атмосферными осадками. Верховодку и почвенные воды обычно относят к временным (сезонным) подземным водам [Попов, 1968]. В настоящем исследовании мы понимаем под грунтовыми водами все постоянные подземные воды, дренируемые рекой. Эти подземные воды оцениваются по выходам в родниках и колодцах и имеют относительно постоянный изотопный состав кислорода. В данной работе мы оцениваем их вклад в питание реки с помощью изотопного расчленения. Изотопный сигнал грунтовых вод является конечным членом уравнения изотопного баланса вод реки, где все остальные воды – это атмосферные осадки с разной скоростью запаздывания поступления в основное русло. Отчленение осадков в алгоритме GrWat существенно проясняет, какой их объем поступает в реку сразу (быстрый сток), т. е. строго оказывается вкладом осадков, а какой объем – с отложенным временем добегания (базисный сток). Так как базисный сток в алгоритме GrWat является смесью грунтовых вод и вод верховодки, а в изотопном методе отчленяются исключительно грунтовые воды, то разница между оценками базисного стока и грунтовых вод является вкладом верховодки (или нескольких горизонтов верховодки).

Первые наблюдения за изотопными характеристиками р. Протвы были выполнены в 2009–2011 гг. [Чижова и др., 2013], что позволило использовать этот водосбор для апробации сопоставления двух методов расчленения гидрографа стока и рассмотрения особенностей его формирования. Эта задача наиболее актуальна в связи с поиском возможностей оценивать и прогнозировать реакции речного стока, связанные с аномальностью гидрометеорологических условий на базе расчетных моделей, использующих ре-анализ.

Река Протва – левый приток Оки, расположена в центральной части Восточно-Европейской равнины. Речная сеть в бассейне хорошо развита и представлена не только реками, но и многочисленными ручьями, временными, функционирующими только в период повышенного стока и дренирующими воды первого водоупорного горизонта (Волчий, Барсучий и др.), а также постоянными, которые имеют сток круглый год и питаются грунтовыми водами из второго водоупорного горизонта и коренных пород (ручьи Западно- и Восточно-Сатинские, Егоров и др.). Долина реки слабоизвилистая, склоны умеренно крутые, расчлененные балками и оврагами, большей частью лесные, пойма в основном луговая. Питание Протвы смешанное с преобладанием снегового при значительном участии подземного и дождевого. Водный режим Протвы изменчив

от года к году, но его основные фазы всегда четко выражены: высокое весеннее половодье, низкие летняя и зимняя межень, повышенный сток осенью. Среднемноголетний среднегодовой расход Протвы у с. Спас-Загорье составляет 21 м³/с, а площадь водосбора – 3640 км². По площади бассейна Протва относится к средним рекам, по внутригодовому распределению стока – к восточно-европейскому типу. Озерность и заболоченность ее бассейна меньше 1%. Поэтому озера и болота не регулируют сток реки, а типичный для Восточно-Европейской равнины рельеф местности с овражной сетью благоприятствует поверхностному стоку выпадающих в бассейне атмосферных осадков. В настоящее время на реке в верхнем и среднем течении действуют два гидрологических поста, имеющих ряды наблюдений продолжительностью от 43 до 83 лет. Высокая степень изученности водосбора, а также сравнительно низкая антропогенная нагрузка на сток и условия его формирования обеспечивают Протве статус репрезентативного условно-естественного водосбора средней части ЕТР.

В последние десятилетия сток Протвы подвержен резким межгодовым изменениям, что больше всего связано со снежностью, термическим режимом зим и разным количеством осадков в теплый период. Наиболее выдающимися по характеристикам стока в последние десятилетия стали 2019 и 2020 гг. В этот период два года подряд обновлялись минимальные наблюдаемые значения пика половодья, а в 2020 г. после фактически отсутствовавшего половодья в начале лета выпало аномальное количество осадков, что привело к дождевому паводку с расходами до 170 м³/с в начале июня и до 200 м³/с в июле. Подобные межгодовые колебания расходов и уровней реки делают актуальным поиск новых подходов к оценке и прогнозу вклада различных генетических компонент в питание реки.

Целью данной работы является:

1. Расчет доли грунтовой составляющей стока Протвы в разные годы согласно изотопному расчленению гидрографа.

2. Расчленение гидрографа Протвы графоаналитическим методом посредством программного комплекса GrWat на быструю и базисную составляющие.

3. Определение соотношения базисной и грунтовой составляющих стока для реки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Речной сток изучался в пределах части водосбора до замыкающегося створа в Спас-Загорье (рис. 1А). Расчленение гидрографа р. Протвы графоаналитическим методом проводилось в алгоритме GrWat.

Методика разделения быстрой и базисной составляющих стока основывается на концепции критических параметров изменения суточных расходов воды. Сток воды принимается на 100% состоящим из базисного стока в i -й день, если удовлетворяется следующее условие:

$$\begin{cases} \left| \frac{Q_i - Q_{i+1}}{Q_i} \right| \cdot 100\% \leq grad \\ \left| \frac{Q_i - Q_{grlast}}{Q_i \cdot n} \right| \cdot 100\% \leq grad, \\ \left| \frac{Q_i - Q_{gr1}}{Q_{gr1}} \right| \cdot 100\% \leq kdQ_{gr1} \end{cases} \quad (1)$$

где Q_i – полный речной сток в i -й день; Q_{i+1} – полный речной сток в $(i + 1)$ -й день; Q_{grlast} – полный речной сток в ближайший предыдущий день, в который согласно данным условиям сток на 100% состоял из базисного; Q_{gr1} – полный речной сток в первый в данном календарном году день, в который согласно данным условиям сток на 100% состоял из базисного; n – число дней между i -м днем и датой Q_{grlast} ; $grad$ – калибровочный параметр – критический градиент суточного изменения расхода воды, который отражает динамику разгрузки базисной компоненты, выраженный в процентах от расхода воды в i -й день (этот параметр может быть назначен отдельно для периода половодья и межени (табл. 1)); kdQ_{gr1} – калибровочный параметр – максимальное возможное превышение расхода воды базисной составляющей над ее величиной до начала половодья. Данный подход расчленения основан на предположении, что отклик базисного стока на поступление новой воды на водосбор (осадки/снеготаяние) значительно медленнее по сравнению с быстрым стоком. Величина базисного стока между днями, когда водный сток на 100% состоит из базисного, определяется путем линейной интерполяции.

В период прохождения половодья для отделения подземного стока в алгоритме GrWat используется схема расчленения гидрографа, предложенная Б.И. Куделиным для подземных вод, гидравлически связанных с рекой [Куделин, 1960]. Во время прохождения максимального расхода воды подземное питание реки приравнивается нулю. В отечественной практике это принятая методика гидрогеологических расчетов для выделения подземного стока в период половодья или паводков.

Метеорологическая информация (в виде данных ре-анализа) используется в качестве индикатора и возможности отнесения пиков на гидрографе к группам событий – оттепелям или дождевым (смешанным) паводкам:

– при наложении паводков на волну подъема или спада половодья они отделяются по экспоненте;

– отнесение паводочных пиков к группе талых или дождевых идет по осредненной температуре или сумме осадков в предшествующие дни, превышающей заданное критическое значение.

Программа делит суточные расходы воды на водохозяйственные годы – от начала половодья текущего календарного года до начала половодья следующего.

Двухкомпонентное расчленение гидрографа изотопным методом позволяет использовать только один консервативный трассер – значение $\delta^{18}\text{O}$, и на основе балансового уравнения установить долю грунтовой составляющей стока и атмосферных осадков:

$$Q_c = Q_g + Q_{oc} \quad (2)$$

$$C_c Q_c = C_g Q_g + C_{oc} Q_{oc} \quad (3)$$

где Q – расходы; C – значения $\delta^{18}\text{O}$; индексы с, г, ос – сток, грунтовые воды и осадки соответственно.

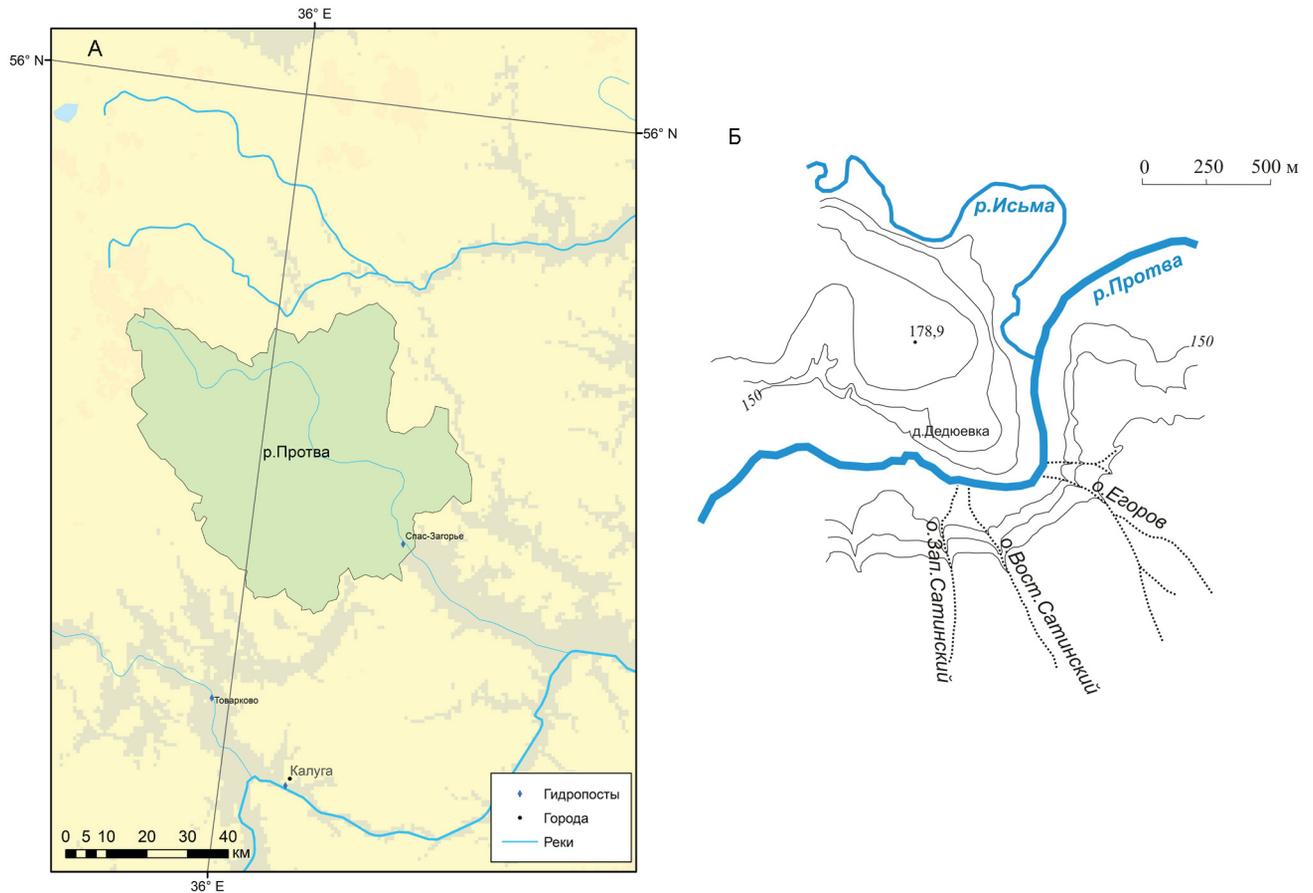


Рис. 1. Водосбор р. Протвы: А – у замыкающего створа в дер. Спас-Загорье; Б – участок у дер. Сатино

Fig. 1. The catchment area of the Protva River to the hydrological station in Spas-Zagorje (A) and the catchment area near the village of Satino (Б)

Необходимым условием для изотопного расчленения гидрографа является значимое отличие в величинах $\delta^{18}\text{O}$ между грунтовой составляющей, стоком реки и атмосферными осадками. Поскольку сток реки является смесью грунтовых вод и осадков, балансовое уравнение может быть решено только в случае, когда значение $\delta^{18}\text{O}$ стока находится внутри диапазона величин $\delta^{18}\text{O}$ осадков и грунтовых вод, и чем больше разница между ними, тем точнее будет расчленение.

По своим изотопным параметрам грунтовые воды отличаются от атмосферных осадков. Резерву-

ар подземных вод пополняется при фильтрации атмосферных осадков через грунты и горные породы и в виду своего относительно большого объема и разных сезонов питания имеет интегральный (обобщенный) изотопный состав кислорода и водорода, в то время как атмосферные осадки характеризуются выраженной сезонностью значений $\delta^{18}\text{O}$. Так, разница между значениями $\delta^{18}\text{O}$ осадков зимнего и летнего сезонов в случае Москвы может достигать 20‰. Летом осадки изотопно тяжелые: $\delta^{18}\text{O} = -7... -10\text{‰}$, зимой – изотопно легкие: $\delta^{18}\text{O} = -17... -25\text{‰}$ [Чижова и др., 2017]. Как показали наши исследова-

ния [Чижова и др., 2013], изотопный состав кислорода грунтовых вод у Сатино в 2010 и 2011 гг. был очень постоянен и численно близок к среднегодовой величине $\delta^{18}\text{O}$ осадков Москвы ($-12,3\text{‰}$).

Для изотопного расчленения гидрографа р. Протвы были выбраны периоды летней межени, когда атмосферные осадки выпадали либо локально, либо в недостаточном количестве для формирования значительных дождевых паводков. В изотопном составе кислорода речной воды отражается сигнал грунтовой составляющей и выпадающих атмосферных осадков, при этом в мировой практике изотопное расчленение используется в основном для выделения участия конкретного события выпадения осадков в речном стоке. Для этого отбирается речная вода и грунтовая составляющая до выпадения осадков, проба осадков и пробы речной воды после выпадения осадков. Более ранними наблюдениями за изотопным составом кислорода воды Протвы было установлено, что даже незначительный вклад поступления атмосферных осадков отражается в составе речной воды [Чижова и др., 2013], но отдельные дожди играют незначительную роль в питании реки в летнюю межень. Существенное отличие в значениях $\delta^{18}\text{O}$ между выходами грунтовых вод и речной водой непосредственно перед выпадением дождя, даже в условиях предшествующей 2-недельной засухи, прямо указывает на участие атмосферной влаги в питании реки [Чижова и др., 2013]. Отбор проб речной воды для изотопного анализа выполнялся в пределах учебно-научного полигона «Сатино», здесь же были опробованы выходы грунтовых вод в родниках у дер. Дедюевки и в колодце.

В период наблюдений на Протве осадков либо не было, либо они выпадали незначительно. Для оценки вклада этой составляющей использовались осредненные месячные величины $\delta^{18}\text{O}$ осадков Москвы по данным GNIP Database. В Москве в рамках программы GNIP в 1970–1980-х гг. были получены среднемесячные значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков, затем в 2015–2016 гг. наблюдения продолжились на метеостанции МГУ. По этим данным осредненные значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют $-7,56\text{‰}$ для июня, $-6,63\text{‰}$ для июля и -8‰ для августа. Для изотопного расчленения гидрографа реки как дублирующего метода графоаналитического расчленения было принято допущение, что изотопные параметры осадков Москвы можно использовать для бассейна Протвы. Это допущение оправдано тем, что, с одной стороны, бассейн Протвы довольно большой (см. рис. 1), с другой – характер формирования изотопного состава кислорода осадков Москвы остался неизменным с 1970 по 2015 г. [GNIP Database, 2020]. В виду большого водосбора и разной скорости добегания в зависимости от локальных участков изотопный

сигнал атмосферных осадков естественным образом усредняется. Это позволило нам в качестве упрощенной модели использовать осредненные среднемесячные средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков.

Для этой работы мы использовали данные, опубликованные в работе [Чижова и др., 2013] и полученные по результатам наблюдений в 2019 и 2020 гг. Измерения изотопного состава кислорода в водах р. Протвы в 2009–2011 гг. были выполнены в МГУ им. М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V, совмещенном с Gas-Bench-II в режиме постоянного потока гелия. Измерения 2019 и 2020 гг. были выполнены на изотопном анализаторе Picarro L2130 в лаборатории ЛИКОС ААНИИ. Погрешность изменений значений $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0,04\text{‰}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчленение стока Протвы выполнено графоаналитическим методом при помощи программного комплекса GrWat для 2009, 2010, 2011, 2019 и 2020 гг. (рис. 2, 3). По результатам изотопного расчленения в стоке Протвы в середине лета доля атмосферных осадков составила от 21 до 38% (табл. 1). В летнюю межень 2009 г. вода в Протве характеризовалась значением $\delta^{18}\text{O} = -11,24\text{‰}$, за изотопный состав кислорода грунтовой компоненты принято значение $\delta^{18}\text{O} = -12,9\text{‰}$ (родник у дер. Дедюевки – выход грунтовых вод [Чижова и др., 2013]). Доля грунтовой составляющей 28 июля после спада дождевого паводка оценена по изотопному расчленению в 74%, что эквивалентно $9,6 \text{ м}^3/\text{с}$. В графоаналитическом методе базисный сток оценивался в $11,9 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, базисный сток на 80% состоял из грунтового стока и на 20% из атмосферных вод, поступавших через почвенный горизонт либо верховодку в этот день.

В летнюю межень 2010 г. разница между оценками грунтового питания изотопным расчленением и базисным стоком согласно графоаналитическому методу довольно велика (см. табл. 1, рис. 2). Отбор был проведен через 10–12 дней после конца спада крупного паводка. Базисный сток согласно полученным результатам на 70% состоял из грунтового, на 30% – из атмосферных осадков.

В летнюю межень 2011 г. в графоаналитическом методе доля базисного стока была оценена в 100%, при этом по изотопному расчленению доля атмосферных осадков в питании реки составила 25%. Отбору предшествовал неинтенсивный подъем воды дождевого генезиса.

Аналогично, сток Протвы в летнюю межень 2019 г. в день отбора пробы на 100% был представлен базисной составляющей. При этом анализ

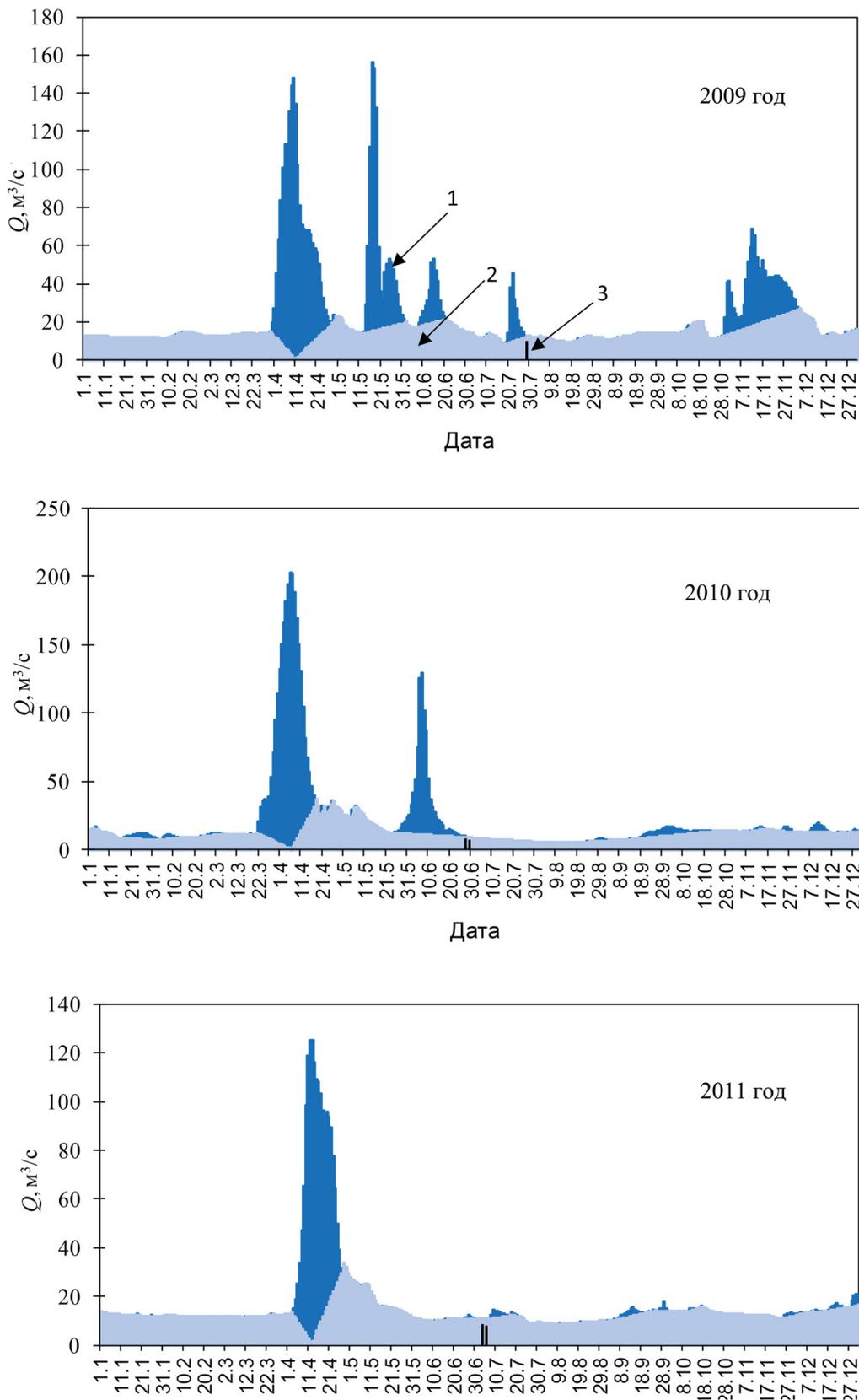


Рис. 2. Расчленение гидрографа стока р. Протвы для 2009–2011 гг., выполненное графоаналитическим методом (для отдельных дней – изотопным методом): 1 – расход воды в р. Протве; 2 – базисный сток; 3 – оценка грунтовой составляющей изотопным методом

Fig. 2. Separation of the Protva River runoff hydrograph for 2009–2011 using the grapho-analytical method and the isotopic method for individual days: 1 – water discharge; 2 – base flow; 3 – ground water estimation by the isotope method

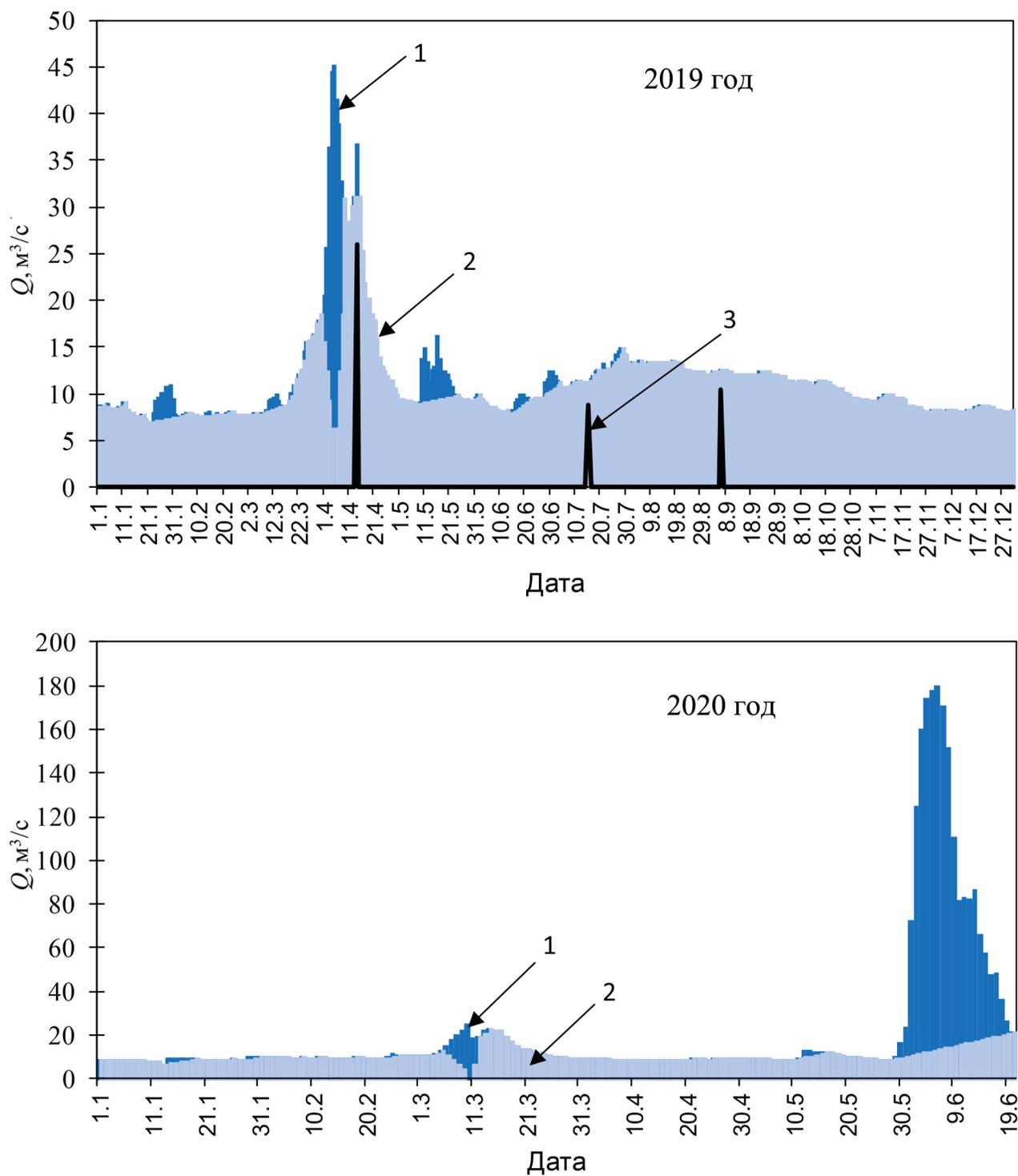


Рис. 3. Расчленение гидрографа р. Протвы для 2019 и 2020 гг.: 1 – расходы воды в р. Протве; 2 – базисный сток; 3 – оценка грунтовой составляющей изотопным методом

Fig. 3. Separation of the Protva river runoff hydrograph for 2019 and 2020: 1 – water discharge; 2 – base flow; 3 – ground water estimation by the isotope method

Таблица 1
Изотопное и графоаналитическое расчленение стока в летнюю межень

Дата	Расход, м ³ /с	$\delta^{18}\text{O}$ стока	Значения $\delta^{18}\text{O}$ компонент		Доля в питании		Грунтовое питание, м ³ /с	Базисный сток, согласно графоаналитическому расчленению	
			Грунтовые воды	Атмосферные осадки	Грунтовые воды	Атмосферные осадки		м ³ /с	Доля в питании
Протва									
28.07.09	13	-11,24	-12,9	-6,63	0,74	0,26	9,6	11,9	0,93
27.06.10	9,95	-10,74	-12,3	-7,56	0,67	0,33	6,7	9,35	0,93
29.06.10	9,39	-10,49	-12,3	-7,56	0,62	0,38	5,82	9,16	0,97
03.07.11	10,8	-10,56	-12,3	-6,63	0,69	0,31	7,45	10,8	1,00
05.07.11 в 12:30	10,6	-10,86	-12,3	-6,63	0,75	0,25	7,95	10,6	1,00
14.04.19	36,6	-12,64	-11,2	-16,2*	0,71	0,29	25,98	31	0,85
15.07.19	11,2	-11,14	-12,3	-6,63	0,79	0,21	8,9	11,2	1,00
06.09.19	12,5	-11,44	-12,12	-8,2	0,83	0,17	10,37	12,5	1,00
Восточно-Сагинский ручей									
27.07.09		-12,34	-12,9	-6,63	0,9	0,1			
28.07.09		-12,56	-12,9	-6,63	0,93	0,07			
16.07.19		-11,95	-12,3	-6,63	0,94	0,06			
Егоров овраг, ручей									
28.07.09		-12,23	-12,9	-6,63	0,88	0,12			
16.07.19		-11,98	-12,3	-6,63	0,94	0,06			

Примечание. * Среднее значение снежного покрова в д. Сагино.

гидрографа показал относительное повышение водности на фоне неинтенсивных дождевых паводков – хорошо прослеживается поверхностный дождевой сток до и после даты отбора согласно графоаналитическому расчленению. При этом согласно изотопному расчленению сток реки на 77% состоял из грунтовых вод и на 23% из атмосферных.

Во время половодья 14 апреля 2019 г. в изотопном расчленении доля грунтового питания составила 71%. Согласно графоаналитическому расчленению, речной сток на 85% относился к базисной составляющей. Таким образом, базисный сток на 85% состоял из грунтового стока. Несмотря на то что 2019 г. был экстремально маловодным с крайне слабовыраженным половодьем (максимальные расходы в 2019 г. составили 44 м³/с по сравнению с 12–202 м³/с в предшествующие годы), в бассейне сформировался снежный покров, таяние которого очевидно не могло не отразиться на питании реки. К моменту опробования 14 апреля на водосборе снежный покров сошел не окончательно. Согласно расчленению, талый снеговой сток в речной воде составлял 29%, половина из него поступала в виде базисного стока в соответствии с графоаналитическим методом.

Для 2020 г. расчленить гидрограф Протвы изотопным методом оказалось невозможно вследствие нарушения одного из базовых принципов – выраженных отличий в изотопном составе кислорода между стоком и компонентами (грунтовыми водами и атмосферными осадками). Гидрометеорологические условия этого года так же, как и изотопные характеристики речной воды (табл. 2), значительно отличались от прошлых лет. Для начала июня 2020 г. значения $\delta^{18}\text{O}$ в Протве составляли от $-9,3$ до $-9,8\%$ в то время как атмосферные осадки, выпадавшие с 1 по 4 июня, характеризовались величинами от $-9,3$ до -11% . С учетом того, что за первые четыре дня июня выпало около 70 мм осадков, что близко к месячной норме, даже расчет средневзвешенной величины $\delta^{18}\text{O}$ осадков с учетом среднемесячных за май по данным GNIP Database дает величины $\delta^{18}\text{O}$ осадков приблизительно равными $\delta^{18}\text{O}$ стока. И май, и июнь 2020 г. характеризовались аномальным количеством осадков, поступающих в реку с поверхностным стоком, что привело к подъему уровней и расходов.

Аномальные гидрометеорологические условия 2020 г. отразились в водном режиме Протвы, ставшим исключительным за последние 12 лет. Так, осенью и зимой 2019–2020 гг. аномалия среднемесячной температуры воздуха составила от $+2,5$ до $+6,6^\circ\text{C}$, а осадков – от 40 до 145% от нормы. В подобных условиях невозможно формирование устойчивого снежного покрова: снегозапас к концу зимы оказался близким к нулю, что является экстремаль-

ным для последних 36 лет. Практически вся влага, поступающая на поверхность почвы, расходовалась на испарение и инфильтрацию в грунт. По данным ре-анализа ERA5, влажность почвы к началу половодья оказалась наименьшей с 2009 г. и составила 0,329, что соответствует лишь 90% нормы и близко к показателям аномально сухого 2006 г. Последовавшая затяжная весна была также сухой, как это отмечалось в 2009, 2010, 2012 и 2014 гг., когда сумма осадков в период половодья не превышала 26 мм.

Комплексное влияние всех метеорологических факторов обеспечило формирование наиболее низкого за всю историю наблюдений половодья у с. Спас-Загорье, перекрыв предшествующий минимум 2015 г. примерно на 0,6 м. По водности половодье оказалось также наименьшим за рассматриваемый период (предыдущий минимум наблюдался в 2019 г. и был в 2,2 раза больше) и сопоставимо по объему с паводками в июле 2009 г. и июне 2012 г. При этом коэффициент стока у рассматриваемых событий также оказался схожим – 0,09–0,19.

В июне–июле 2020 г. в бассейне Протвы сформировалось два паводка: по всем уровням и стоковым характеристикам они оказались наибольшими с 2009 г.

Первый паводок прошел в период с 29 мая по 27 июня и был сформирован аномально обильными осадками – за сутки выпало до 67 мм, а общая сумма осадков, сформировавшая паводок, составила 233 мм. За первые трое суток выпало до 55% от общей суммы осадков в верховьях и 43% в нижней части бассейна. Практически во все дни выпадение дождей было равномерным. Лишь осадки 20–21 июня, выпавшие в нижней части водосбора, не привели к развитию еще одной волны выше с. Спас-Загорье.

Рост уровня при прохождении волны паводка составил 4,8 м, а превышение пика над предыдущим наивысшим паводком (май 2009 г.) – 0,4 м. По предварительным оценкам максимальный расход паводка превысил 160 м³/с, а слой стока – 45–50 мм, что по данным [Основные..., 2015] соответствует обеспеченностям 15% по расходу и менее 1% по слою стока.

Второй паводок прошел с 5 по 31 июля, превысив предыдущий на пике на 0,7 м. Он сформировался обильными осадками в верховьях Протвы, где за сутки выпало до 51 мм, а за трое суток – до 108 мм. Развитию высокой волны способствовало большое увлажнение водосбора после завершения предыдущего паводка.

По предварительным оценкам максимальные расходы паводков достигали 165–200 м³/с, а слой стока – 40–50 мм, что по данным [Основные..., 2015] соответствует обеспеченностям 10–15% по расходу, 1% и менее – по слою стока. Подобные рас-

ходы воды сопоставимы со средними максимальными на пике половодья за 2009–2020 гг.

По нашим оценкам, коэффициент дождевого стока составил для двух паводков 2020 г. примерно 0,22 и 0,26 соответственно и был близок к среднему за рассматриваемый период. Большая часть осадков расходовалась на быстрый сток и на инфильтрацию через почвенные горизонты и верховодку, также значительная часть их пошла на испарение и эвапотранспирацию (теплая погода и бурная активизация вегетации). После прекращения обильных и интенсивных осадков ко второй половине августа – началу сентября уровень воды на Протве у с. Спас-Загорье быстро опустился до аномально низких для данного периода и составил 40–50 см над «0» графика, что на 10–20 см ниже средних значений. Вероятно, это стало отголоском низкого половодья, которое не привело к нормальному увлажнению водосбора и значительному пополнению грунтовых вод, после которого последовал очень засушливый апрель. Подобное «иссушение» речного водосбора привело к тому, что даже экстремально большие объемы летних осадков (до 230% от нормы) не обеспечили пополнения грунтовых вод.

Доля грунтового питания не остается константой в течение года и тем более в течение нескольких лет,

а динамично реагирует на количество атмосферных осадков, характер и величину половодий.

За годы наблюдений за изотопным составом речной воды на локальном участке водосбора р. Протвы у дер. Сатино в летний период грунтовая составляющая гидрографа реки практически не изменила своих изотопных характеристик: $\delta^{18}\text{O} = -12,3\text{‰}$ для 2010, 2011 и 2019 гг. Внутри- и межгодовые флуктуации, связанные с разным количеством атмосферных осадков, поступающих в верхний горизонт грунтовых вод, практически не повлияли на изотопный состав кислорода воды.

Изотопный состав кислорода речной воды Протвы прямо указывает на то, что даже в длительные периоды времени без осадков грунтовая компонента не является единственным источником питания реки и вносит вклад в формирование подземной составляющей стока Протвы. Отчленяемый при помощи программного комплекса GrWat базисный сток реки, согласно полученным результатам, в период межени состоит от 70–80 до 93% из грунтового стока и от 7 до 20–30% из атмосферных осадков, вероятно, стекающих через почвенный горизонт и верховодку. На спаде половодья 2019 г. доля грунтовых вод в базисной составляющей была близка к полученным оценкам для межени – 80%. При этом

Таблица 2

Изотопная характеристика ($\delta^{18}\text{O}$, δD и дейтериевый эксцесс d_{exc}) воды в 2019 и 2020 гг.

Место отбора	№ образца	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d_{exc} , ‰
р. Протва	3с	14.04.19	-12,64	-90,92	10,21
Восточно-Сатинский ручей	2с	14.04.19	-10,89	-81,14	5,99
Западно-Сатинский ручей	1с	14.04.19	-11,82	-83,72	10,87
Егоров овраг	4с	14.04.19	-12,02	-83,55	12,57
Ручей из-под склона (известняки)	6с	14.04.19	-11,57	-82,38	10,15
Талый снег	7с	14.04.19	-17,16	-127,29	9,96
Талый снег	8с	14.04.19	-15,23	-118,85	3,01
р. Протва	105с	15.07.19	-11,14	-79,55	9,54
Вода из скважины	106с	15.07.19	-12,30	-86,74	11,64
Егоров овраг, устье	114с	16.07.19	-11,98	-83,60	12,27
Восточно-Сатинский ручей	133с	16.07.19	-11,95	-84,15	11,43
р. Протва	401с	15.03.20	-10,92	-80,8	6,6
Восточно-Сатинский ручей	406с	15.03.20	-11,38	-82,5	8,6
р. Протва	406-20	04.06.20	-9,32	-65,1	9,4
р. Протва	506-20	05.06.20	-9,65	-67,9	9,3
р. Протва	606-20	06.06.20	-9,73	-67,9	9,9
р. Протва	706-20	07.06.20	-9,85	-68,9	9,8
Восточно-Сатинский ручей	307с	21.12.20	-10,87	-81,0	6,0
р. Протва	306с	21.12.20	-10,72	-80,0	5,7
Западно-Сатинский ручей	304с	21.12.20	-11,09	-82,0	6,7

упрощенная схема отчленения базисного стока при прохождении паводка, заложенная в алгоритм GrWat линейной функцией, очевидно, приводит к занижению базисной составляющей при прохождении паводка, как, например, в 2009 г., когда в компоненту базисного стока на спаде паводка вошел только грунтовый сток. При этом относительно более динамичная часть подземных вод (почвенный сток и сток через верховодку, сформированный атмосферными осадками) попала по расчленению GrWat в быстрый сток.

Нельзя не предположить, что резервуар подземных вод, питающих р. Протву, может быстро пополняться во время экстремальных дождевых паводков. Гораздо менее подверженный влиянию (участию) осадков изотопный состав кислорода ручьев закономерно указывает на то, что в речном стоке в летнюю межень довольно велика доля атмосферной влаги даже в длительные периоды времени без осадков. Результаты изотопного и графоаналитического расчленения предполагают, что подземное питание реки (базисный сток) состоит из двух компонентов: собственно грунтовых вод с относительно постоянным изотопным составом кислорода и вод верховодки, которая динамично реагирует на инфильтрацию атмосферных осадков.

При графоаналитическом расчленении гидрографа за принципиальный постулат принимается увеличение подземного питания дождевым стоком при прохождении паводков. Отчленение паводков в методе GrWat [Kireeva et al., 2020] происходит по хорде от точки резкого увеличения расходов воды до точки перегиба (снижения расходов воды). Скорее всего, такая упрощенная схема может быть нарушена поступлением большого количества дождевых вод в верховодку и резервуар грунтовых вод уже в начале паводка и, таким образом, вклад грунтовых вод в течение дождевого паводка оказывается недооцененным. Это ставит задачу поиска критериев и повышения точности расчленений для периодов паводков и половодий.

В международной гидрологической практике существует несколько программ по анализу гидрографов, но ни одна не позволяет в полной мере проанализировать генетические компоненты стока реки. В зарубежных программах используются различные фильтры для вычисления доли того или иного компонента стока. Например, американская программа BFI+ использует для расчленения гидрографа 11 различных фильтров, среди которых методы локальных минимумов, фиксированного интервала, скользящего интервала и пр. [Eckhardt, 2005]. Похожая программа FlowComp позволяет выделить три субрежима: быстрый (или поверхностный), базисный и промежуточный на осно-

ве фильтра Лайла-Холлика [Ladson et al., 2013; Nathan, McMahon, 1990].

Использованный в работе алгоритм автоматического расчленения гидрографа GrWat позволяет достаточно точно оценить вклад каждого из компонентов стока. Принцип большинства зарубежных программ основывается исключительно на выделении базисной составляющей стока (baseflow) и быстро, поверхностного стока (quickflow), в то время как алгоритм GrWat позволяет определить долю стока паводочного, талых вод, меженного и стока в половодье. Верификация метода для половодья и паводков с применением изотопного расчленения является задачей будущих исследований.

В отличие от графических методов, изотопное расчленение является измеримым, объективным и основывается на компонентах самой воды. Первое изотопное расчленение гидрографа с использованием трития было опубликовано в 1969 г. [Hubert et al., 1969]. С тех пор около 200 исследований использовали стабильные изотопы кислорода и водорода для определения компонентов стока в широком диапазоне климата, геологии и условий землепользования.

Изотопное расчленение гидрографа в классическом понимании опирается на ряд допущений [Buttle, 1994; Klaus, McDonnell, 2013], одно из которых заключается в том, что изотопные характеристики этих двух типов вод значительно отличаются, а второе – что изотопный состав выпадающих осадков стабилен во время одного дождя и одинаков в пределах водосбора. Хорошо известно, что изотопный состав осадков не одинаков в течение даже одного события, а в условиях крупных водосборов может быть очень вариативен по площади. Это послужило сигналом к изучению влияния такой неоднородности на результаты изотопного расчленения [Katsuyama et al., 2015; Schürch et al., 2003; Seeger, Weiler, 2014]. На малых водосборных бассейнах (<10 км²) обычно пренебрегают влиянием пространственной изменчивости как для количества осадков [Goodrich et al., 1995], так и для его изотопного состава [McDonnell, Beven, 2014].

Большинство современных работ по изотопному расчленению в небольших водосборах учитывают временную изменчивость в изотопном составе осадков, но игнорируют пространственную изменчивость осадков и их изотопный состав в водосборном бассейне. Однако для некоторых событий пространственная изменчивость изотопного состава осадков оказывается почти такой же большой, как временная [Fisher et al., 2017]. Пространственная изменчивость в изотопном составе осадков внутри одного водосбора в предгорье Альп (4,3 км²) привела к различиям в 60% в рассчитанном минимальном

вкладе одной из компонент в речном стоке [Fisher et al., 2017]. В настоящей работе осреднение изотопных параметров атмосферных осадков до среднемесячных сделано для того, чтобы уйти от локальных и кратковременных эффектов в формировании изотопного состава стока рек, но проследить основные черты формирования вклада грунтовой составляющей в питание реки.

ВЫВОДЫ

Выполнено расчленение гидрографа р. Протвы графоаналитическим методом с использованием алгоритма GrWat. Для интерпретации результатов этого метода для отдельных дней летней межени выполнено изотопное расчленение гидрографа. В алгоритме GrWat для дней летней межени было выполнено разделение на быструю (атмосферные осадки) и базисную (подземный сток) составляющие. Изотопным методом для дней летней межени было выполнено расчленение на грунтовое питание и атмосферные осадки текущего месяца. Изотопный состав кислорода грунтовых вод установлен по пробам родниковых вод, для летних месяцев

2010, 2011 и 2019 гг. он оставался неизменным: $\delta^{18}\text{O} = -12,3\text{‰}$. Разницу между оценкой вклада грунтового питания и базисного стока можно считать вкладом верховодки. Для условий летней межени 2009, 2010, 2011 и 2019 гг. и спада аномально маловодного половодья 2019 г. вклад грунтовой составляющей в базисный сток оценивается от 70–80 до 100% в зависимости от условий водного режима в момент отбора проб и глубины межени. Часть базисного стока (до 30%) формируется за счет атмосферных осадков, поступающих через верховодку и почвенные горизонты.

Расчленение дождевого паводка с высокими расходами графоаналитическим методом GrWat предполагает линейную срезку при отчленении базисного стока во время прохождения паводка. При этом возможен недоучет значительного количества дождевых вод, поступающих через верховодку и почвенный сток в начале паводка. Таким образом, вклад базисного стока вод в течение дождевого паводка может оказаться недооцененным. Это определяет направление дальнейших работ по расчленению гидрографа стока средней реки.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант 19-77-10032.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 265 с.
- Воронков П.П. Гидрохимические обоснования выделения местного стока и способ расчленения его гидрографа // Метеорология и гидрология. 1986. № 8. С. 21–28.
- Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупанов С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 6. С. 126–140.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Бугров А.А. Особенности формирования современных ресурсов подземных вод европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 457–466.
- Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 304 с.
- Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. 343 с.
- Личков Б.Л. Природные воды земли и литосферы. Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 164 с.
- Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги: научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. Ливны: Издатель Мухометов Г.В., 2015. 467 с.
- Попов О.В. Подземное питание рек. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 290 с.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 358 с.
- Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Ефимова Л.Е., Лукьянова А.Н., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав осадков и воды в речной системе средней Протвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 2. С. 84–93.
- Чижова Ю.Н., Еремина И.Д., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Содержание ^{18}O в атмосферных осадках Москвы в 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 78–90.
- Dinçer T., Payne B.R., Florkowski T., Martinec J., Tongiorgi E. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18, *Water Resources Research*, 1970, vol. 6(1), p. 110–124, DOI: 10.1029/WR006i001p00110.
- Burns D.A. Stormflow-hydrograph separation based on isotopes: the thrill is gone – what’s next? *Hydrological Processes*, 2002, vol. 16, p. 1515–1517, DOI: 10.1002/hyp.5008.
- Buttle J.M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins, *Prog. Phys. Geogr.*, 1994, vol. 18, p. 16–41.
- Eckhardt K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation, *Hydrological Processes*, 2005, vol. 19(2), p. 507–515.
- Fischer B.M.C., Meerveld van H.J.I., Seibert J. Spatial variability in the isotopic composition of rainfall in a small headwater catchment and its effect on hydrograph separation, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 547, p. 755–769.

- Freeze R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas, *Water Resources Research*, 1972, vol. 8(5), p. 1272–283, DOI: 10.1029/wr008i005p01272.
- Fritz P., Cherry J., Weyer K., Sklash M. Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions, *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater*, Panel Proceedings Series-International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1976, p. 111–130.
- Goodrich D.C., Faurès J.-M., Woolhiser D.A., Lane L.J., Sorooshian S. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability, *Journal of Hydrology*, 1995, vol. 173, p. 283–308, DOI: 10.1016/0022-1694(95)02703-R.
- Hall F.R. Base flow recessions – a review, *Water Resources Research*, 1968, vol. 4(5), p. 973–983.
- Herrmann A., Stichler W. Groundwater-runoff relationships, *Catena*, 1980, no. 7, p. 251–263.
- Hubert P., Marin E., Meybeck M., Olive E.S. Aspects Hydrologique, Geochimique et Sedimentologique de la Crue Exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968, *Arch. Sci (Geneve)*, 1969, no. 3, p. 581–604.
- Katsuyama M., Yoshioka T., Konohira E. Spatial distribution of oxygen-18 and deuterium in stream waters across the Japanese archipelago, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, vol. 19, p. 1577–1588, DOI: 10.5194/hess-19-1577-2015.
- Kireeva M.B., Rets E.P., Frolova N.L., Samsonov T.E., Povlishnikova E.S., Entin A.L., Durmanov I.N., Ivanov A.M. Occasional floods on the rivers of Russian plain in the 20th – 21st centuries, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 2, p. 84–95.
- Klaus J., McDonnell J.J. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation, *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 505, p. 47–64, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.006.
- Klaus J., Zehe E., Elsner M., Külls C., McDonnell J.J. Macropore flow of old water revisited: experimental insights from a tile-drained hillslope, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, p. 103–118, DOI: 10.5194/hess17-103-2013.
- Ladson A.R., Brown R., Neal B., Nathan R. A Standard Approach to Baseflow Separation Using the Lyne and Hollick Filter, *Australian Journal of Water Resources*, 2013, DOI: 10.7158/W12-028.2013.17.1.
- Laudon H., Hemond H.F., Krouse R., Bishop K.H. Oxygen 18 fractionation during snowmelt: Implications for spring flood hydrograph separation, *Water Resources Research*, 2002, vol. 38, p. 40-1–40-10, DOI:10.1029/2002WR001510.
- McDonnell J.J., Beven K. Debates – The future of hydrological sciences: A (common) path forward? A call to action aimed at understanding velocities, celerities and residence time distributions of the headwater hydrograph, *Water Resources Research*, 2014, vol. 50, p. 5342–5350, DOI: 10.1002/2013WR015141.
- Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis, *Water Resources Research*, 1990, vol. 26(7), p. 1465–1473.
- Schürch M., Kozel R., Schotterer U., Tripet J.P. Observation of isotopes in the water cycle – the Swiss National Network (NISOT), *Environ. Geol.*, 2003, vol. 45, p. 1–11, DOI: 10.1007/s00254-003-0843-9.
- Seeger S., Weiler M. Reevaluation of transit time distributions, mean transit times and their relation to catchment topography, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, vol. 18, p. 4751–4771, DOI: 10.5194/hess-18-4751-2014.
- Segura C., Noone D., Warren D., Jones J., Tenny J., Ganio L. Climate, landforms, and geology affect baseflow sources in a mountain catchment, *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, DOI: 10.1029/2018WR023551.
- Электронный ресурс
GNIP Database, Global Network of Isotopes in Precipitation, IAEA/WMO, 2020, URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения 01.10.2020).

Поступила в редакцию 28.10.2020
После доработки 02.04.2021
Принята к публикации 02.06.2021

TWO-COMPONENT SEPARATION OF THE PROTVA RIVER HYDROGRAPH

Ju.N. Chizhova¹, E.P. Rets², N.A. Tebenkova³, A.V. Kozachek⁴, A.N. Veres⁵, A.A. Ekaikin⁶,
A.V. Gorbarenko⁷, N.A. Varentsova⁸, M.B. Kireeva⁹, N.L. Frolova¹⁰, I.D. Eremina¹¹,
A.G. Kositskiy¹²

¹ Institute of Geology of Ore Deposits, mineralogy, petrography and geochemistry (IGEM) RAS, Laboratory of isotope geochemistry and geochronology, Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: eacentr@yandex.ru

² Institute of Water Problems RAS, Laboratory of Regional Hydrology, Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: retska@mail.ru

^{3–6} Arctic and Antarctic Research Institute, Laboratory of Climate and Environment Changes

^{7–10, 12} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

⁸ FSBI “Central UGMS”, head of the Department of Hydrological Forecasts

¹¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Meteorological Laboratory, Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Chemistry; e-mail: meteo@rambler.ru

³ Junior Scientific Researcher; e-mail: tebenkova@aari.ru

⁴ Junior Scientific Researcher; e-mail: kozachek@aari.ru

⁵ Engineer; e-mail: veres@aari.ru

⁶ Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: ekaykin@mail.ru

⁷ Student; e-mail: aar44i@yandex.ru

⁸ Engineer; e-mail: efrnatalie@gmail.com

⁹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

¹⁰ Professor; e-mail: frolova_nl@mail.ru

¹² Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: alexhydro@mail.ru

The 2009, 2010, 2011, 2019 and 2020 hydrographs for the Protva River were separated into fast and basic components by the grapho-analytical method using the GrWat software package. The algorithm makes it possible to automatically separate the spring flood, baseline runoff, rain and thaw floods, depending on the characteristics of the water regime and uses the meteorological information of re-analysis. Separation of the runoff into two genetic components – groundwater and precipitation for individual days of the summer low-water period was performed. Isotopic separation was performed by the balance equation according to the $\delta^{18}\text{O}$ values determined in river runoff and groundwater outlets. The oxygen isotopic composition of precipitation was taken as a monthly average $\delta^{18}\text{O}$ of Moscow. For the summer low water, the algorithm divides the runoff into fast (atmospheric precipitation, surface runoff) and basic. The basic runoff separated by the GrWat algorithm is the total underground supply and consists of the groundwater itself and the suspended water. The assessment of soil component by the isotopic method does not include the suspended water. Thus, by using both separation methods together, it is possible to estimate the proportion of suspended water in the base runoff. The aim of the study was to establish the feature of the base flow of the Protva River and determine the amounts of groundwater supply, precipitation and water entering the main channel through the soil horizons (suspended water) for the summer low-water period. It was found that the contribution of the ground water component to the base flow is about 70–80%, and 20–30% of the base flow is formed by precipitation coming through the soil horizons. The study of the base flow formation and its separation in the GrWat algorithm is currently important for the catchments with irregular observations. The importance increases under the sharp interannual changes in water regime resulting from climate changes.

Keywords: river discharge, base flow, ground water input, hydrograph separation, oxygen isotope composition

Acknowledgment. This work was supported by the Russian Science Foundation, grant 19-77-10032.

REFERENCES

- Burns D.A. Stormflow-hydrograph separation based on isotopes: the thrill is gone – what's next? *Hydrological Processes*, 2002, vol. 16, p. 1515–1517? DOI: 10.1002/hyp.5008.
- Buttle J.M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins, *Prog. Phys. Geogr.*, 1994, vol. 18, p. 16–41.
- Chizhova Yu.N., Budantseva N.A., Efimova L.E., Lukanova A.N., Surkova G.V., Vasil'chuk Yu.K. Izotopno-kislorodnyi sostav osadkov i vody v rechnoi sisteme srednei Protvy [Oxygen isotope composition of precipitation and water in the Middle Protva River system], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2013, no. 2, p. 84–93. (In Russian)
- Chizhova Yu.N., Eremina I.D., Budantseva N.A., Surkova G.V., Vasil'chuk Yu.K. Concentration of ^{18}O in precipitation over Moscow in 2014, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, no. 1, p. 54–63.
- Dinçer T., Payne B.R., Florkowski T., Martinec J., Tongiorgi E. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18, *Water Resources Research*, 1970, vol. 6(1), p. 110–124, DOI: 10.1029/WR006i001p00110.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Retz E.P., Bugrov A.A. Formation of Current Groundwater Resources in European Russia, *Water resources*, 2015, vol. 42, no. 5, p. 563–571.
- Eckhardt K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation, *Hydrological Processes*, 2005, vol. 19(2), p. 507–515.
- Evstigneev V.M. *Rechnoï stok i gidrologicheskiye raschety* [River runoff and hydrological calculations], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1990, 304 p. (In Russian)
- Fischer B.M.C., Meerveld van H.J.I., Seibert J. Spatial variability in the isotopic composition of rainfall in a small headwater catchment and its effect on hydrograph separation, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 547, p. 755–769.
- Freeze R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas, *Water Resources Research*, 1972, vol. 8(5), p. 1272–283, DOI: 10.1029/wr008i005p01272.
- Fritz P., Cherry J., Weyer K., Sklash M. Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions, *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater*, Panel Proceedings Series-International Atomic Energy Agency. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1976, p. 111–130.
- Goodrich D.C., Faurès J.-M., Woolhiser D.A., Lane L.J., Sorooshian S. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability, *Journal of Hydrology*, 1995, vol. 173, p. 283–308, DOI: 10.1016/0022-1694(95)02703-R.
- Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K., Lupakov S.Yu. Komponenty stoka malykh vodosborov Sikhote-Alinya: obobshcheniye rezul'tatov polevykh izmereniy i trasernogo modelirovaniya [Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results

- of field measurements and tracer modeling], *Izvestiya Rossiyskoj akademii nauk, Geogr. seriya*, 2019, no. 6, p. 126–140. (In Russian)
- Hall F.R. Base flow recessions – a review, *Water Resources Research*, 1968, vol. 4(5), p. 973–983.
- Herrmann A., Stichler W. Groundwater-runoff relationships, *Catena*, 1980, no. 7, p. 251–263.
- Hubert P., Marin E., Meybeck M., Olive E.S. Aspects Hydrologique, Geochimique et Sedimentologique de la Crue Exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968, *Arch. Sci (Geneve)*, 1969, no. 3, p. 581–604.
- Katsuyama M., Yoshioka T., Konohira E. Spatial distribution of oxygen-18 and deuterium in stream waters across the Japanese archipelago, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, vol. 19, p. 1577–1588, DOI: 10.5194/hess-19-1577-2015.
- Kireeva M.B., Rets E.P., Frolova N.L., Samsonov T.E., Povlishnikova E.S., Entin A.L., Durmanov I.N., Ivanov A.M. Occasional floods on the rivers of the Russian Plain in the 20th –21st centuries, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 2, p. 84–95.
- Klaus J., McDonnell J.J. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation, *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 505, p. 47–64, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.006.
- Klaus J., Zehe E., Elsner M., Külls C., McDonnell J.J. Macropore flow of old water revisited: experimental insights from a tile-drained hillslope, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, vol. 17, p. 103–118, DOI: 10.5194/hess17-103-2013.
- Kudelin B.I. *Printsipy regional'noi otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles for Regional Assessment of Natural Groundwater Resources], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1960, 343 p. (In Russian)
- Ladson A.R., Brown R., Neal B., Nathan R. A Standard Approach to Baseflow Separation Using the Lyne and Hollick Filter, *Australian Journal of Water Resources*, 2013, DOI: 10.7158/W12-028.2013.17.1.
- Laudon H., Hemond H.F., Krouse R., Bishop K.H. Oxygen 18 fractionation during snowmelt: Implications for spring flood hydrograph separation, *Water Resources Research*, 2002, vol. 38, p. 40-1–40-10, DOI: 10.1029/2002WR001510.
- Lichkov B.L. *Prirodnye vody zemli i litosfery* [Natural waters of the earth and lithosphere], Leningrad, Russian Academy of Science, 1960, 164 p. (in Russian)
- McDonnell J.J., Beven K. Debates – The future of hydrological sciences: A (common) path forward? A call to action aimed at understanding velocities, celerities and residence time distributions of the headwater hydrograph, *Water Resources Research*, 2014, vol. 50, p. 5342–5350, DOI: 10.1002/2013WR015141.
- Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis, *Water Resources Research*, 1990, vol. 26(7), p. 1465–1473.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki rek basseina Verkhnei Volgi* [Scientific and applied reference book: Basic hydrological characteristics of rivers in the Upper Volga basin], Georgievsky V.Yu. (ed.), Livny, Publisher Mukhametov G.V., 2015, 467 p. (In Russian)
- Popov O.V. *Podzemnoe pitanie rek* [Underground feeding of rivers], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 290 p. (In Russian)
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam, vyp. 1, Dolgosrochnnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodokhranilishch* [Guide to Hydrological Forecasts, iss. 1, Long-term forecasts of the elements of the water regime of rivers and reservoirs], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 358 p. (In Russian)
- Schürch M., Kozel R., Schotterer U., Tripet J.P. Observation of isotopes in the water cycle—the Swiss National Network (NISOT), *Environ. Geol.*, 2003, vol. 45, p. 1–11, DOI: 10.1007/s00254-003-0843-9.
- Seeger S., Weiler M. Reevaluation of transit time distributions, mean transit times and their relation to catchment topography, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, vol. 18, p. 4751–4771, DOI: 10.5194/hess-18-4751-2014.
- Segura C., Noone D., Warren D., Jones J., Tenny J., Ganio L. Climate, landforms, and geology affect baseflow sources in a mountain catchment, *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, DOI: 10.1029/2018WR023551.
- Vladimirov A.M. *Stok rek v malovodnyi period goda* [River runoff during low-water season], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 265 p. (In Russian)
- Voronkov P.P. *Gidrokhimicheskie obosnovaniya vydeleniya mestnogo stoka i sposob raschleneniya ego gidrografa* [Hydrochemical substantiation of the local runoff separation and the method of hydrograph separation], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1986, no. 8, p. 21–28. (In Russian)

Web source

IAEA/WMO, Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP Database, 2020, URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (date access 01.10.2020).

Received 28.10.2020

Revised 02.04.2021

Accepted 02.06.2021