
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.5

ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕЙ СВИЯГИ И ЕЕ ПРИТОКОВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2024 г. И. А. Жуков^{1,*}, Д. Н. Айбулатов^{1,**}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: les-96@yandex.ru

**E-mail: gidroden@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.2023 г.

После доработки 22.02.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

В настоящее время изученность гидрологических характеристик малых рек России крайне мала. Учитывая возрастающее ухудшение экологического состояния поверхностных водотоков, влияющее в первую очередь на внутригодовое распределение стока воды именно на малых и средних реках, изучение процессов формирования стока, его изменчивости и внутригодовых изменений становится важнейшей задачей гидрологии. В статье рассмотрены показатели внутригодового распределения стока рек в верховьях р. Свияга при практически полном отсутствии изученности изменений стока малых и средних рек на исследуемой территории. Цель исследования – выявить, как изменяется сток воды малых и средних рек в верхнем течении р. Свияга, в бассейне которой проявляются карстовые процессы. В работе представлен анализ внутригодового распределения стока воды для рек на исследуемой территории, дана оценка его вариаций на фоне изменений климата, приведено описание выявленных типов водного режима и природных факторов, максимально влияющих на него. По результатам исследований предложена типизация рек по годовому стоку воды, проанализировано внутригодовое распределение уровней и расходов воды, дана оценка влияющих на них факторов и выявлены наиболее значимые из них.

Ключевые слова: речной сток, карст, внутригодовое распределение стока воды, малые реки, логгеры, комплекс GrWat 3.0.M

DOI: 10.31857/S0869780924030028 EDN: SPRYXP

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования являются верховья бассейна р. Свияга. Свияга – правый приток первого порядка р. Волга. Исследуемая территория расположена в центральной части Ульяновской области, в Среднем Поволжье на юго-востоке Европейской части России, на восточной части Русской платформы, охватывающей большую часть европейской территории России [7]. Исследуемая часть бассейна располагается в лесостепной зоне. По обеспечению атмосферными осадками бассейн относится к зоне с недостаточным увлажнением. Бассейн Свияги – территория с минимальной антропогенной нагрузкой.

Предметом исследования служат изменения в показателях внутригодового распределения стока и термического режима рек в бассейне р. Свияга.

Актуальность работы обусловлена малой изученностью вариаций стока малых рек, связанных с изменением климата, необходимостью

изучения проблем с водоснабжением вновь присоединенных территорий и выявления опасных гидрологических явлений (в первую очередь затопление территорий), уточнения характеристик и распределения внутригодового стока воды рек исследуемой территории, а также получения данных для гидрогеологических фильтрационных моделей.

В бассейне р. Свияга достаточно широко распространены карстовые процессы, что определяется, прежде всего, геологическим и гидрологическими условиями. Карст распространен в местах залегания на поверхности или близко к ней отложений маастрихтского яруса верхнего отдела меловой системы (K_2m), представленных мелом, мелоподобными известняками с прослоями мергелей [2]. Трещиноватость отложений маастрихтского яруса довольно высокая, могут присутствовать каверны; в целом отложения маастрихтского яруса характеризуются высокими значениями открытой пористости.

Исследование карста в Поволжье началось с XXVIII в. Основоположителем исследований стал М.В. Ломоносов. Основные исследования карста Нижнего Поволжья проведены в академических экспедициях И.И. Лепехина, Н.П. Рычкова, П.С. Палласа, И.П. Фалька, И.А. Гюльденштедта в 1768–1774 гг., в которых обследовались и описывались карстовые явления Поволжья. И.И. Лепехин обратил внимание на провальные карстовые озера в нижней части бассейна Свяги и, вслед за В.Н. Татищевым, утверждал, что карстовые пещеры есть результат деятельности воды и медленно действующих гидрогеологических процессов [6].

Исследования карста продолжались и в XXI в. На развитие карстовых процессов нередко указывает нарушение залегания слоев под родниками, выходящими в основании крутых склонов из маастрихтского мела. Эти нарушения вызваны выщелачиванием мела потоком подземных вод и последующим обрушением вышележащих пород. Такие подобные карстовые формы были обнаружены в верховьях р. Свяга¹.

Карстовые формы чаще всего представлены провальными воронками. Самая крупная воронка (диаметр 350 м и глубина 20 м) была отмечена на левом склоне долины Свяги у восточной окраины д. Смышляевка. Отдельные воронки и группы воронок наблюдались в бассейнах рек Сельдь, Чамбул, Барыш, Ус, Терешка [13].

Известны случаи образования крупных карстовых провалов в меловых отложениях и в настоящее время. Интенсивное движение подземных вод на крыльях тектонических структур типа валов и антиклиналей обуславливает приуроченность значительного количества провальных воронок именно к этим элементам тектонических структур. Двигаясь по наклону пластов, подземные воды приобретают напорный характер. Местами они поднимаются вверх по тектоническим трещинам под давлением, образуя восходящие напорные родники, приуроченные к днищам речных долин. С растворяющей деятельностью восходящих напорных вод связано образование в меловых породах воронок выщелачивания [12].

Переход поверхностного стока в подземный, и наоборот, обуславливает своеобразие морфологии русел рек и пойм, а также и схем деформаций в зонах питания и разгрузки подземных вод. В этих зонах меняются активные руслообразующие факторы – сток воды и наносов. Нарушается баланс между количеством взвешенных и донных наносов [11].

¹ Туняк А.П. Геологическое строение правобережья р. Волги в районе с. Б. Ундоры и бассейна р. Свяги от с. Бурцево до ст. Алейкино (в районе Ульяновской области и ТАССР по работам 1951–1952 гг.). М: ВНИГРИ, 1952. Отчет. Инв. номер ФГИ 00138. https://eco.tatarstan.ru/file/pub/pub_1269179.pdf

В зонах питания поверхностный сток поглощается как проранами и трещинами в породах, так и заполненными аллювием русловыми понорами. Реки имеют наибольшую водность при подходе к зоне питания карстового района. Далее их водность уменьшается [8]. Малые реки часто полностью исчезают под землей. Практически это наблюдается в областях питания подземных вод с маломощным покровом рыхлых отложений во всех карстовых районах.

На малых реках зона “эрозии”, образующаяся в начале зоны снижения расхода, характеризуется интенсивным размывом ложа с образованием “микророгов” и вертикальных уступов, у основания которых расположены воронки размыва. Зона эрозии сменяется транзитно-аккумулятивной зоной, в которой происходит отложение части наносов с образованием своеобразных “побочней” и “перекатов” [2].

В закарстованных районах наблюдается внутригодовое перераспределение стока воды. Годовой сток воды увеличивается (до 15%). Наблюдается уменьшение максимальных расходов в период половодья (до 12%), половодье становится более распластанным, а его продолжительность увеличивается. В закарстованных районах наблюдается существенное увеличение меженного стока (до 30%), особенно во время прохождения летне-осенней межени. Также карст способствует увеличению максимальных расходов паводков (до 25%).

Реки бассейна Свяги относятся к рекам с восточно-европейским типом водного режима (по классификации Б.Д. Зайкова). Для них характерно прохождение более 50% годового стока за период весеннего половодья [5].

На исследуемой территории преобладают малые реки длиной менее 5 км (77%), имеющие смешанное питание. Их водный режим характеризуется следующими фазами: весеннее половодье, летняя и зимняя межени, летние и осенние дождевые паводки. Русла большинства рек на исследуемой территории хорошо разработаны, имеют глубокие эрозионные врезы.

Весеннее половодье длится около одного месяца. Объем стока в бассейнах исследуемых рек в это время может изменяться от 35 до 95% годового. Летняя межень наступает в мае-июне и характеризуется малой водностью. Основное питание в этот период осуществляется за счет подземных вод, поступление которых по длинам рек осуществляется неравномерно в связи с различием структурно-гидрогеологических условий.

По классификации М.И. Львовича реки исследуемой территории относятся к рекам с преимущественно снеговым питанием. По П.С. Кузину, местные реки можно отнести к рекам

с половодьем и паводками (реки с весенне-летним половодьем и паводками в теплую часть года).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для комплексного анализа внутригодового стока воды р. Свяга и ее притоков изучен и проанализирован внутригодовой ход метеорологических величин (температура воздуха и осадки) с ближайших метеорологических станций. Район исследования по действующей нормативной базе имеет степень метеорологической изученности – изученная. Наиболее репрезентативной для исследуемой территории является метеостанция в г. Ульяновск, так как она расположена в одном районе с гидрологическим постом Вырыпаевка на р. Свяга.

Из всех метеорологических величин для анализа выбраны годовая сумма осадков, их сезонное распределение и годовой ход температуры воздуха.

Для анализа внутригодовых и долгопериодных изменений составляющих годового стока воды р. Свяга взяты ежедневные расходы воды в период с 1953 по 2018 г. по данным гидрологического поста в пос. Вырыпаевка.

Также на исследуемой территории создана сеть из 10 временных гидрологических постов, оборудованных логгерами, фиксирующими уровень и температуру воды в установленных временных интервалах. Измерения проводились синхронно раз в полчаса.

Для анализа водного режима рек и их источников питания проводят расчленение гидрографа на генетические составляющие, представляющие собой стоки разного типа. Расчленение гидрографа позволяет определить суммарную величину подземного и паводочного стока. Типовой гидрограф представляет собой линию, описывающую пик половодья, кривые его спада и подъема, летнюю и зимнюю межень. Площадь под этой линией определяет объем подземного и поверхностного стока [10].

При расчленении гидрографа учитывают гидрогеологические условия территории. Режим стока подземных вод, гидравлически связанных с рекой, характеризуется минимумом подземного питания в момент максимума поверхностного стока [14].

Имея непрерывные ряды данных по ежедневным наблюдениям за уровнями и расходами Свяяги с 1975 г., а также данные по осадкам и температуре воздуха с метеостанции в г. Ульяновск за этот же период, выполнено расчленение гидрографов с помощью программного комплекса GrWat 3.0.M.

Используемый в этом комплексе алгоритм автоматического расчленения гидрографа по генетическим составляющим разработан коллективом авторов: к.г.н. М.Б. Киреевой (МГУ, кафедра гидрологии суши), к.г.н. Е.П. Рец, к.г.н.

Т.Е. Самсоновым (МГУ, кафедра картографии и геоинформатики) в рамках проекта по изучению современного режима рек Европейской территории России [9]. Алгоритм заключается в автоматическом отделении весеннего половодья, подземного стока, дождевых и оттепельных паводков в зависимости от особенностей водного режима и изменения главных гидрологических характеристик каждой отдельной реки. В основе принципа работы алгоритма лежит методика расчленения гидрографа Б.И. Куделина [10].

Методика создания и анализа сетей постов на исследуемой территории

На исследуемой территории отсутствуют постоянные наблюдения за уровнями и расходами воды на малых реках, что определило потребность в создании временной гидрологической сети.

Для организации автоматического дистанционного наблюдения за гидрологическими характеристиками рек на каждом посту установлен логгер для автономной автоматической записи измерений уровня воды и температуры. Каждая запись включает дату, время, значения уровня и температуры воды.

После снятия всех показаний логгеров проведена обработка данных, записанных на них, которая подразделялась на три этапа:

- обработка данных в специализированной программе Solinst, в процессе которой на значения уровней воды вводилась поправка по атмосферному давлению;
- совмещение откалиброванных рядов данных об уровнях воды и ее температуре с температурой воздуха и динамикой выпадения осадков;
- построение графиков хода уровней воды с выделением основных фаз водного режима и генетически однородных составляющих стока в исследуемых реках.

Для получения данных временной гидрологической сети совершено два выезда – зимой 2018 г. и летом 2019 г. Кроме этого, организовано 6 выездов в верховья бассейна р. Свяга с целью измерения расходов воды на малых реках. Измерения расходов производились на всех створах 5 раз (в июле и ноябре 2018 г., в феврале, апреле и августе 2019 г.). Уровни воды (Н) пересчитаны в расходы воды (Q), после чего построены зависимости (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ метеорологических показателей. Максимально влияют на внутригодовой ход уровня воды и внутригодовое распределение стока воды

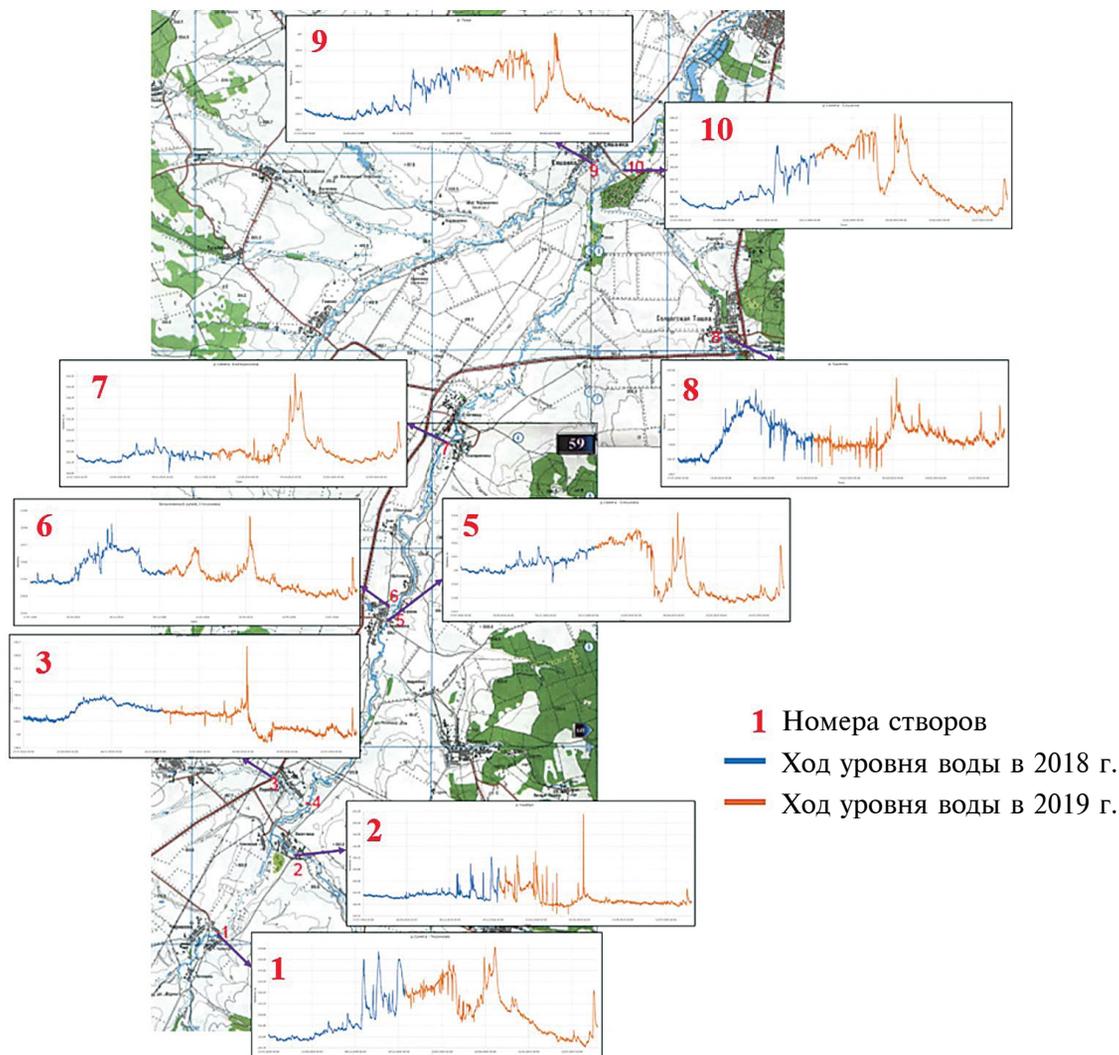


Рис. 1. Схема расположения привлеченных к исследованию рек в бассейне р. Свияга с графиками хода уровней воды. На карте обозначены створы: 1 – р. Свияга (створ Чириково); 2 – р. Чамбул (створ Хвостиха); 3 – руч. Чечерка (створ Порецкое); 5 – р. Свияга (створ Спешневка); 6 – руч. б/н (створ Спешневка); 7 – р. Свияга (створ Екатериновка); 8 – р. Ташелка (створ Солдатская Ташла); 9 – р. Гуша (створ Елшанка); 10 – р. Свияга (створ Елшанка). Створ 4 (р. Свияга (створ Порецкое) располагается в 50 м ниже устья руч. Чечерка (наблюдения на створе не удалось завершить из-за поломки логгера).

такие метеорологические характеристики, как температура воздуха и динамика внутригодового распределения осадков, которые необходимы для анализа многолетних колебаний стока Свияги и калибровки модели для выделения различного по генезису речного стока.

Величина суммы годовых осадков в бассейне р. Свияга имеет явный восходящий тренд: в 1964 г. она составляла 440 мм, в 1975 г. – 458 мм, в 2014 г. – 500 мм, а в исследуемый дождливый период 2018–2019 гг. среднегодовое их количество достигло 651 мм/год [3].

В последние десятилетия существенное влияние на водный режим рек бассейна Свияги оказало изменение климата. Годовой сток рек на большей части территории превысил

среднегодовую норму (до 15–40%) [1]. Еще более усугубились некоторые сезонные изменения. Так, в зимний период сток на 50–100% выше среднегодовой нормы [3].

Средняя многолетняя температура увеличилась с 4.1°C в 1953 г. до 5.4°C к 2018 г., т.е. более чем на один градус. Это не могло не сказаться и на водном режиме изучаемых рек.

Колебания величин осадков происходили в достаточно большом диапазоне – от 180 мм (1945 г.) до 675 мм (2011 г.) [4]. Построенные линейные тренды как для годовой суммы, так и для жидких и твердых осадков демонстрируют увеличение их количества. Зафиксировано внутригодовое перераспределение осадков: уменьшается количество твердых осадков, и одновременно увеличивается

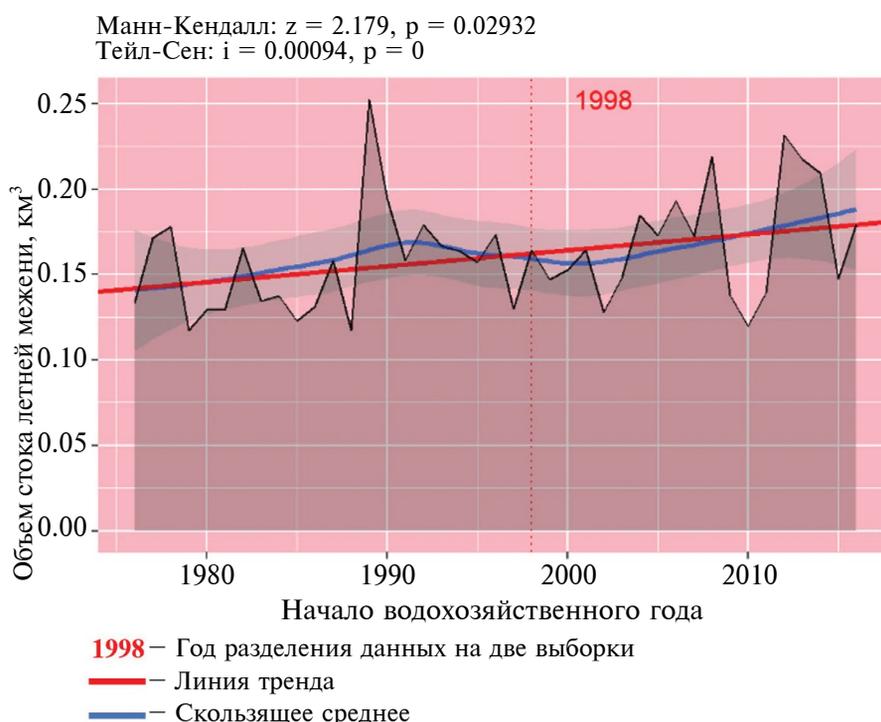


Рис. 2. Динамика меженного стока р. Свияга.

количество жидких. Анализ изменения количества осадков по месяцам за период 1975–2019 гг. показывает, что увеличение количества осадков наблюдается в марте, мае, июне, сентябре, октябре, а их снижение — в июле, августе, апреле и ноябре.

Работа в программном комплексе GrWat. Расчлененные гидрографы получены для 1975–2019 гг. водохозяйственных² лет. Посредством программного комплекса составлены динамические карты на межгодовые и долгопериодные изменения параметров стока Свияги по данным с поста Вырыпаевка.

В результате обработки ряда наблюдений на р. Свияга (пост Вырыпаевка) и метеостанции в Ульяновске получены графики межгодового распределения составляющих стока воды.

Для Свияги четко прослеживаются значимые положительные тренды увеличения стока летне-осенней и зимней межени. Рост летнего меженного стока (рис. 2) связан, прежде всего, с увеличением запасов подземных вод в ее начале, вследствие уменьшения глубины промерзания и площади его распространения, а также за счет увеличения частоты дождевых паводков.

Сокращение максимальных значений половодного стока р. Свияга достигает 30% от значений

начала 1980-х гг. (рис. 3). Сокращение максимального половодного стока реки обусловлено повышением температуры воздуха в холодное время года, что приводит к увеличению повторяемости оттепелей и, как следствие, снижению глубины промерзания почв и во многих случаях уменьшению запасов снега в снежном покрове к началу снеготаяния.

Полученные результаты в целом совпадают с данными гидрологических исследований изменений стока воды на более крупных реках европейской территории России [8].

Минимальные расходы воды (летне-осенний и зимний), характеризующие долю подземного стока в питании рек, имеют тенденцию к увеличению. Речной сток летне-осеннего периода после 1983 г. составлял в среднем 128% многолетней нормы. Противоположная тенденция наблюдается при анализе динамики зимнего минимального стока: величина зимней межени с середины 1980-х гг. сократилась почти на 25%.

В результате анализа установлено, что объем годового стока р. Свияга имеет тенденцию на уменьшение (рис. 4).

На основании анализа составляющих годового стока установлено, что в бассейнах рек исследуемой территории произошло перераспределение внутригодового стока — сокращение его поверхностной составляющей в сторону увеличения подземного стока.

² Расчетный годичный период, начинающийся с самого многоводного сезона [СП 33-101-2003 “Определение основных расчетных гидрологических характеристик”. <https://docs.cntd.ru/document/1200035578>].

Манн-Кендалл: $z = -2.247$, $p = 0.02465$
 Тейл-Сен: $i = -1.87288$, $p = 0$

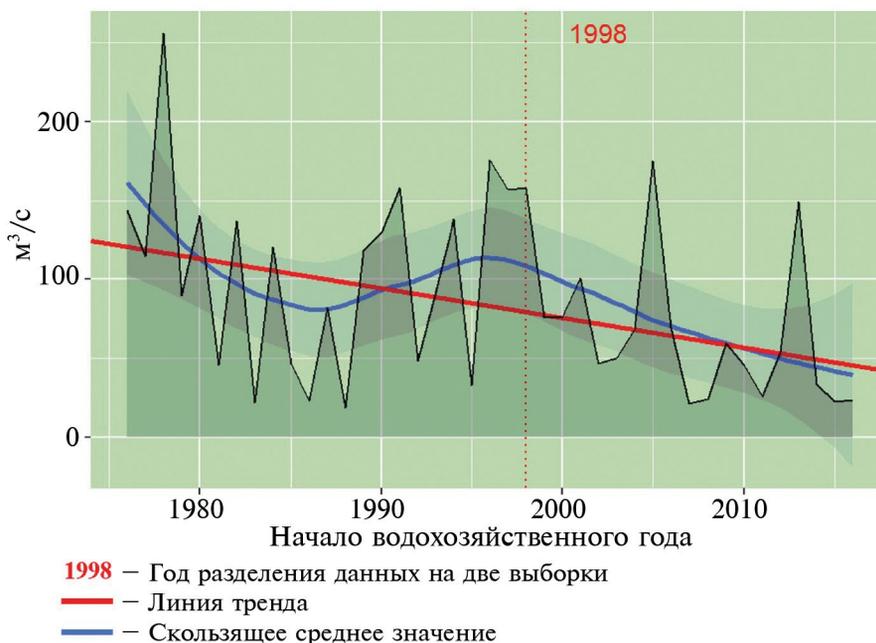


Рис. 3. Динамика максимальных расходов р. Свияга.

Манн-Кендалл: $z = -1.786$, $p = 0.07412$
 Тейл-Сен: $i = -0.00193$, $p = 0$

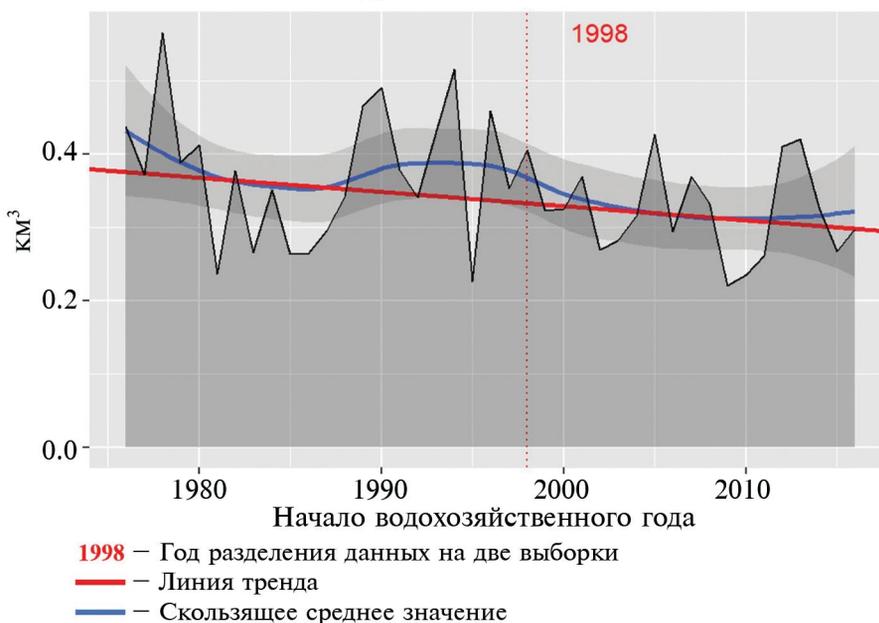


Рис. 4. Динамика годового стока р. Свияга.

Основной причиной перераспределения стока воды между фазами водного режима на исследуемой территории является увеличение количества жидких осадков. По повышению уровня подземных вод, снижению глубины промерзания почвы, сокращению объемов половодного стока можно сделать вывод о том, что процессы формирования речного стока в бассейне Свияги

претерпели существенное изменение, что связано с вторжением более теплых атлантических воздушных масс.

Наблюдается увеличение максимального расхода оттепельных паводков, что обусловлено частыми и более продолжительными переходами температуры воздуха через 0°C и приводит к увеличению снеготаяния в течение зимы.

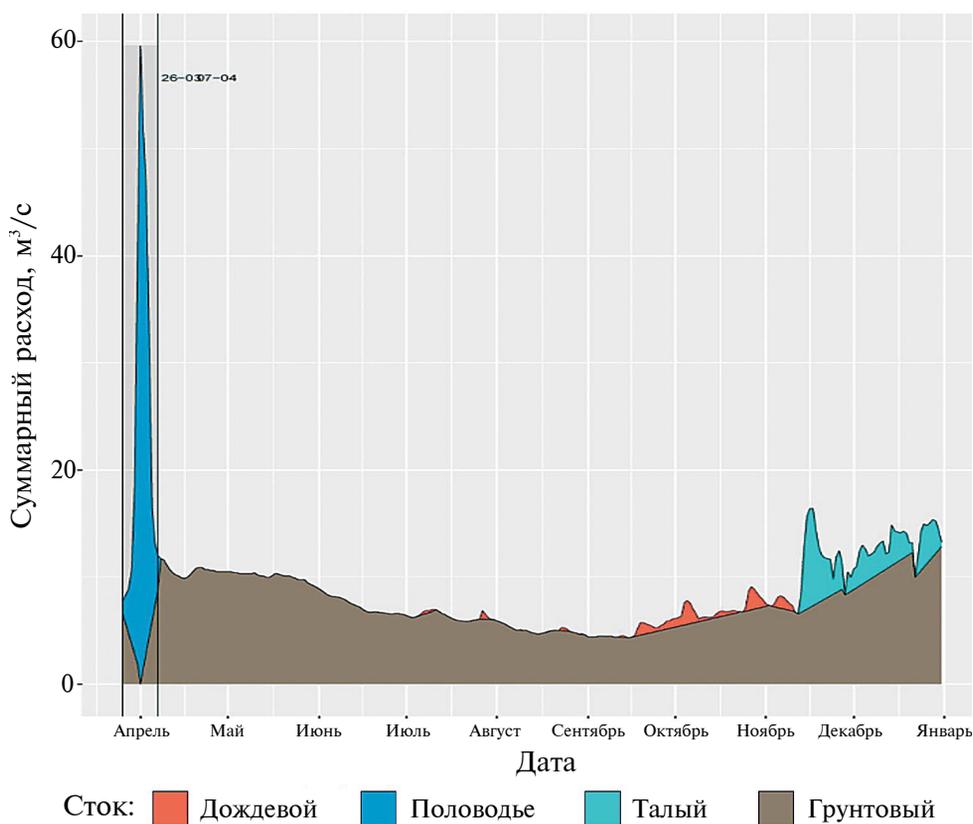


Рис. 5. Выделение типов питания р. Свияга (створ Елшанка).

Зафиксирован сдвиг дат оттепельных паводков на весенний период, ранее наблюдаемые оттепели в декабре-январе стали отмечаться в феврале-марте, а осенние паводки из оттепельных стали дождевыми.

В результате выполненных исследований установлено, что из-за изменившихся условий формирования речного стока на исследуемой территории изменились и его объем, и его внутригодовое распределение по фазам водного режима. По результатам анализа тенденций речного стока установлено, что объем годового стока воды за последние 43 года сократился более чем на 10%, объем подземного стока сократился почти на 6%, объем половодья сократился более чем на 35%, объем дождевого стока более чем на 25%, объем оттепельного стока сократился почти 26%, объем стока зимней межени сократился более чем на 10%, объем стока летней межени увеличился на 10%, продолжительность зимней межени уменьшилась на 2%, продолжительность летне-осенней межени увеличилась более чем на 5%, продолжительность половодья сократилась почти на 10%.

Обработка данных с логгеров. После обработки единого ряда наблюдений, предпринята попытка аналогичным образом выделить типы питания водотоков и на всех наблюдаемых створах (рис. 5).

Для этого проведен анализ ряда ежедневных расходов воды за 1953–2017 гг., целью которого являлся поиск похожих по форме гидрографов двух смежных годов, образующих единый водохозяйственный год. При поиске особое внимание уделялось среднегодовому расходу. Необходимо добиться примерного равенства между среднегодовыми расходами у исследуемых створов (створ Екатериновка – 3.46; створ Елшанка – 9.79; створ Спешневка – 4.69; створ Чириково – 3.15; р. Чамбул – 0.71; р. Ташелка – 0.64; р. Гуша – 3.55 м³/с) и искомым водохозяйственным годом.

В результате анализа подобран 2009–2010 водохозяйственный год как наиболее подходящий по форме гидрографа. Также 2009 г. наиболее подходит и по среднегодовому расходу – 3.98 м³/с, что является примерно средним значением для всех логгеров.

Добиться гидрологически обоснованного расчленения гидрографов удалось только для рек, для ручьев такого расчленения получить не удалось из-за малых расходов воды и слишком резких колебаний.

Выделение типов рек бассейна р. Свияга. После изучения показаний всех гидрографов по данным, полученным с логгеров за период 2018–2019 гг., створы сгруппированы по трем типам водного

режима рек, на которых они расположены. Выделенные типы отличаются по внутригодовому распределению стока воды и площади бассейнов исследуемых водотоков.

В *первый тип* сгруппированы створы на р. Свяга (Елшанка, Спешневка и Чириково) и ее притоках — р. Гуша и р. Чамбул (см. рис. 2), где наблюдались резкие подъемы и спады воды (по уровню эти колебания доходили до 0.7 м за 1–1.5 сут). Для этого типа рек характерно ярко выраженное высокое половодье с тремя пиками. Во время зимней межени наблюдается постепенное повышение расходов воды с начала октября до середины ноября, после чего происходит резкое увеличение расходов воды. Для летней межени характерно постепенное убывание расходов воды от окончания весеннего половодья до начала июля. Примерно в середине июля на всех постах отмечается довольно мощный летний паводок — расход воды увеличивается на 3–8 м³/с.

Ко *второму типу* относится только створ Екатериновка, расположенный на р. Свяга (см. рис. 2). На этом створе отражаются все признаки восточно-европейского типа рек по классификации Б.Д. Зайкова: маловодные зимняя и летняя межени, ярко выраженное весеннее половодье и один летний паводок. Это может быть вызвано трансформирующим влиянием мелового карста на сток воды именно в районе этого створа. Присутствие закарстованных пород подтверждается также наличием больших глубоких ям (до 6–8 м) в русле реки на данном участке, обнаруженных по результатам геофизического профилирования [12], а также выявленных западин и мочажин явно карстового происхождения на поверхности ее террасы.

Створ второго типа на р. Свяга в сравнении с другими створами, установленными на этой реке, имеет средний по площади водосбор. Объем годового стока в данном створе реки на 7% ниже, чем у вышележащего поста Чириково.

В *третий тип* объединены створы на ручьях и малой р. Ташелка (см. рис. 2). Главными их особенностями являются достаточно мощный и очень продолжительный подъем воды (с середины сентября до начала января), однопиковое половодье, по мощности сравнимое с осенне-зимним паводком. Летом отмечаются 2–3 паводка. Створы этого типа имеют самые малые водосборы из всех изученных.

Карст как фактор формирования стока воды. Вследствие гидроклиматических изменений за последнее столетие значительно трансформировалось внутригодовое распределение стока в пределах исследуемой территории. Установлено значительное снижение максимальных расходов половодья и увеличение водности меженного периода (более чем вдвое). Для поста на р. Свяга — Вырыпаевка, среднемесячные расходы февраля

в 1960-е гг. составляли 3.82 м³/с, в 1980-е гг.³ — 3.94 м³/с, в последнее десятилетие⁴ же составляют 7.18 м³. Средние расходы за ноябрь за аналогичные периоды составляют 3.72, 5.02 и 8.63 м³/с соответственно. С учетом того, что доля дождевого питания для Свяги в целом невелика, можно говорить об увеличении базисного (подземного) стока, что приводит к более ярким проявлениям его аномалий. Меженный период 2018–2019 гг., во время которого проводились измерения, характеризовался повышенной водностью по сравнению с предшествующими годами.

Результаты исследований свидетельствуют о сложной структуре формирования стока воды на водосборе верхней Свяги, что выражается в неравномерности распределения стока воды по длине основной реки и в целом по бассейну.

Измеренные расходы воды говорят о наличии на участке значительной аномалии, выражающейся в том, что на этом участке р. Свяга между селами Порецкое, Спешневка и Екатериновка в зимний меженный период 2019 г. происходило аномальное снижение расходов воды вниз по течению. Тогда как по результатам измерений в ноябре 2018 г. расходы, наблюдавшиеся в створах Спешневка и Екатериновка, меньше, чем расход воды выше по течению (в створе Порецкое).

На сток воды в пределах верхнего течения Свяги оказывают трансформирующее влияние проявления мелового карста. Этот факт подтверждается наличием глубоких ям (до 6–8 м) в русле р. Свяга на исследуемом участке реки, выявленных по результатам построения продольного профиля реки по точкам максимальных глубин, а также существованием западин и мочажин явно карстового происхождения на террасах реки в районе водомерного створа на р. Чамбул.

В результате исследований установлено, что междуречье рек Свяга, Чамбул и Ташелка отличается от остальных створов по внутригодовому распределению стока воды в течение года — если на остальных реках сток в феврале уменьшился по сравнению с ноябрем, то на этих двух реках вырос. Локальные неравномерности подземного стока являются дополнительным свидетельством значительного влияния карстовых процессов и особенностей залегания меловых закарстованных пород на гидрологический режим.

Результаты проведенных исследований подтверждают наличие на участке между впадением

³ По данным справочника «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Сев.-Зап. территор. упр. по гидрометеорологии и контролю природной среды. Ленинград: Гидрометеоздат, за период 1953–2018 гг.

⁴ База данных Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных

р. Чамбул и створом Спешневка на р. Свияга зоны транзита стока воды, где ее часть уходит на наполнение подземных горизонтов с темпами, значительно превышающими естественные скорости подрусовой фильтрации. Ниже по течению, где Свияга врезается в более древние и плотные горизонты мезозойских пород, происходят разгрузка данной воды и межбассейновый переток с водосборов, находящихся на волжском склоне.

Факторы, влияющие на внутригодовое распределение стока воды. В результате исследования выявлены факторы, оказывающие ведущее воздействие на условия формирования стока воды исследуемых рек. К таковым относятся: климатические особенности территории (внутригодовой ход температуры воздуха и распределение осадков, а также связанные с ними особенности ледового режима, мощности снежного покрова и запасов воды в нем) и гидрогеологические особенности строения территории. Также существенное влияние оказывают размер реки, ее порядок, а также площадь ее бассейна. К локальным особенностям условий формирования стока воды следует отнести закарстованность речных бассейнов, величина которой в бассейнах малых рек может достигать 60%. Антропогенная деятельность представлена слабо в бассейнах всех исследуемых рек и не оказывает существенного влияния на формирование и внутригодовое распределение стока воды. Заболоченность и озерность исследуемой территории равна 0.

ВЫВОДЫ

Для исследований водного режима малых рек бассейна р. Свияга использованы различные методики, подходы и программные средства.

Важной составляющей примененной в данном исследовании методики явилось использование перспективного программного комплекса с алгоритмом автоматического расчленения гидрографа GrWat для упрощения обработки большого объема данных, в результате его применения была сформирована сводная таблица характеристик.

Результатом всех проведенных исследований метеорологических и гидрологических характеристик является ряд выводов.

Установлено, что водный режим рек претерпел значительные изменения ввиду потепления климата. Доля стока половодья в общем годовом стоке исследуемых территорий заметно падает, а доля дождевых и оттепельных паводков растет.

Установлено, что по условиям формирования речного стока исследуемая территория является аномальной. Основной причиной данной аномалии являются ландшафтные характеристики водосбора. Традиционно считается, что с увеличением его площади неравномерность

формирования стока между отдельными подбассейнами приводит к сглаживанию средних значений. В частности, модули стока на бассейнах притоков в нижней части территории (реки Гуца, Ташелка) превышают модуль стока основной реки. Для притоков верхней части (р. Чамбул) наблюдается обратная ситуация. На самых малых водотоках (с площадью водосбора менее 100 км²) модуль стока практически не меняется во время всего межлетнего периода.

Измерения расходов и сопоставление модулей стока говорят о наличии на участке значительной аномалии, выражающейся в том, что на участке р. Свияга между селами Порецкое, Спешневка и Екатериновка в межлетний период происходит аномальное снижение расходов воды и модулей стока вниз по течению.

По результатам исследований можно выделить несколько закономерностей:

- в верхней части водосборного бассейна Свияги (створ Чириково) отмечаются повышенные модули стока для межприточных пространств;
- на транзитном участке, выявленном измерениями расходов, наблюдается уменьшение модуля стока вплоть до отрицательных значений, что может свидетельствовать о возникновении обратной гидравлической связи между рекой и подземными горизонтами на данном участке. Ниже по течению (до створа Спешневка) модуль межприточного стока увеличился, но по-прежнему остался ниже среднего;
- значительное увеличение модулей межприточного (подземного) притока наблюдается на р. Свияга, ниже створа Спешневка.

Приведенные результаты измерений дополнительно подтверждают наблюдаемое на участке между впадением р. Чамбул в Свиягу и створом Спешневка наличие зоны транзита стока, где часть речной воды уходит на наполнение подземных горизонтов с темпами, значительно превышающими естественные скорости подрусовой фильтрации. Ниже по течению, где Свияга врезается в более древние и плотные горизонты мезозойских пород, происходят разгрузка данной воды, а также межбассейновый переток с водосборов, находящихся на волжском склоне.

Установлено, что влияние закарстованных массивов на формирование стока увеличивается при уменьшении величины зонального стока и особенно велико для рек с площадью водосбора до 250 км². С увеличением площади водосбора степень их влияния на сток уменьшается. На основании анализа многолетних данных на гидрологическом посту р. Свияга – Вырыпаевка установлено, что площадь речного бассейна, при которой влияние карста на сток становится неощутимым, превышает 3000 км².

Таблица 1. Изменения генетических составляющих стока в фоновых бассейнах и бассейне Свяги за период 1975–2019 гг.

| Показатель | Фоновые бассейны, % | Бассейн р. Свяга, % |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Среднегодовой модуль стока | +45 | +90 |
| Минимальный летний модуль стока | +100 | +250 |
| Минимальный зимний модуль стока | +100 | +200 |
| Максимальный модуль стока | +75 | +75 |
| Модуль стока для половодья | –30 | –45 |
| Модуль стока для паводков | –30 | –60 |

Установлена трансформация речного стока в условиях закарстованности бассейна. В качестве фоновых значений взяты данные о расходах воды, модулях и слоях стока соседних речных бассейнов – левобережье и правобережье р. Волга. Общие многолетние закономерности изменения генетических составляющих стока за период 1975–2019 гг. для закарстованных участков бассейна Свяги такие же, как и для фоновых бассейнов (табл. 1), однако они отличаются более резкими изменениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игнина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // *Вода: химия и экология*. 2013. № 4. С. 3–12.
2. Балков В.А. Влияние карста на водный баланс и сток // *Уч. Зап. Пермского гос. ун-та им. А.М. Горького. Гидрология и метеорология*. 1969. Вып. 4. Пермь: [б. и.], 112 с.
3. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. и др. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги // *Метеорология и гидрология*. 2014. №3. С. 75–85.
4. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне р. Волги // *Водное хозяйство России*. 2014. №3. С. 83–99.
5. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*. М.: Планета, 2012. С. 53–85.
6. Дедков А.П. Экзогенное рельефообразование в Казанско-Ульяновском Поволжье. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1970. 215 с.
7. Демьянов В.И., Кравцов С.И., Жукова Г.А. и др. Геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия р. Свяги в пределах листов N-39-49-A, B, Г, N-39-61-A, Б (результаты съемки м-ба 1 : 50 000 в 1975–78 гг. для целей мелиорации). Т. I–VII. Средне-Волжский филиал ТГФ ЦРГЦ, 1978.
8. Жук В.А., Бовыкин И.В., Романова Е.А. и др. Условия формирования и изменчивость годового стока рек бассейна Волги // *Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда*. Т. 6. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 420–429.
9. Киреева М.Б., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л. Изучение современного водного режима рек европейской территории России с помощью автоматизированного алгоритма расчленения гидрографа GrWat // *Сб. докл. междунар. научной конф. “Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения”*. Нижний Новгород. 2019. С. 160–165. [электронное изд. URL: <https://conf.iwr.ru/book/>]
10. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Московского университета, 1966. 312 с.
11. Милановский Е.В. Очерк геологии Среднего и Нижнего Поволжья. М.: Гостопиздат, 1972. 178 с.
12. Сельникова Н.В., Филиппов Б.С. Геологическое строение среднего течения р. Свяги. М.: Гостопиздат, 1956. 275 с.
13. Сеньков В.М. Геологическое строение Ульяновско-Саратовской синеклизы. М.–Л.: Гостопиздат, 1947. 178 с.
14. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А. и др. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2015. № 4. С. 4–20.

WATER REGIME SPECIFICS IN THE UPPER SVIYAGA RIVER AND ITS TRIBUTARIES UPON KARST DEVELOPMENT

I. A. Zhukov^{a,#}, D. N. Aybulatov^{a,##}

^a Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

[#] E-mail: les-96@yandex.ru

^{##} E-mail: gidroden@mail.ru

At present, the hydrological characteristics of small rivers are understudied in Russia. Taking into account the increasing deterioration of the ecological state of surface watercourses, which primarily affects the intra-annual distribution of water runoff on small and medium-sized rivers, in particular, the study of runoff

formation, its variability and intra-annual changes become the most important task of hydrology. The paper considers changes in the indicators of intra-annual distribution of river flow in the upper reaches of the Sviyaga River in the almost complete absence of knowledge of changes in the flow of small and medium-sized rivers in the study area. It was necessary to identify what changes the water runoff from small and medium-sized rivers undergoes in the upper reaches of the Sviyaga River, which is complicated by the occurrence of karst. The paper presents an analysis of the intra-annual distribution of water runoff, and natural factors that have the maximum effect on the intra-annual distribution of water runoff for rivers in the study area, as well as its assessment against the background of climate change. The identified types of water regime are described. Based on the research results, a typification of rivers is proposed according to the annual water flow and zoning of cross-sections by river types. The intra-annual distribution of water levels and discharges are analyzed, the factors influencing them are assessed, and the most significant of them are identified.

Keywords: karst, river flow, intra-annual distribution of water run-off, small rivers, loggers, GrWat 3.0.M complex

REFERENCES

1. Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. [Evaluation of the climate change impact on water regime and stock of the Volga River basin]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2013, no. 4, pp. 3–12. (in Russian)
2. Balkov V.A. [The influence of karst on water balance and runoff]. *Uch. Zap. Permskogo gos. un-ta. Gidrologiya i meteorologiya*, Perm, 1969, issue 4, 112 p. (in Russian)
3. Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. [Modern changes in the minimum flow of rivers in the Volga River basin]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, no. 3, pp. 75–85. (in Russian)
4. Bolgov M.V., Trubetskova M.D., Filimonova, M.K., Filippova I.A. [Modern changes in climatic characteristics and probabilistic assessment of changes in the minimum flow in the Volga River basin]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2014, no. 3, pp. 83–99. (in Russian)
5. Georgievskii V.Yu., Shalygin A.L. [Hydrological regime and water resources]. In: [Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems]. Moscow, Planeta Publ., 2012, pp. 53–85. (in Russian)
6. Dedkov, A.P. [Exogenous relief formation in the Kazan-Ulyanovsk Volga region]. Kazan, Kazan University Publ., 1970, 215 p. (in Russian)
7. Demyanov V.I., Kravtsov S.I., Zhukova G.A. et al. [Geological, hydrogeological and engineering geological conditions of the Sviyaga River within sheets N-39-49-A, B, D, N-39-61-A, B (survey results to scale 1 : 50,000 in 1975–1978 for reclamation purposes)]. Vol. I–VII. Middle Volga branch of TGF CRGC, 1978. (in Russian)
8. Zhuk V.A., Bovykin I.V., Romanova E.A., Skorniyakov V.A., Frolova N.L. [Formation conditions and variability of the annual runoff of rivers in the Volga basin]. In [Proc. of the 5th All-Union Hydrological Congress], vol. 6, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, pp. 420–429. (in Russian)
9. Kireeva M.B., Retz E.P., Samsonov T.E., Frolova N.L. [Study of the modern water regime of rivers in the European territory of Russia using an automated algorithm for dividing the GrWat hydrograph]. In: [Proc. Intern. Sci. Conf. “Scientific problems in improving Russian rivers and ways to their solution”]. Nizhny Novgorod, September 8–14, 2019, pp. 160–165. [https://conf.iwp.ru/book/] (in Russian)
10. Kudelin B.I. [Principles of regional assessment of natural groundwater resources]. Moscow, Moscow University Publ., 1966, 312 p. (in Russian)
11. Milanovskii E.V. [Essay on the geology of the Middle and Lower Volga region]. Moscow, Gostopizdat Publ., 1972, 178 p. (in Russian)
12. Sel'nikova N.V., Filippov B.S. [Geological structure of the middle course of the Sviyaga River]. Moscow, Gostopizdat Publ., 1956, 275 p. (in Russian)
13. Senyukov V.M. [Geological structure of the Ulyanovsk-Saratov syncline]. Moscow–Leningrad, Gostopizdat Publ., 1947, 178 p. (in Russian)
14. Frolova N. L., Kireeva M. B., Agafonova S. A., Evstigneev V. M., et al. [Intra-annual distribution of the flow of lowland rivers in the European territory of Russia and its changes]. *Vodnye khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2015, no. 4, pp. 4–20. (in Russian)