

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.16.06

ПРОГНОЗ ПРИТОКА ВОДЫ К ЦИМЛЯНСКОМУ ВОДОХРАНИЛИЩУ В ПЕРИОД ПОЛОВОДЬЯ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ: ПРОБЛЕМЫ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ¹

© 2020 г. Н. А. Варенцова^{a, b, *}, М. Б. Киреева^a, Н. Л. Фролова^a,
М. А. Харламов^{a, c}, В. П. Илич^a, А. А. Сазонов^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

^bЦентральное УГМС, Москва, 127055 Россия

^cИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: efrnatalie@gmail.com

Поступила в редакцию 20.02.2020 г.

После доработки 25.05.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Исследования водного баланса и изменений водного режима рек бассейна р. Дон показали, что с середины 1980-х гг. наметился устойчивый тренд снижения объемов весеннего половодья и роста объема стока в зимний период. За счет учащения оттепелей процессы формирования талого стока наблюдаются в течение практически всего зимнего периода. Уменьшение влажности почвы для последней декады октября и уменьшение максимальной глубины промерзания для большей части бассейна увеличивает потери при стаивании снега во время оттепелей и при начале половодья. На фоне значительного сокращения водного эквивалента снежного покрова и значительного роста потерь нередко наблюдаются ситуации, когда половодье практически полностью отсутствует. Таким образом, в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки надежность составленных в XX в. зависимостей для прогноза весеннего притока к Цимлянскому водохранилищу утрачивается.

Ключевые слова: половодье, прогноз стока, климатические изменения, формирование стока.

DOI: 10.31857/S0321059620060152

ВВЕДЕНИЕ

Сложность весенних стокоформирующих процессов определяется их распространением на обширных территориях в условиях неоднородности и многообразия физико-географической среды, а также неравномерностью во времени [4].

Вопрос о необходимости развития методической базы гидрологических прогнозов весеннего стока рек поставлен еще А.И. Воейковым в начале 1900-х гг., однако начало реализации задачи пришлось лишь на 1920–1930-е гг. [1]. Разработанные в те годы зависимости задали главное на-

правление развития гидрологических прогнозов. Вплоть до настоящего времени в оперативной практике Росгидромета долгосрочные прогнозы характеристик весеннего половодья выпускаются на основе соотношений между прогнозируемой величиной и набором показателей, характеризующих состояние водосбора до начала снеготаяния и перед началом снеготаяния.

Для рек бассейна Дона велось активное изучение факторов формирования стока [2] половодья. Одна из первых методик прогноза притока воды за период весеннего половодья к Цимлянскому водохранилищу реализована на основе прогноза стока 12-ти малых и трех крупных водосборов [8]: рек Дон у ст. Казанской, Хопер у х. Бесплемянского и Медведицы у ст. Арчединской, а также оставшейся боковой приточности выше г. Калач. В методике принято, что глубина промерзания почвы не влияет на потери стока. Поэтому в основу прогноза положены нелинейные зависимости весеннего стока от запасов воды и показателя осеннего увлажнения.

¹ Работа выполнена в рамках Государственного контракта (договор № 78/2-НИР/ФЦП-2018 на выполнение научно-исследовательских работ между МГУ им. М.В. Ломоносова и ФНЦ Агроэкологии РАН в рамках ФЦП “Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах” по теме “Долгосрочный прогноз изменения водных ресурсов для целей обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса бассейна реки Дон”). Методические подходы и алгоритмы, использованные в данной работе, разрабатываются при финансовой поддержке РНФ (проект 19-77-10032).

Альтернатива этой методике – работы Л.К. Вершининой [2, 3], где слой стока половодья для р. Дон у ст. Казанской прогнозируется на основе стока с трех типичных водосборов – рек Сосны, Битюг и Тихая Сосна. Прогноз для р. Битюг строился на основе зависимости потерь талого стока от разницы фактического увлажнения и величины наименьшей влагоемкости для лет с большим (>60 см) и небольшим промерзанием почвы. А сток р. Сосны прогнозировался на основе фактической измеренной влажности почвы.

Подход с использованием малых водосборов для прогнозирования стока с обширной территории сохранился и в следующей работе – в прогнозе притока воды в половодье к Цимлянскому водохранилищу [2]. В этой работе приток воды в период весеннего половодья прогнозировался на основе прогнозов по четырем частным бассейнам: р. Сосна – г. Елец, р. Тихая Сосна – ст. Алексеевка, р. Битюг – г. Бобров, р. Медведица – пгт Лысье Горы. Для каждого из них поверхностный сток определяется по формуле

$$Y = (S + X) - P_0 \text{th} \frac{S + X}{P_0}, \quad (1)$$

где Y – слой стока в замыкающем створе; $(S + X)$ – сумма максимального запаса воды в снеге и осадков за период от даты их наступления до даты через 5–10 дней после схода снежного покрова; P_0 – параметр потерь талых вод, зависящий от условий водопроницаемости грунтов. Дополнительно вводилась поправка на приток с грунтовыми водами, равная 4 мм.

В [2, 3] впервые для прогнозирования использовались малые водосборы, территории которых охватывают <13% площади водосбора замыкающего створа. Также впервые отмечена главенствующая роль глубины промерзания для всех водосборов, за исключением р. Медведицы, где значимым фактором была влажность почв. Примечательно, что для рек Сосны, Тихая Сосна и Битюг применялась измеренная влажность почвы, а для р. Медведицы – косвенные показатели, определяемые по разнице осадков и испарения в теплый период года, суммируемые с осадками в холодный период за вычетом паводочного стока в период оттепелей. Паводки в методике Вершининой исключались как незначимые и вносящие дополнительную погрешность. Запас воды в снежном покрове определялся по картам на 28 февраля с дополнением данных о ледяной корке от 20 февраля. Присутствовал в методике и трудноопределяемый параметр – сумма осадков за половодье.

На основе методики Вершининой реализованы 2 расчетные схемы. Первая подразумевает использование интегрального уравнения стока По-

пова. При этом параметр потерь талого стока определяется по единой территориально общей зависимости параметра потерь от глубины промерзания для рек Сосны, Тихая Сосна и Битюг [2]. Вторая схема расчета Вершининой основана на использовании линейного уравнения множественной регрессии, где переменные – сумма запасов воды в снеге и осадков на период половодья, глубина промерзания почвы и запас влаги в метровом слое почвы. При этом все глубины промерзания >60 см приравнивались к 60 см, а для влажности почв аналогичные поправки вводились при значении 300 мм.

В целом для створа р. Дон – х. Беляевский (расчетный створ притока к Цимлянскому водохранилищу) оценка стока половодья ведется по уравнению:

$$Y_D = 0.12Y_C + 0.17Y_T + 0.33Y_B + 0.20Y_M + 6.0, \quad (2)$$

где Y_D – слой стока р. Дон у х. Беляевского; Y_C , Y_T , Y_B , Y_M – слои стока рек Сосны, Тихая Сосна, Битюг и Медведицы соответственно. Номограммы и уравнения Вершининой применяются в оперативном прогнозировании в системе Росгидромета по сей день.

Исследования водного режима рек бассейна Дона показали, что с середины 1980-х гг. наметился устойчивый тренд снижения объемов весеннего половодья и роста стока в зимний период. За счет зимних оттепелей увеличилась частота зимних паводков с сопутствующей ей водоотдачей, инфильтрацией талых и пополнением грунтовых вод. Таким образом, происходят “перехват” талого стока оттепельными паводками и повышение водности межженных периодов. Уменьшение осенней влажности почвы и глубины промерзания увеличивает расходную составляющую при стаивании снега во время оттепелей и в начале половодья. На фоне значительного сокращения водного эквивалента снежного покрова и значительного роста потерь нередко наблюдаются ситуации, когда половодье практически полностью отсутствует [5, 6]. Таким образом, в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки надежность составленных в XX в. карт и зависимостей утрачивается.

Цель данной работы – оценка современных возможностей прогнозирования притока к Цимлянскому водохранилищу в весенний период на основе имеющихся методик и подходов и разработка научно-обоснованных рекомендаций по повышению оправданности и заблаговременности прогнозов. Основные задачи, направленные на достижение главной цели, – анализ имеющихся методик прогнозирования весеннего половодья, создание информационной базы гидрологических и метеорологических характеристик,

определение степени надежности предложенной схемы в условиях меняющегося климата и антропогенной нагрузки, а также определение возможностей ее совершенствования.

В современных условиях климатических и антропогенных изменений основные недостатки всех вышеупомянутых методик — работа в следующих предположениях, которые могут привнести значительную погрешность:

определенные на начало зимы влагозапасы в почве соответствуют максимальным;

отток влаги из верхних слоев почвы вглубь зимой отсутствует;

влагозапас в почвах на конец половодья постоянен.

МЕТОДЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе методика Вершининой [2] применена для актуальных гидрометеорологических данных для оценки возможности прогноза притока воды в весеннее половодье к Цимлянскому водохранилищу. Для этого по второй схеме максимально точно воспроизведены расчеты всех показателей практически без изменений.

Многолетние данные Государственного водного кадастра и соответствующих выпусков гидрологических ежегодников использованы для определения характеристик весеннего половодья р. Дон и ее притоков.

Использованы данные метеорологических станций (МС) в Донском бассейне и реанализа ERA-Interim. Влажность почв определялась по натурным измерениям и по модели GLEAM [15]. Запасы воды в снежном покрове определены по результатам снегосъемок Росгидромета.

Расчет частных показателей, используемых в расчетной схеме, потребовал сбора различных наземных и дистанционных данных.

Глубина промерзания за третью декаду февраля определялась по открытым данным [9] о температуре почвы за период 1963—2013 гг. с применением скрипта на языке R, определявшего глубину нулевой изотермы. Всего в работе использованы данные по 12-ти МС.

Влажность почвы. Из-за отсутствия данных непосредственных измерений влажности почвы в зимний период принято решение использовать косвенный показатель. Для определения используемых для его расчета метеорологических величин взяты данные МС Анна, Ливны, Аткарск и Валуйки. За исключением МС Валуйки, все станции расположены в центре расчетных водосборов. Суточные данные [13] использованы для оценки показателя отклонения влажности почвы

от нормы в конце июля. Величина испарения определена по методу А.Р. Константинова.

Запас воды в снежном покрове на выбранных речных водосборах определен по открытым данным 16-ти МС [9] методом пространственной интерполяции. В оригинальной версии методики для прогноза половодья определялась высота снежного покрова на 28 февраля. Вследствие изменения климата даты прохождения максимальных расходов воды сместились на самое начало марта, а максимальных снегозапасов — на первую декаду февраля, что и определило срок расчета значений запаса воды в снеге. Влагосодержанием в ледяной корке было пренебрежено по причине большого числа пропусков.

Атмосферные осадки от даты максимального запаса воды в снеге до даты схода покрова + 10 сут. В методике Вершининой предлагается использовать норму осадков за период с 28 февраля до 10-го дня после схода снежного покрова (для р. Тихая Сосна — 5). В то же время при формировании половодья значительную роль играют осадки, что приводит к необходимости значительных уточнений основного прогноза. Для оценки роли осадков рассчитано их количество за период с 10 февраля по дату, которая наступает через 10 дней после схода снега (5 дней для Тихой Сосны).

В связи с ограниченностью открытых гидрометеорологических данных все характеристики определены за период 1966—2013 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проверка методики Вершининой на современных данных

Современные изменения климата и хозяйственная деятельность на водосборах вносят значительные изменения в формирование стока. Например, самое высокое значение коэффициента парной корреляции R между максимальными запасами воды в снежном покрове для диапазона с 5 января по 28 февраля и стоком половодья за последние 40 лет составляет 0.28 (р. Битюг), но незначим при $p = 0.05$. В пределах бассейнов Сосны, Тихой Сосны и Медведицы накопленный максимальный за зиму запас воды в снежном покрове не влияет на слой стока половодья (R составляет 0.12, 0.14 и -0.02).

В бассейне р. Битюг связь между слоем весеннего стока и глубиной промерзания отсутствует. Обратная ситуация характерна для глубины промерзания для Сосны, Тихой Сосны и Медведицы (R составляет 0.32—0.52). Одновременно существенную роль начинают играть осадки за период половодья: для рек Медведицы и Тихая Сосна R

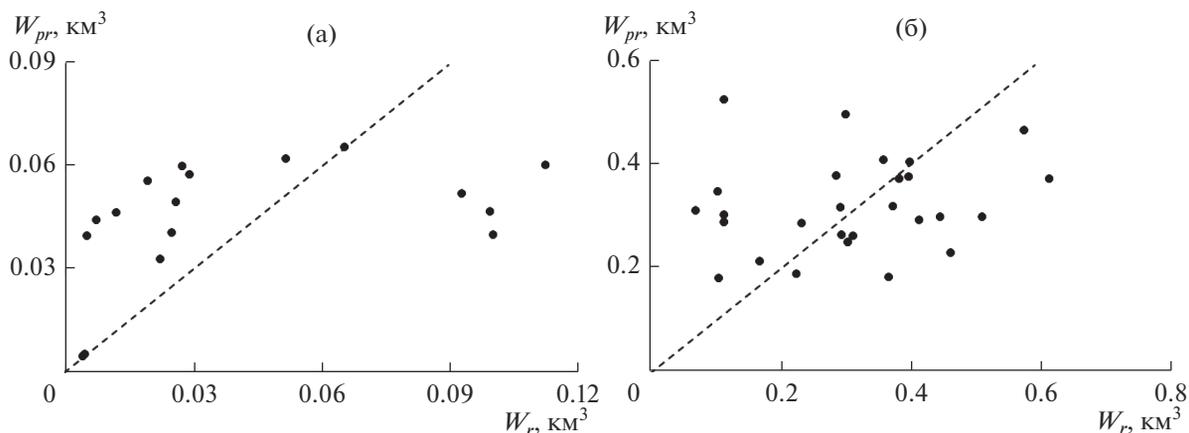


Рис. 1. Связь фактических W_r и спрогнозированных W_{pr} объемов половодья при учете суммы осадков за половодье для рек Сосны (а), Битюг (б). Оценка проведена методом Гьюкки.

составляет 0.31–0.37, для р. Битюг – до 0.52, а для р. Сосны – до 0.61.

Эти изменения не могли не сказаться на регрессионных коэффициентах, допустимой погрешности прогноза и устойчивости уравнений в целом. По оценкам авторов, использование в качестве предикторов показателей запасов воды в снежном покрове за первую декаду февраля, осадков за период с 10 февраля до даты схода снежного покрова (+10 дней), глубины промерзания почвы на III декаду февраля и косвенного показателя влажности почвы ведет к получению ненадежных уравнений (рис. 1).

Как видно на рис. 1, качество полученной методики для р. Дон у х. Беляевского неудовлетворительное: $S/\sigma = 1.5$ (S – средняя квадратическая ошибка проверочных прогнозов; σ – среднее квадратическое отклонение предсказываемой величины), оправдываемость $P = 56\%$; тогда как в исходной работе [2] приведены следующие значения точности: $S/\sigma = 0.36$, $P = 100\%$. Как видно, результаты, полученные на современных данных, на порядок ниже декларируемых.

Важно то, что сопоставление фактических величин слоя стока половодья в створе р. Дон – х. Беляевский и на опорных водосборах дает хороший коэффициент множественной корреляции MR . Однако уравнение существенно отличается от уравнения Вершининой (рис. 2):

$$Y_D = 0.17Y_C + 0.05Y_T + 0.47Y_B + 0.22Y_M + 7.8. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции расчетных и фактических величин стока половодья для створа р. Дон – х. Беляевский составляет 0.91. Таким образом, выбранные бассейны репрезентативны и сейчас, но прогнозные схемы, в особенности для

рек Медведицы и Битюг, не могут быть реализованы в начальном виде.

Пути совершенствования методики прогноза

Высокая теснота связи фактических объемов половодья р. Дон у х. Беляевского со стоком с репрезентативных водосборов Вершининой говорит о возможности дальнейшего совершенствования методики. Потенциальные направления модернизации можно разделить на технические и методические. К техническим относятся следующие:

- повышение качества входных данных за счет альтернативных источников информации и их обработки; например, использование данных модели GLEAM [15] или спутниковых данных для оценки динамики схода снежного покрова;

- автоматизация расчета испарения, что позволит определять суточные величины испарения, а не средние с августа по октябрь;

- применение в программах расчета номограмм также позволит использовать первую расчетную схему [2];

- автоматизация расчленения гидрографа по типам питания с последующим учетом и прогнозом каждой из компонент.

Методическая модернизация, по мнению авторов, включает в себя целый набор направлений, связанных с детальным изучением каждого гидрометеорологического параметра, участвующего в работе, и формируемых ими взаимосвязей.

Во-первых, анализу подлежат данные по стоку половодья и их скоррелированность. Изменения стока, которые привели к деградации половодья, описаны уже неоднократно [5, 6]. Однако прак-

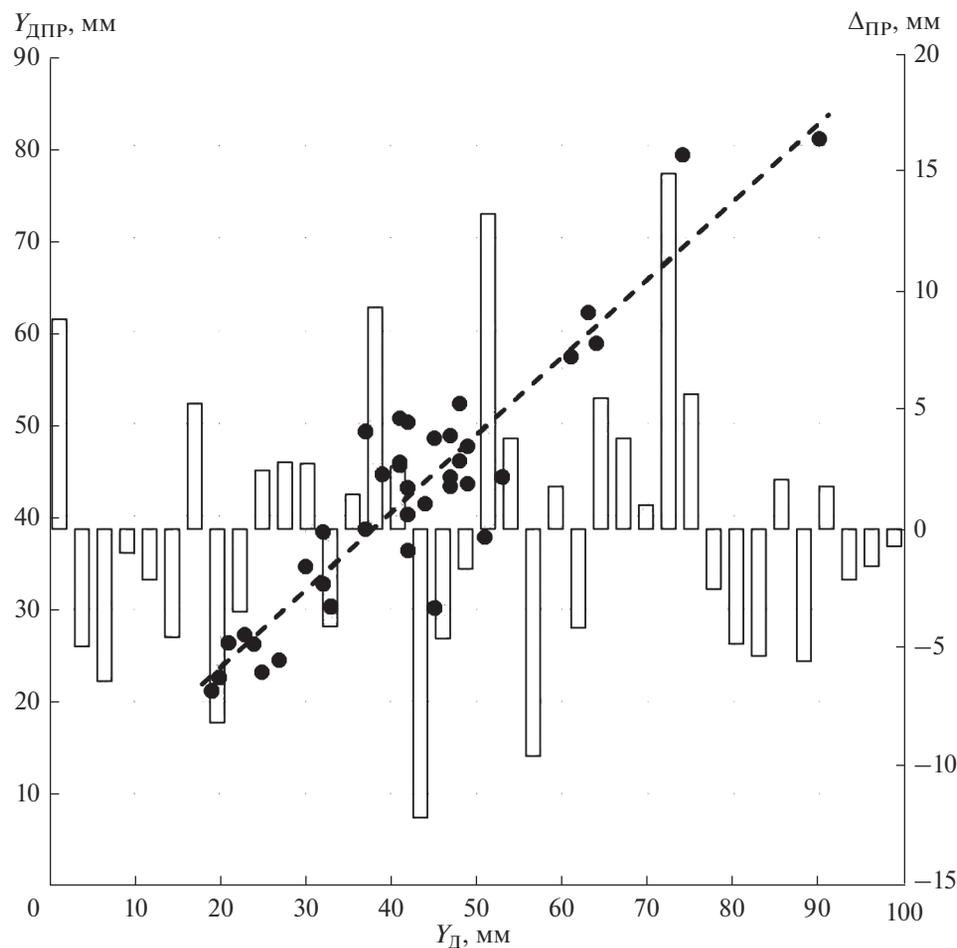


Рис. 2. Связь фактических Y_D и спрогнозированных по уравнению (3) $Y_{DПР}$ объемов половодья и ошибок полученной зависимости $\Delta_{ПР}$ для р. Дон – х. Беляевский.

тически нигде не указывается синхронность и синфазность этих изменений. На примере водосборов, выбранных Л.К. Вершининой для прогноза слоя весеннего стока р. Дон у х. Беляевского (Y_D), прослеживается снижение тесноты множественной корреляции MR и увеличение среднеквадратического отклонения σ . Так, уравнение (2), построенное для водосборов Сосны (Y_C), Тихой Сосны (Y_T), Битюг (Y_B) и Медведицы (Y_M) за 1951–1975 гг. для слоя стока весеннего половодья, характеризуется коэффициентом $MR = 0.98$ и $\sigma = 5.8$ мм. Все компоненты уравнения, кроме свободного члена, значимы при $p = 0.05$. В то же время для 1980–2017 гг. это же уравнение (3) имеет меньшую тесноту связи ($MR = 0.92$), а σ увеличивается до 6.2 мм. Значимыми при $p = 0.05$ остаются лишь Y_B , Y_M и свободный член уравнения. Исключение из уравнения Y_C и Y_T не приводит к существенному снижению качества ($MR = 0.90$, $\sigma = 6.7$).

Оценка коэффициентов корреляции R слоя стока весеннего половодья р. Дон у х. Беляевского с весенним стоком 52-х водосборов за последние 50 лет диагностирует существенное снижение тесноты связи со стоком малых рек (рис. 3). В последние годы R составляет ≤ 0.5 в бассейнах рек Красивая Меча, Лесной Воронеж, Савала, Бузулук, Иловля, Елауловский Аксай, Северский Донец, Кундрючья и Тузлов. Для подавляющего большинства из них в 1970-е гг. R составлял 0.75–0.85 и больше.

Наоборот, наиболее устойчивыми по значению R оказались связи слоя стока р. Дон у х. Беляевского со стоком притоков, впадающих ниже г. Лиски. Однако σ для них возросло.

Продолжающееся ослабление тесноты связей стока малых водосборов со стоком р. Дон у х. Беляевского ведет к необходимости пересмотра уравнений. Их основу могут составить водосборы бассейна р. Хопер, отличающиеся наибольшей устойчивостью связей.

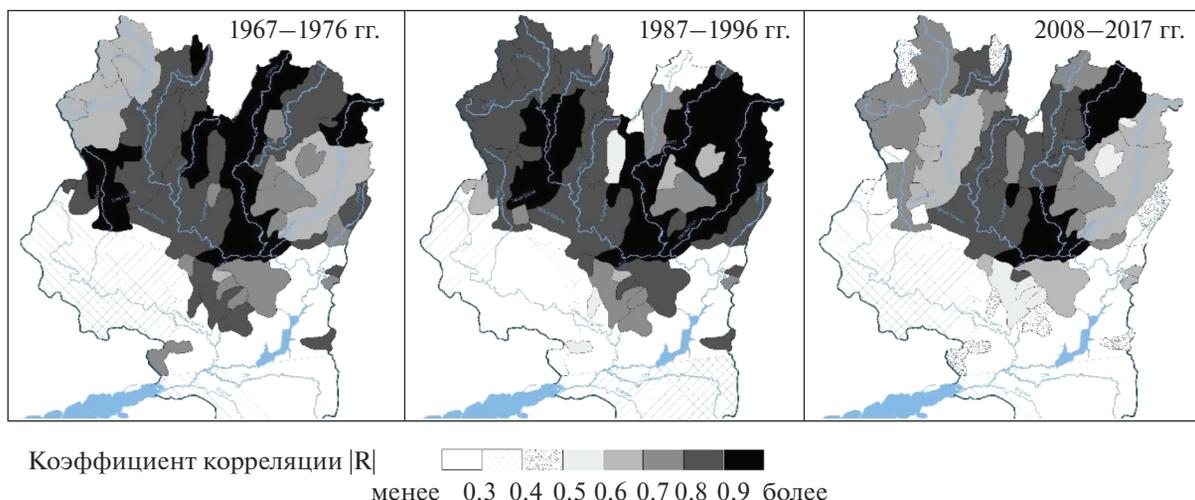


Рис. 3. Изокорреляты слоя стока половодья р. Дон – х. Белевский и частных водосборов.

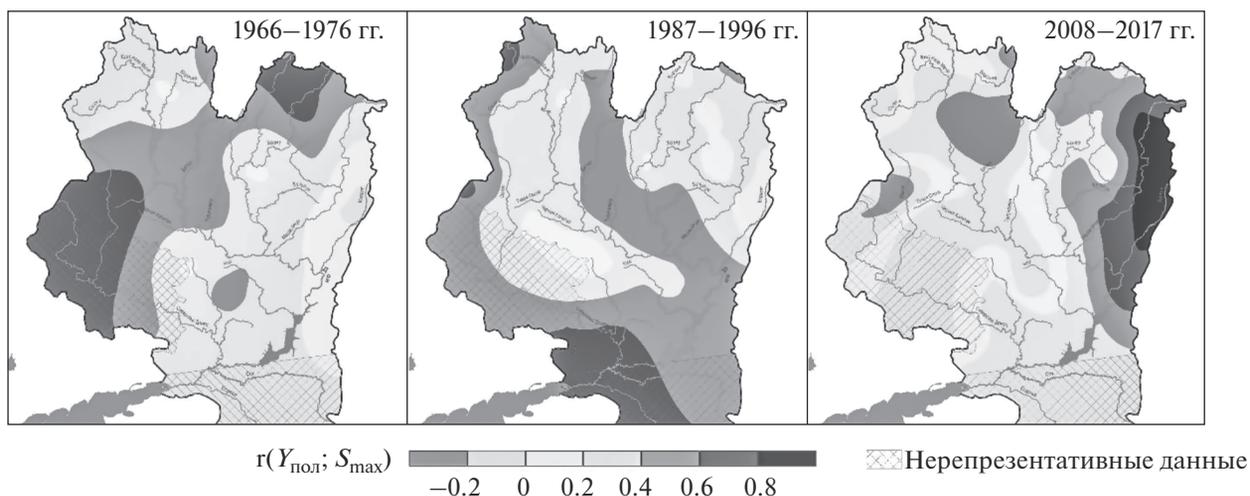


Рис. 4. Пространственное распределение значений коэффициента корреляции между слоем весеннего стока и максимальным запасом воды в снежном покрове.

Однако возможно и повышение качества прогнозирования с учетом переменных, предложенных Л.К. Вершининой. Для этой цели проанализированы их современные стокоформирующие факторы и предложены пути составления частных уравнений.

Запас воды в снежном покрове. Данные наблюдений за стоком с 42-х частных водосборов и данные по снегозапасам по 32-м маршрутам картированы за те же периоды (рис. 4). На рис. 4 видно, что в середине XX в. R имел равномерное пространственное распределение по территории бассейна р. Дон с максимумами в верховьях рек Тихая Сосна, Хопер, Вороны и Оскол. К началу XXI в. область практически незначимой связи запаса воды в снеге и стока охватила приблизительно

но тот же район, а ареал наибольших значений коэффициента корреляции R сместился на восток.

Полученные результаты указывают на необходимость поиска альтернативного предиктора, отвечающего за поступление влаги на водосбор.

Коэффициент стаивания. В [3] для оценки потерь снегозапаса при оттепелях используется коэффициент стаивания k_S , равный $3 \text{ мм}/^\circ\text{C}$. Авторами проведена проверка его надежности на современных данных по пяти снегомерным маршрутам (табл. 1).

Согласно полученным результатам, коэффициент стаивания в лесостепной и степной зонах в оттепель при сумме осадков $0-10 \text{ мм}$ составляет в

Таблица 1. Коэффициент стаивания в период оттепелей для различных МС в бассейне р. Дон (k_S^* – коэффициент стаивания с учетом осадков на период оттепели)

Водосбор	МС	Высота, м БС	k_S^*		
			среднее	минимум	максимум
р. Дон – Епифань	Павелец	209	6.5	5.0	35.6
р. Сосна – Беломестная	Поныри	251	4.9	2.7	16.9
р. Карай – Подгорное	Балашов	159	5.6	2.9	45.9
р. Медведица – Лысые Горы/ Арчединская	Октябрьский городок	201	7.6	3.1	52.6
р. Подгорная – Калач	Калач	92	6.2	1.9	14.8

Таблица 2. Коэффициент корреляции R слоя весеннего стока с измеренной влажностью почвы в верхнем метровом слое на 31 октября

Водосбор	Опорная МС	Период наблюдений, годы	Количество лет с данными	R
р. Сосна – г. Елец	Ливны	1995–2017	17 лет	0.38
р. Битюг – г. Бобров	Совхоз им. Ленина, Анна (среднее)	1995–2017	21 год	0.48
р. Медведица – пгт Лысые Горы	Аткарск	1995–2013	16 лет	0.15

среднем 5–6 мм/°С. Его величина в каждом конкретном случае зависит от погоды, предположительно – от облачности и скорости ветра. При интенсивных осадках во время оттепели коэффициент стаивания, рассчитанный с учетом выпавших за оттепель осадков, k_S^* может повышаться до 15–25 мм/°С, в отдельных случаях – до 40–50 мм/°С. Важно, что сокращение запаса воды в снежном покрове до 19–62 мм происходит и при отрицательной среднесуточной температуре, вероятно, за счет положительной температуры днем, что согласуется с выводами [7].

Предположение о связи k_S и k_S^* с суммой положительных значений температуры за период оттепели также не подтвердилось: теснота связи низкая вне зависимости от учета осадков. Однако значение $k_S = 3$ мм/°С, по [3], в настоящий момент представляется заниженным: величина меняется в очень широких пределах (от 0.5 до 80 (100) мм/°С), а оценка среднего значения довольно затруднительна. Возможно, разброс значений связан с погрешностями методов наблюдений.

Однако для подтверждения необходимости повышения значения коэффициента стаивания как минимум до 5 мм/°С для лесостепной и степ-

ной зон необходима серия экспериментов на водно-балансовых станциях.

Влажность почвы. С целью улучшения качества входной информации предпринята попытка использования двух типов данных: результатов непосредственных измерений и сеточные данные модели GLEAM [11, 15]. Для бассейна Дона по GLEAM рассчитаны влажность почвы в верхнем метровом слое на 31 октября предшествующего половодья года и средняя за 15–28 февраля влажность почвы. Выбор этих показателей обусловлен тем, что массив данных модели GLEAM включает в себя данные непосредственных измерений влажности почвы с помощью пассивного и активного сенсора спутника, функционирующего в рамках проекта ССИ. Одновременно для оценки качества расчетных данных было проведено сравнение их с натурными наблюдениями Росгидромета.

Для водосборов Сосны, Медведицы и Битюга подобраны измеренные значения влажности почвы и определена их связь с объемом половодья (табл. 2, рис. 5). Примечательно, что при исключении из анализа величин стока за 2003 и 2016 гг. для р. Сосны эта связь полностью отсутствует, а исключение 2003, 2007 и 2014 гг. для р. Битюг –

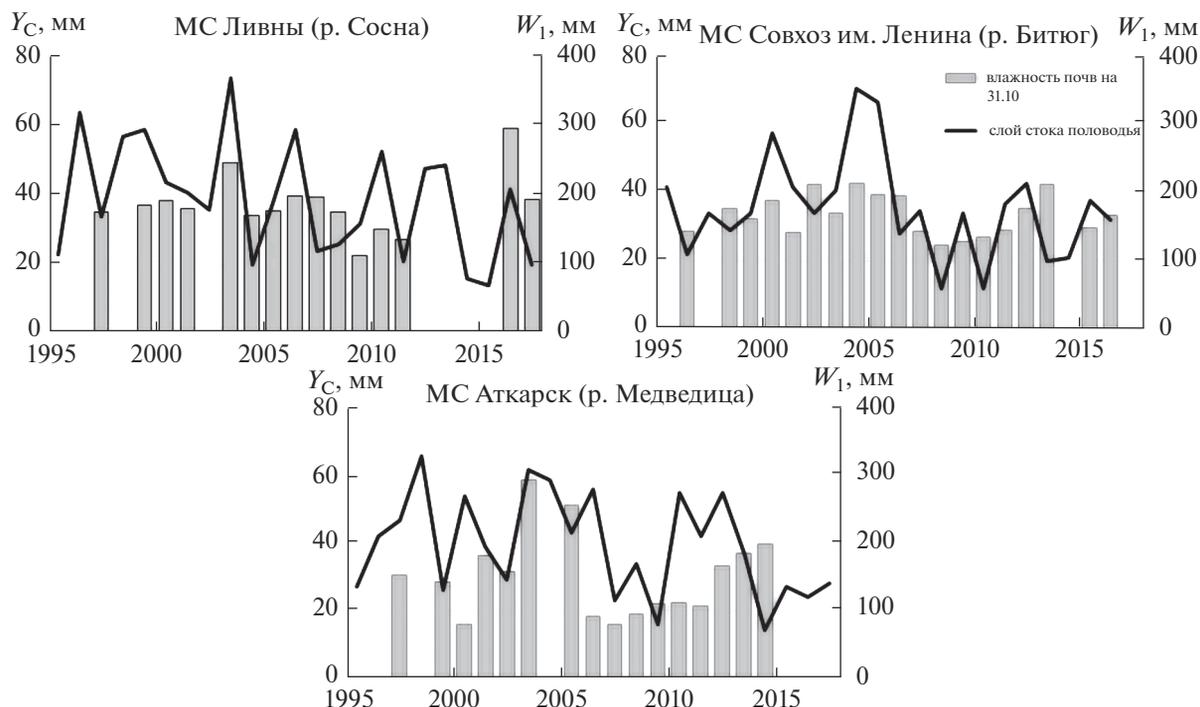


Рис. 5. Динамика слоя стока весеннего половодья Y_C и влажности почвы W_1 (по данным на 31 октября предшествующего года).

повышает R до 0.82. Для р. Медведицы связь практически отсутствует, тогда как в [2] указывается обратное.

Низкая теснота полученных связей, редкие сеть и частота наблюдений, большое число пропусков, неоднородность наблюдений, а также рекомендации практикующих агрометеорологов указывают на актуальность поиска альтернативного показателя впитывающей способности водосбора, например – результатов моделирования GLEAM в сеточном виде.

Для проверки надежности данных GLEAM они сопоставлены с данными станций для всех сроков. Для трех из четырех станций коэффициент парной корреляции составил ≥ 0.7 , это вполне удовлетворительный результат с точки зрения точности пространственно-распределенных данных (рис. 6). Лишь для самой восточной МС Аткарск коэффициент корреляции оказался низким – 0.52. Полученные результаты подтверждают результаты [11] и указывают на допустимость применения значений влажности почвы массива GLEAM в построении прогностических схем.

Дальнейший анализ проведен по модельным данным GLEAM, осредненным для опорных бассейнов Сосны, Тихой Сосны, Битюга и Медведицы. В многолетних данных измерений влажности почвы 31 октября наблюдается слабо отрицательный тренд, незначимый при $p = 0.05$ (рис. 7). В

некоторые годы увлажнение водосборов существенно снижается и оказывается ниже критического значения $W = 300$ мм. Особенно ярко эта тенденция проявилась в маловодье 2007–2013 гг. Для предполоводной влажности (средняя за 15–28 февраля) наблюдается обратная картина: для всех лет превышает критическое значение 300 мм, а для Медведицы характерен наиболее интенсивный статистически значимый рост.

Глубина промерзания. В [2] утверждается, что глубина промерзания L более изменчива по сравнению с влажностью почвы и определяет потери стока Сосны, Тихой Сосны и Битюга. В методике для них предусмотрена территориально общая зависимость слоя весеннего стока от суммарного поступления влаги на водосбор и средней L . Для бассейна Медведицы L исключена из расчета.

Анализ современной динамики максимальной за зиму глубины промерзания L_{\max} показал, что с 1990-х гг. значения L_{\max} в половине случаев меньше критической $L = 60$ см (рис. 8). Если же говорить о средней глубине промерзания за I декаду февраля, то для Медведицы с 1990 г. она была < 60 см в 13-ти из 23-х случаев, для западных водосборов – лишь в семи случаях из 23-х. Таким образом, можно говорить, что в последние 30 лет условия формирования потерь талого стока изменились существенно.

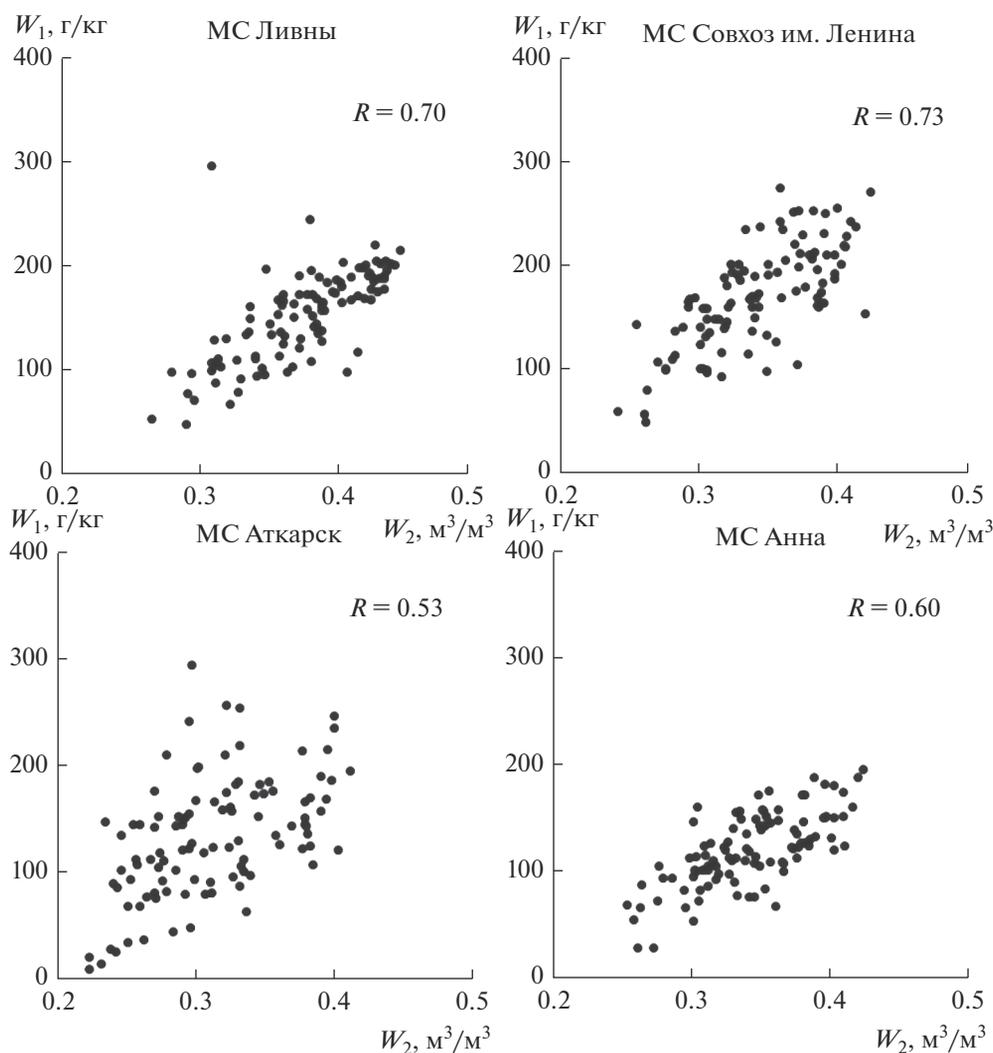


Рис. 6. Сравнение наблюдаемых W_1 и расчетных по данным GLEAM – W_2 значений влажности почвы для МС в пределах опорных водосборов.

Вышеописанные результаты подтверждают предположения о кардинальном изменении значимости некоторых предикторов, сроков и величин. В связи с этим открывается широкое поле для экспериментов с границами расчетных периодов. Авторами статьи предпринят поиск потенциальных предикторов весеннего стока исходя из перехода от фиксированной даты к интервалу, для которого определяется параметр, и с применением различных подходов к выделению половодья. Таким образом, для каждого водосбора предлагается рассчитать матрицу, содержащую в себе 8 предикторов в трех-четырёх вариантах – всего 21 параметр (рис. 9).

За начало и окончание холодного периода приняты даты первого и последнего устойчивого (интервал – 5 дней) перехода температуры возду-

ха через 0°C . За дату установления снежного покрова принят день, начиная с которого в течение четырех последующих дней фиксируется снежный покров, а за дату схода снежного покрова – следующий день после последней пятидневки со снегом. Объем половодья W_{pol} рассчитывался двумя способами: автоматическим расчленением гидрографа с помощью алгоритма GrWat [16, 17] (W_{pol1} , W_{pol2} , W_{pol3}) и экспертным способом (W_{pol}).

Для каждого из опорных водосборов определены коэффициенты корреляции с потенциальными предикторами и предприняты попытки описания через регрессионное уравнение процесса формирования весеннего стока. Следует отметить, что полученные коэффициенты парной корреляции для W_{pol1} , W_{pol2} , W_{pol3} в ряде случаев выше, чем для W_{pol} (до $R + 0.15$). В основном это

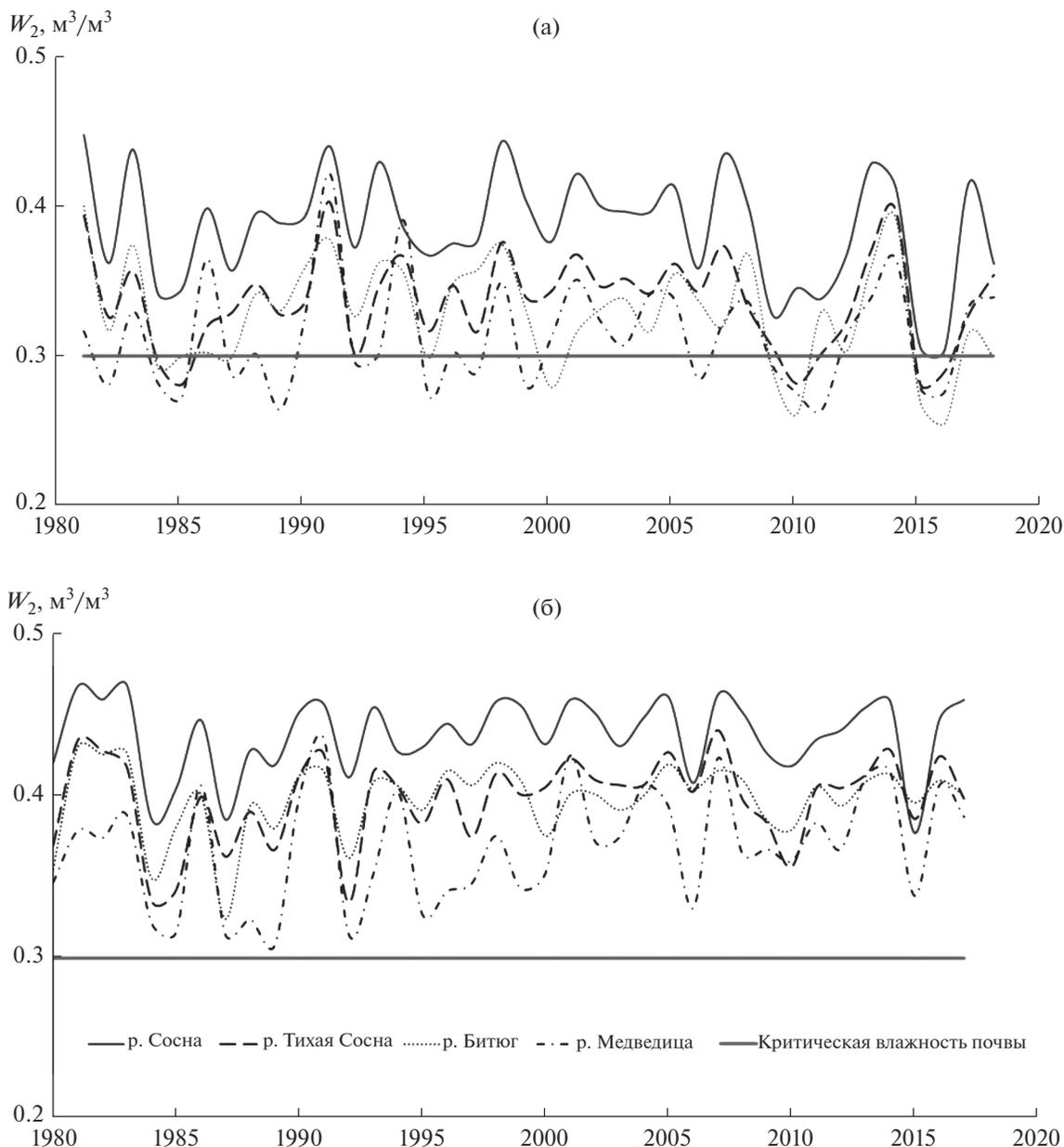


Рис. 7. Динамика средней величины увлажнения W_2 водосбора по данным GLEAM для репрезентативных бассейнов на 31 октября (а) и осредненной за период 15–28 февраля (б).

касается связей стока половодья с запасом воды в снеге, суммами значений температуры и глубиной промерзания, что указывает на высокий потенциал применения GrWat.

р. Сосна – г. Елец

Анализ коэффициентов корреляции показал, что наиболее тесно сток половодья W_{pol} связан с суммой отрицательных значений температуры воздуха TN ($R = 0.60$ для W_{pol} и $R = 0.62$ для W_{pol1} , W_{pol2} , W_{pol3}), весенними осадками Pr_4 и L .

Среди возможных вариантов определения запасов воды в снежном покрове наиболее тесной связью отличается S_e . Для остальных вариантов определения запаса воды в снеге R не превышал 0.22 для W_{pol} и 0.35 для W_{pol2} . Из этого следует, что значимую роль играют лишь мартовские показатели, т.е. снег, выпадающий перед началом половодья.

Полученные возможные комбинации уравнений указывают, что основные предикторы на данный момент – сумма отрицательных значений температуры воздуха и влажность почвы по



Рис. 8. Изменение максимальной глубины промерзания L_{\max} на водосборах.

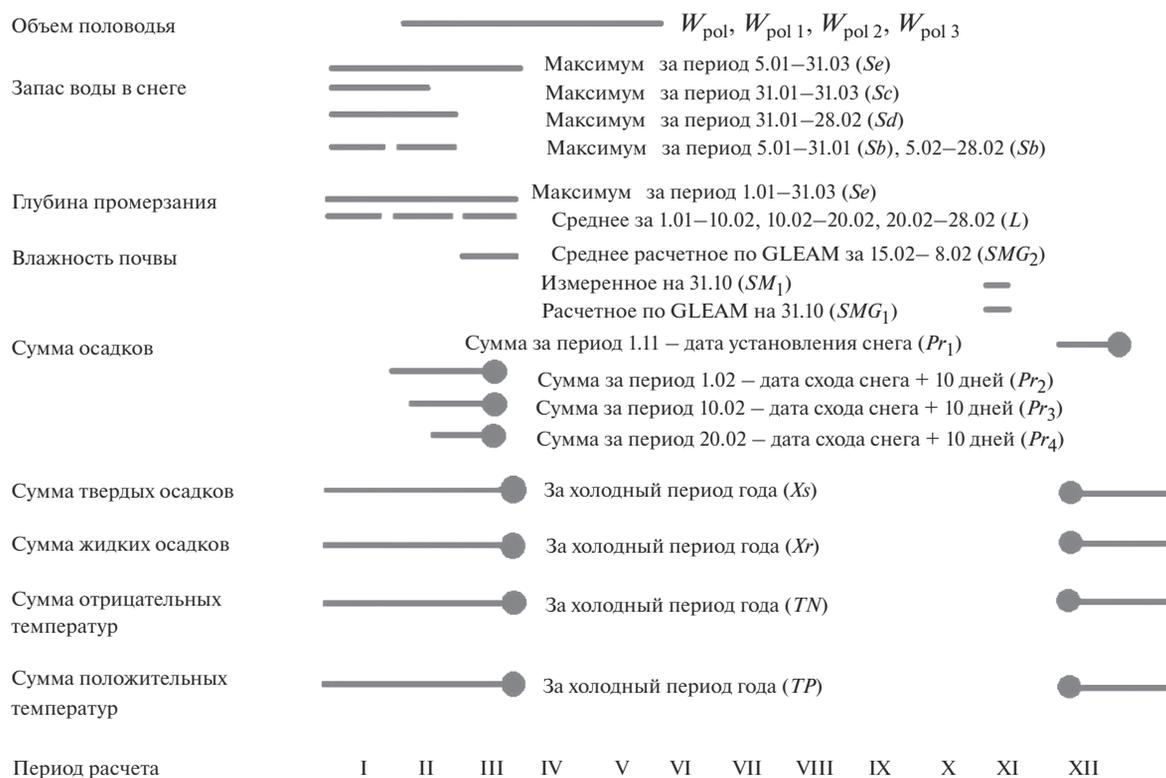


Рис. 9. Схема расчетных периодов для каждого из предикторов и предлагаемые варианты осредненных и характерных показателей, в том числе объема половодья: с грунтовой составляющей $W_{\text{пол}1}$, с наложенными паводками $W_{\text{пол}2}$ без грунтовой составляющей, с наложенными паводками и грунтовой составляющей $W_{\text{пол}3}$ и с включением всех источников питания определенным ручным способом $W_{\text{пол}}$. Кругом обозначен неопределенный момент начала расчетного периода, зависящий от других показателей. Значения Xs , Xr , TP и TN определены по данным реанализа ERA-Interm.

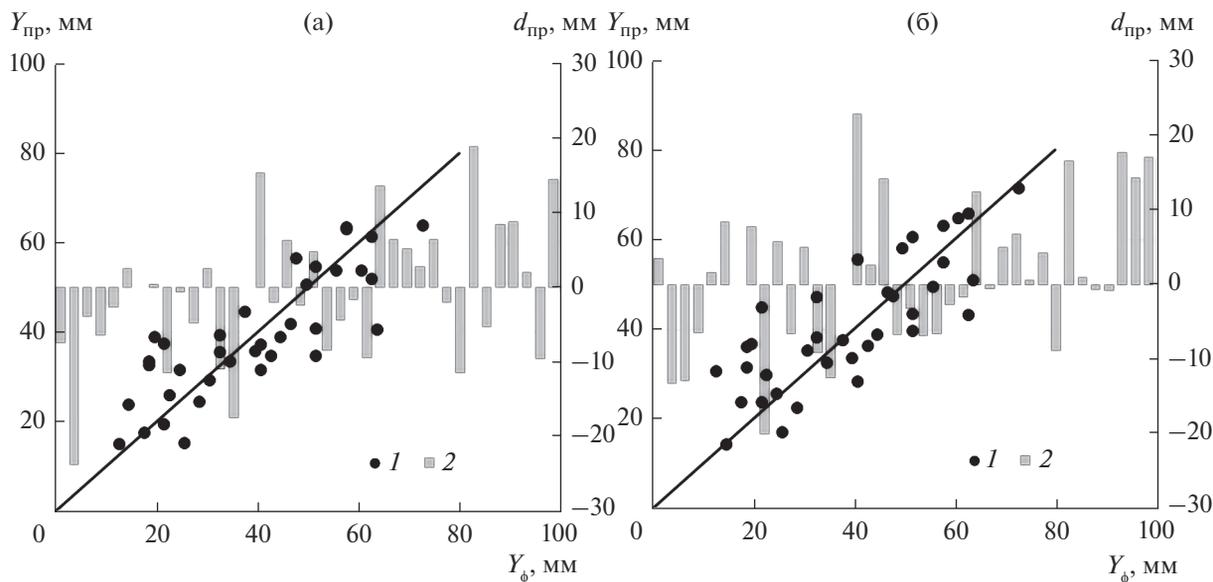


Рис. 10. Оценка качества уравнений (4) (а) и (5) (б): 1 – оценка тесноты связи слоев стока весеннего половодья р. Сосна – г. Елец $Y_{пр}$, определенных по уравнениям, с фактическими значениями $Y_{ф}$, 2 – оценка “регрессионных остатков” $d_{пр}$.

GLEAM – как осенняя, так и февральская. Значимый при $p = 0.05$ вклад в улучшение этой связи в разных сочетаниях дают Pr_3 и Pr_4 , Pr_1 и Xr .

Таким образом, основные предикторы весеннего половодья на р. Сосне из проанализированных параметров – показатели суровости зимы, увлажнения водосбора и оттепелей.

На взгляд авторов статьи, наиболее физически обоснованы и надежны уравнения:

$$W_{пол\ C} = -0.051TN + 0.2082SMG_2 + 0.251Pr_3 - 143.2, \quad MR = 0.82, \quad \sigma = 11, \quad (4)$$

$$W_{пол\ C} = -0.0565TN + 0.2082Pr_3 + 0.2347Xr - 36.9, \quad MR = 0.81, \quad \sigma = 12, \quad (5)$$

где $W_{пол\ C}$ – расчетная величина слоя стока половодья для р. Сосны в створе г. Елец.

В случае использования этих уравнений коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями >0.8 , что определяет хорошую надежность уравнения.

Характер разброса точек (рис. 10) указывает на случайную природу возникновения ошибки и отсутствие у полученного уравнения систематического отклонения при неоднородности рядов данных по использованным предикторам.

р. Тихая Сосна – с. Алексеевка

Анализ коэффициентов корреляции показал, что наиболее тесно сток половодья $W_{пол}$, как и для р. Сосны, связан с суммой отрицательных темпе-

ратур за зимний период TN ($R = 0.61$ для $W_{пол}$ и $R = 0.63$ для $W_{пол1}$, $W_{пол2}$, $W_{пол3}$). Связь с L более тесная ($R = 0.52$), чем для р. Сосны, а с осадками Pr_2 , Pr_3 , Pr_4 – несколько ниже ($R = 0.23-0.37$).

Запасы воды в снежном покрове, по данным полевых маршрутов, не влияют на формирование весеннего половодья (R для $W_{пол}$ составляет от -0.01 до 0.16). На этом фоне значимой выглядит связь стока половодья с суммой осадков за зимний период Xs , выпавших при отрицательной температуре: коэффициент парной корреляции с ними составляет 0.42 . Бассейн р. Тихая Сосна относится к значительно освоенной части бассейна р. Дон, но причины сложившихся условий стокообразования еще предстоит найти.

Примечательно, что характеристики зимних оттепелей практически не оказывают влияние на формирование весеннего половодья в бассейне р. Тихая Сосна. Так, коэффициент корреляции стока половодья с суммой положительных значений температур за зиму и с осадками за этот же период составляет -0.16 и -0.09 соответственно.

Полученные в ходе подбора возможных комбинаций уравнения указывают на то, что на современном этапе основные предикторы – это TN и Xs . Значимый вклад в улучшение этой связи в разных сочетаниях дают мартовские запасы воды в снежном покрове Se и L . Таким образом, в бассейне Тихой Сосны, как и в бассейне Сосны, на половодье оказывают влияние суровость зимы и количество выпадающих осадков. На взгляд авто-

ров статьи, наиболее физически обоснованы и надежны уравнения:

$$W_{\text{пол Т}} = -0.0482TN + 0.2353Xs - 0.29Se - 23.36, \quad MR = 0.80; \quad \sigma = 7, \quad (6)$$

$$W_{\text{пол Т}} = -0.37TN + 0.234Xs - 0.25Se + 0.2842L - 28.7, \quad MR = 0.84; \quad \sigma = 7, \quad (7)$$

где $W_{\text{пол Т}}$ – расчетное значение слоя стока половодья для р. Тихая Сосна в створе с. Алексеевка.

В случае использования уравнений (6) и (7) коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями >0.8 , что определяет хорошую надежность уравнения.

Полученный характер разброса точек указывает на случайную природу возникновения ошибки и отсутствие у полученного уравнения систематического отклонения при неоднородности рядов данных использованных предикторов.

р. Битюг – г. Бобров

Анализ коэффициентов парной корреляции показал, что наиболее тесно сток половодья $W_{\text{пол}}$ связан одновременно с TN ($R = 0.51$ для $W_{\text{пол}}$) и весенними осадками Pr_3 и Pr_4 . Идентифицируется взаимосвязь и с осенней влажностью почв SM и SMG_1 ($R = 0.38$), а также с осадками до начала зимы Pr_1 ($R = 0.47$).

В отличие от вышеописанных водосборов, для бассейна р. Битюг не диагностируется значимая связь с глубиной промерзания, в то время как с запасом воды в снеге на полевых участках теснота связи такая же плохая. Примечательно, что и характеристики зимних оттепелей TP и Xr в первом приближении практически не оказывают влияния на формирование весеннего половодья в бассейне р. Битюг ($R = 0.19$ и $R = -0.12$ соответственно).

Анализ множественных коэффициентов корреляции показал, что существенное повышение R дает сочетание параметров влажности почвы SMG_2 и запасов воды в снежном покрове Sd . Однако такое сочетание характеризуется довольно большими среднеквадратическими ошибками и не имеет путей для дальнейшего улучшения уравнения, поэтому далее оно не рассматривалось.

Полученные возможные комбинации уравнений для определения стока половодья указывают на то, что для бассейна р. Битюг на современном этапе основными предикторами являются TN , SMG_2 и Xs . На взгляд авторов, наиболее физически обосновано и надежно уравнение:

$$W_{\text{пол Б}} = 0.2194SMG_2 - 0.0123TN + 0.2629Xs - 94.2, \quad MR = 0.80, \quad \sigma = 23, \quad (8)$$

где $W_{\text{пол Б}}$ – расчетное значение слоя стока половодья для р. Битюг в створе г. Бобров.

В случае использования уравнения (8) коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями >0.8 , что определяет хорошую надежность уравнения, однако величина среднеквадратической ошибки в сравнении с вышеописанными уравнениями значительно выше.

Полученный характер разброса точек указывает на выраженное завышение расчетных значений в области 0–30 мм (для фактического стока) и занижение – выше этого диапазона. В то же время уравнения множественной линейной регрессии с более высокой надежностью и меньшей среднеквадратической ошибкой для имеющегося набора предикторов не найдено.

р. Медведица – пгт Лысье Горы

Анализ коэффициентов парной корреляции подтвердил выводы [2] о том, что условия формирования стока в бассейне отличаются от условий для Сосны, Тихой Сосны и Битюга.

Для р. Медведицы отсутствует связь слоя стока половодья с запасом воды в снежном покрове (R – от -0.07 до 0.17), но и коэффициент корреляции с TN составляет лишь 0.18 . Незначимы в первом приближении и суммы осадков Pr_1 , Pr_2 , Pr_3 , Pr_4 (R от 0.2 до 0.31), а также TP ($R = -0.05$).

Обратная значимая связь диагностируется для Xr и L ($R = 0.46$ в обоих случаях), а также с Xs ($R = 0.48$).

Полученные авторами статьи уравнения указывают, что на современном этапе основные предикторы – глубина промерзания, осенняя влажность почв и суммы зимних осадков. Таким образом, подтверждено значительное изменение условий формирования стока по сравнению с теми, что описаны в [3]. На взгляд авторов настоящей статьи, наиболее физически обоснованы и надежны уравнения:

$$W_{\text{пол М}} = 0.32L + 0.174SMG_1 + 0.102Xs - 52.7, \quad MR = 0.78, \quad \sigma = 20, \quad (9)$$

$$W_{\text{пол М}} = 0.36L + 0.136SMG_1 + 0.154Xs + 0.14Xr - 61.1, \quad MR = 0.83, \quad \sigma = 19, \quad (10)$$

где $W_{\text{пол М}}$ – расчетное значение слоя стока половодья для р. Медведицы в створе пгт Лысье Горы.

В случае их использования коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями >0.8 , что определяет хорошую надежность уравнения. В то же время среднеквадратическая ошибка уравнения так же велика, как и для бассейна р. Битюг, что указывает на необходи-

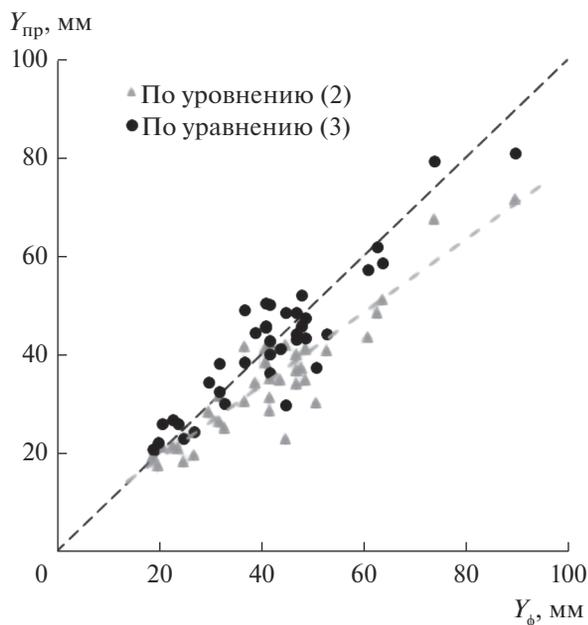


Рис. 11. Сопоставление фактических объемов стока половодья Y_{ϕ} с величинами, рассчитанными по уравнениям (2) и (3) на основе современных данных (1980–2013 гг.).

мость продолжения поиска оптимального уравнения прогноза стока половодья для данного водосбора.

Характер отклонения фактических величин слоя стока половодья от расчетных указывает на случайную природу возникновения ошибки и отсутствия у полученного уравнения систематического отклонения при наличии многолетних трендов у предикторов. В то же время для повышения точности прогнозирования требуется снижение среднеквадратической ошибки зависимости.

Таблица 3. Оценка парной корреляции объема стока весеннего половодья р. Дон – х. Беляевский с потенциальными предикторами

Опорный бассейн	Коэффициент корреляции со стоком р. Дон – х. Беляевский	
	с фактическим стоком	с рассчитанным стоком
Сосна	0.53	0.52–0.57
Тихая Сосна	0.42	0.47–0.49
Битюг	0.70	0.74
Медведица	0.49	0.49–0.55

р. Дон – х. Беляевский

Оценка слоя стока в половодье по уравнению, приведенному в [2], на современных данных показывает удовлетворительное качество прогнозной зависимости и присутствие систематического смещения: средняя абсолютная ошибка определения стока составляет 7 мм (рис. 11).

Для создания методики прогнозов притока в половодье для замыкающего створа р. Дон (до Цимлянского водохранилища) проанализированы парные коэффициенты фактических величин стока половодья четырех репрезентативных водосборов (табл. 3).

Современные регрессионные коэффициенты для уравнения Л.К. Вершининой приведены в уравнении (3). Выше описано, что MR для него низкий, среднеквадратическая ошибка выше приведенной в [2], а значимость двух переменных и свободного члена при $p = 0.05$ не подтверждается. При этом использование данных только о стоке рек Битюг и Медведицы понижает MR до 0.9, σ – до 6.7 мм, а все компоненты уравнения становятся значимыми.

Результаты указывают на необходимость поиска альтернативного набора опорных водосборов.

В данной работе основной акцент делался на составлении уравнений для параметра стока W_{pol} . Поиск наилучших уравнений для прогнозирования слоя стока половодья р. Дон и его притоков, определенного согласно алгоритмам GrWat (W_{pol1} , W_{pol2} , W_{pol3}), – тема дальнейшего исследования.

ВЫВОДЫ

Наблюдаемые климатические изменения коренным образом изменили процесс формирования стока в пределах практически всего водосбора р. Дон. В результате разработанные 30–40 лет назад методики прогноза половодья потеряли эффективность. Проведенный анализ показал, что в

настоящий момент подходы, реализованные в прошлом, нуждаются в существенной доработке и адаптации.

Тем не менее концепция прогноза весеннего стока для крупного речного бассейна (р. Дон – х. Беляевский) по стоку малых репрезентативных бассейнов реализована в виде зависимостей, перспективных для внедрения в прогностическую практику. Анализ более 20 предикторов продемонстрировал отсутствие возможности формирования территориально общих зависимостей. Трансформация водного режима в настоящий момент стала масштабным явлением, для каждой реки, даже с малым водосборным бассейном, необходимо разрабатывать свой набор расчетных параметров.

Полученные закономерности и зависимости могут быть доведены до методики прогноза притока воды к Цимлянскому водохранилищу, а также непосредственно для прогноза стока на самих этих водосборах.

Для дальнейшего повышения качества методик расчета и прогноза стока половодья необходимы более тщательный анализ исходных данных и привлечение большего числа потенциальных предикторов. Так, данные по запасу воды в снеге рекомендуется разделять на полевые и овражно-балочные. Необходимо привлечение более полных и надежных данных о наличии ледяной корки к моменту выпуска прогноза.

Кроме того, создание оперативной методики прогноза потребует доступных сведений о влажности почвы. Обновляемые лишь 1 раз в год массивы GLEAM позволяют использовать их сеточные данные для осеннего увлажнения. Возможно привлечение других источников информации о влажности почвы, таких как проект Wondersat, используемый в сельском хозяйстве для мониторинга влажности почвы на полях [19], проекты SMOS [19] или SMAP [18], а также автоматизация расчета косвенных характеристик влажности по данным о температуре воздуха и осадкам.

Кроме того, перспективно внедрение в практику оперативного гидрологического прогнозирования результатов численного моделирования погоды с помощью модели COSMO-Ru. В настоящий момент к ней разрабатывается модуль SNOWe [10, 12], в котором детально, по слоям рассчитывается формирование и трансформация снежного покрова. Говоря о характеристиках снежного покрова, можно также рассмотреть более детально процесс схода снежного покрова. Для этого можно использовать алгоритм MODSNOW [14], который создан для анализа степени покрытости того или иного речного бассейна снегом на последовательные даты с помощью автоматического анализа снимков LANDSAT.

Для оперативных оценок формирования половодья можно также адаптировать алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа GrWat [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. Учеб. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 419 с.
2. *Вершинина Л.К.* Методика расчета и прогноза объема стока весеннего половодья в бассейне р. Дона // Тр. ГГИ. 1977. Вып. 223. С. 52–65.
3. *Вершинина Л.К., Крестовский О.И.* Учет водоплотительной способности водосборов при прогнозах стока весеннего половодья // Тр. ГГИ. 1980. Вып. 265. С. 3–30.
4. *Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В.* Гидрологические прогнозы. СПб.: РГГМУ, 2007. 436 с.
5. *Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л.* Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.
6. *Киреева М.Б., Фролова Н.Л.* Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76.
7. *Комаров В.Д.* Долгосрочный прогноз весеннего стока рек черноземной зоны Европейской части СССР на основе территориально общих зависимостей. Л.: Гидрометеоиздат, 1955. 74 с.
8. *Паршин В.Н., Салов М.С.* Весенний сток в бассейне р. Дона и его предвычисление. Л.: Гидрометеоиздат, 1955. 102 с.
9. Специализированные массивы для климатических исследований ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”. [Электронный ресурс]. <http://www.aisori-m.meteo.ru> (дата обращения: 10.09.2019)
10. *Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г.* Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Тр. Гидрометцентра России. Т. 368. № 2. 2018. С. 120–143.
11. *Brecht Martens, Diego G. Miralles, Hans Lievens, Robin van der Schalie, Richard A. M. de Jeu, Diego Fernández-Prieto, Hylke E. Beck, Wouter A. Dorigo, Niko E. Verhoest* GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture // Geosci. Model Dev. 2017. V. 10. 1903–1925.
12. *Churiulin E.V., Krylenko I.N., Frolova N.L., Belyaev B.M.* Research of opportunities of combined use of the runoff formation ECOMAG model and mesoscale atmosphere circulation COSMO-Ru model (on the example of floods on the Sukhona River at the Velikiy Ustyug) // IOP Conf. Sers. Bristol, UK.: Earth and Environ. Sci. Inst. Physics Publ., 2019. Т. 263. P. 1–7.
13. European Space Agency – CCI Soil Moisture Product. [Электронный ресурс]. <http://www.esa-soilmoisture-cci.org> (дата обращения: 21.09.2019)
14. *Gafurov A., Lüdtke, S., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Schöne T., Schmidt S., Kalashnikova O., Merz B.* MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow

- cover monitoring using MODIS data // Environ. Earth Sci. 1078. V. 75.
15. Global Land Evaporation Amsterdam Model – GLEAM. [Электронный ресурс]. <http://www.gleam.eu> (дата обращения: 19.09.2019)
 16. GrWat tool for hydrograph separation and analysis. [Электронный ресурс]. [http:// https://tsamsonov.github.io/grwat/index.html](http://https://tsamsonov.github.io/grwat/index.html) (дата обращения: 11.10.2019)
 17. *Kireeva M., Frolova N., Rets E., Samsonov T., Entin A., Kharlamov M., Telegina E.* Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period // Int. J. River Basin Management. 2019.11.25. 2019. [Электронный ресурс]. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1695258>
 18. SMAP or Soil Moisture Active Passive. [Электронный ресурс]. [http:// www.nasa.gov](http://www.nasa.gov) (дата обращения: 30.09.2019)
 19. SMOS – Soil Moisture and Ocean Salinity. [Электронный ресурс]. [http:// www.directory.eoportal.org](http://www.directory.eoportal.org) (дата обращения: 24.09.2019)
 20. VanderSat project. [Электронный ресурс]. [https:// www.vandersat.com/](https://www.vandersat.com/) (дата обращения: 11.11.2019)