

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Варенцова Наталья Александровна

**Весенний сток рек Европейской территории России
в условиях нестационарного климата**

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши
географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – ***Фролова Наталья Леонидовна,***
доктор географических наук, профессор

Официальные оппоненты – ***Симонов Юрий Андреевич,***
доктор географических наук, заместитель
директора ФГБУ «Гидрометцентр России»

Шихов Андрей Николаевич,
доктор географических наук, доцент,
профессор кафедры картографии и
геоинформатики географического факультета
Пермского государственного национального
исследовательского университета

Калугин Андрей Сергеевич,
кандидат географических наук, заведующий
лабораторией региональной гидрологии,
старший научный сотрудник Института
водных проблем РАН

Защита диссертации состоится «15» мая 2025 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)939-22-38, факс +7(495)932-88-36).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3396>

Автореферат разослан « » апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В современных климатических условиях весеннее половодье играет ведущую роль в водном режиме рек Европейской территории России (ЕТР). Оно напрямую определяет условия жизнедеятельности населения и экономики в течение 1–3 месяцев и косвенно – в оставшуюся часть года. Характеристики весеннего половодья подвержены значительной пространственно-временной изменчивости под действием множества факторов.

В XX в. советскими гидрологами разработан ряд физико-статистических методик прогнозирования элементов весеннего половодья. Они покрывали существовавшие на тот момент потребности в прогнозах, но на современном этапе их недостаточно. Удовлетворение растущего спроса на гидрологические прогнозы требует не только расширения видов и частоты выпуска прогнозов, пунктов, для которых они составляются, но и актуализации представлений об условиях формирования стока, проверку гипотез о главных и второстепенных факторах с оценкой их вклада в дисперсию стока.

Степень разработанности темы. Методологической и теоретической основой работы стали представления о факторах формирования стока, полученные в XIX–XXI вв. Толчком к изучению факторов формирования стока стало экстремально высокое половодье 1908 г. в бассейне Волги. Родоначальниками направления были Г. Тарловский, Ю.В. Ланге, Р.П. Спарро, Е.А. Гейнц и Д.И. Кочерин, установившие связь между стоком половодья, количеством поступающей на водосбор влаги и условиями ее трансформации. В работах советских ученых Б.А. Аполлова, Т.И. Великановой, Л.К. Вершининой, Е.С. Змиевой, Г.П. Калинина, В.Д. Комарова, О.И. Крестовского, В.М. Мишона, В.Н. Паршина, Е.Г. Попова, В.В. Рахманова, М.С. Салова, А.И. Субботина перечень действующих факторов значительно расширился. Особое внимание ими уделялось динамическим характеристикам. В частности, В.Д. Комаров, Е.С. Змиева и Т.Т. Макарова в 1955 г. практически одновременно описали потери стока через влажность и глубину промерзания почвы. Квазипостоянным факторам большое внимание уделено в работах А.М. Владимирова, А.М. Гареева, В.Н. Голосова, П.Н. Зайцева, А.В. Панина, Л.А. Разумовой, В.В. Рахманова, А.А. Соколова, А.Ю. Сидорчука.

В последние десятилетия оценки состояния факторов и их влияние на сток половодья присутствуют в работах Н.И. Алексеевского, А.Т. Барабанова, В.Е. Водогрецкого, С.В. Долгова, В.М. Евстигнеева, И.Л. Калюжного, А.С. Калугина, М.Б. Киреевой, А.В. Кислова, Н.И. Коронкевича, С.А. Лаврова, В.М. Морейдо, Н.В. Соломатина, Н.Л. Фроловой.

Применение знаний о факторах формирования стока отражено в работах Н.М. Алюшинской, Н.А. Анискиной, В.А. Бельчикова, М.В. Болгова, С.В. Борща, Д.А. Буракова, А.В. Быстрова, Л.К. Вершининой, Л.Д. Ивашинцовой, О.С. Литвиновой, Т.И. Каримовой, Ю.А. Павроза, А.В. Романова, В.А. Румянцева, М.И. Сильницкой, Ю.А. Симонова, А.В. Христофорова, Н.М. Юминой, в которых предложены подходы или методы прогноза элементов весеннего половодья различной заблаговременности.

Отдельным направлением изучения факторов формирования стока и применения этих знаний для решения практических задач стало физико-математическое моделирование. Значительные достижения здесь имеют научные группы под руководством Д.А. Буракова, Ю.Б. Виноградова, Б.И. Гарцмана, А.Н. Гельфана, А.Г. Георгиади, Е.М. Гусева, В.Н. Демидова, С.А. Кондратьева, В.И. Корня, Л.С. Кучмента, Ю.Г. Мотовилова и др.

За рубежом эти вопросы поднимаются в работах Ahmed R., Arsenault R., Assani A.A., Attinger S., Baetz B., Basso S., Biles F.E., Bonsal B., Brissette F.P., Burn D.H., Burford J.E., Chekan G.S., Cunderlik J.M., Curran J.H., Davie T., Déry S.J., Dibike Y., Foster S.G., Groisman P.Y., Heße F., Hillman E.J., Huang G., Jay D.A., Jones N.E., Kumar R., Li K., Luek A., Marsh P. Dr., Menounos B., Merz R., Melnik V.I., Moore R.D., Naikm P.K., Partasenok I.S., Petreman I.C., Pietroniro A., Prowse T., Rood S.B., Schmidt B.J., Schmidt L., Stahl K., Tarek M., Walker B.J., Whitfield P.H., Zanewich K.P.

Предметом исследования стали пространственно-временные закономерности формирования весеннего стока, а **объектом** – характеристики весеннего стока рек ЕТР, в частности, слой стока. Выбор обоснован высокой значимостью этой характеристики половодья как общего показателя его водности, потенциала для водопользования, рисков для населения и экономики, а также увлажнения водосборов.

Цель работы – оценка современных особенностей формирования весеннего половодья и разработка подходов для анализа факторов его формирования в современных условиях с целью совершенствования методик гидрологических прогнозов. Для ее достижения в рамках диссертации потребовалось решить следующие **задачи**:

- 1) проанализировать текущее состояние вопроса;
- 2) дать оценку современной пространственно-временной изменчивости характеристик половодья в пределах ЕТР;
- 3) выявить и проанализировать современные факторы формирования стока (ФФС) половодья;
- 4) адаптировать результаты регрессионного анализа к прогнозам стока половодья.

Материалы и методы. В основе работы лежат данные о слое стока воды весеннего половодья на 348 гидрологических постах и данные реанализа ERA5. Путем применения различных статистических методов (в том числе, корреляционного и регрессионного анализов) проведена оценка современного состояния стока половодья и его потенциальных факторов, для последних диагностированы действующие ФФС половодья, сформированы линейные регрессионные уравнения, на их основе проведено факторное районирование ЕТР.

Научная новизна:

- 1) выделены основные действующие ФФС и предложена их модернизированная классификация;
- 2) диагностированы результаты влияния современного изменения климата на статистические параметры рядов слоя стока весеннего половодья;
- 3) впервые рассмотрено более 200 характеристик – потенциальных ФФС половодья;
- 4) для каждого речного водосбора на основе статистического подхода составлены тысячи двух- и трехпараметрических уравнений для расчета слоя стока половодья. Для наиболее надежных из них проведен анализ состава, статистических показателей, а также сопоставление с уравнениями, составленными на основе классических методов;

5) впервые на примере вложенных водосборов проверена гипотеза устойчивости ФФС по длине рек.

Практическая значимость заключается в возможности использования полученных результатов для анализа условий формирования стока весеннего половодья и разработки методик его прогнозирования. Полученная высокая эффективность применения данных реанализа ERA5 раскрывает потенциал применения открытых данных для гидрологических прогнозов, в том числе за счет расширения возможности поиска предикторов. Впервые показана необходимость учета зональных, региональных и локальных особенностей даже для соседних рек. Полученные регрессионные уравнения могут быть положены в основу более совершенных методик прогнозирования слоя стока весеннего половодья с повышенной дискретностью для рек ЕТР. Кроме того, полученные актуальные статистические параметры стока могут быть использованы для инженерных расчетов.

Основные защищаемые положения:

1) Предложена модернизированная классификация факторов формирования весеннего половодья, в которой место каждого фактора определяется его ролью в водном балансе, динамичностью и характером воздействия, учитывает неоднозначность их влияния в различных условиях.

2) В последние десятилетия происходит неоднородная по времени трансформация пространственного распределения параметров слоя стока весеннего половодья. Она включает в себя сокращение среднего стока в целом по ЕТР при одновременном росте его пространственно-временной изменчивости. Основные причины изменения условий формирования весеннего половодья заключаются в неустойчивости зимнего периода и снижении дружности весны.

3) В среднем для ЕТР главным фактором, описывающим наибольшую долю дисперсии слоя стока половодья, для 40% водосборов выступает сумма твердых осадков, для 20% – влажность почвы и для 15% – сумма осадков за зимний период. При этом комбинации факторов, наилучшим образом описывающих слой стока половодья в рамках трехпараметрической регрессии, неоднородны во времени и пространстве.

4) Статистическое районирование ЕТР по первым трем факторам формирования весеннего стока, повышающее качество описания стока, рекомендовано к учету при анализе региональных и локальных особенностей стока весеннего половодья, а также при разработке предварительных и уточняющих прогнозов весеннего половодья.

Личный вклад автора. Все анализируемые результаты работы получены автором лично. В частности, автором выполнены оценка современного состояния вопроса, статистическая обработка гидрометеорологических данных, визуализация и анализ полученных результатов. Автор участвовала в разработке методик обработки данных, руководила работой по их программной реализации, проводила бета-тестирование разрабатываемых программ.

Апробация работы. Результаты доложены на XIV Всероссийской научной конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Москва, 2015), XIV Общероссийской конференции изыскательских организаций (Москва, 2018), III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», приуроченной к 100-летию Государственного гидрологического института (Санкт-Петербург, 2019), 4th International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers (Москва, 2021), VIII Всероссийском объединенном метеорологическом и гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2024). В декабре 2024 г. результаты работы доложены на семинаре кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, в феврале 2025 г. – на заседании секции гидрологических и морских гидрологических прогнозов Ученого совета ФГБУ «Гидрометцентр России».

Полученные результаты вошли в отчеты «Исследование современных особенностей формирования весеннего половодья на реках Европейской территории России и Западной Сибири в условиях нестационарного климата и антропогенного воздействия» (2013–2015 гг.), «Долгосрочный прогноз изменения водных ресурсов для целей обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса бассейна реки Дон» (Госконтракт, 2019–2020 гг.), «Структурные изменения процессов формирования стока рек Восточно-Европейской равнины в условиях нестационарности

климата (РНФ 19-77-10032, 2019–2022 гг.), «Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной реки Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)» (2022–2023 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 7 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 6 глав, введения и заключения. Объем работы составляет 187 страниц, включая 60 рисунков и 21 таблицу. Библиографический список содержит 139 наименований, включая 104 отечественных и 35 зарубежных издания.

Благодарности. Автор выражает благодарность М.Б. Киреевой за максимально эффективную мотивацию при проведении исследований и подготовке работы к защите, В.А. Жуку, М.А. Харламову, сотрудникам кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова и ее выпускникам 2011 г., сотрудникам подразделений Росгидромета. Автор благодарен своей семье за неоценимую помощь и поддержку в период работы над диссертацией, в частности, Михаила и Тимофея Варенцовых.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, указана степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая значимость диссертации, даны сведения об исходных материалах и методах исследования, представлены основные защищаемые положения, указана степень достоверности и апробация результатов работы.

В **Главе 1** показано, что на протяжении всего XX в. вопросами изучения ФФС весеннего половодья занималось большое число ученых. В целях последующего использования в гидрологических прогнозах определялись главные и второстепенные факторы и их комбинации, отвечающие за развитие

высокого, среднего или низкого стока весной. Основываясь на физике процесса и имеющихся наблюдениях, к 1950-м гг. сформировался классический вид зависимости объема половодья от запаса воды в снежном покрове, осадков за период половодья, влажности и глубины промерзания почвы:

$$Y = f\left(S + X, W_{\text{ПВ}} \cdot \frac{L}{50}\right),$$

где $S + X$ – сумма запаса воды в снежном покрове и осадков в период половодья, $W_{\text{ПВ}}$ – количество продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см, L – глубина промерзания.

В качестве дополнительных измеряемых показателей в нее могли включать данные о ледяной корке, температуре воздуха в зимний период и оттепелях, осеннем и зимнем стоке. Влияние интенсивности таяния, льдистости почв, залесенности, расчлененности включались в нее, как правило, поправочными коэффициентами.

За рубежом дополнительно привлекаются индексы атмосферной циркуляции, характеристики водосборов, распространения ледников и вечной мерзлоты. Основной акцент ставится на аномалии факторов и стока, а не на абсолютные величины. Но главным отличием от отечественных работ является гораздо большее внимание к данным бесконтактных методов (зондирование, аэрофотосъемка) и моделирования (как сами модели, так и реанализы).

Многочисленность действующих ФФС половодья требует их классификации, но существующие представляются неполными. В рамках работы предложена модернизированная классификация ФФС (рис. 1), в которой факторы разделены на приходные прямые положительные, расходные прямые отрицательные, перераспределяющие косвенные динамические и перераспределяющие косвенные квазипостоянные.

Главной ее особенностью стало введение понятия перераспределяющих и пограничных факторов. Перераспределяющими называются факторы, которые при различных своих состояниях могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на приходную часть водного баланса весеннего половодья. В рамках данного исследования принято, что перераспределяющий фактор не может оказывать прямого воздействия на сток. В отношении ряда антропогенных факторов (регулирование стока, мелиорация и урбанизация), а

также естественных аккумуляторов стока, несмотря на вид их воздействия, подобное предположение считается допустимым.

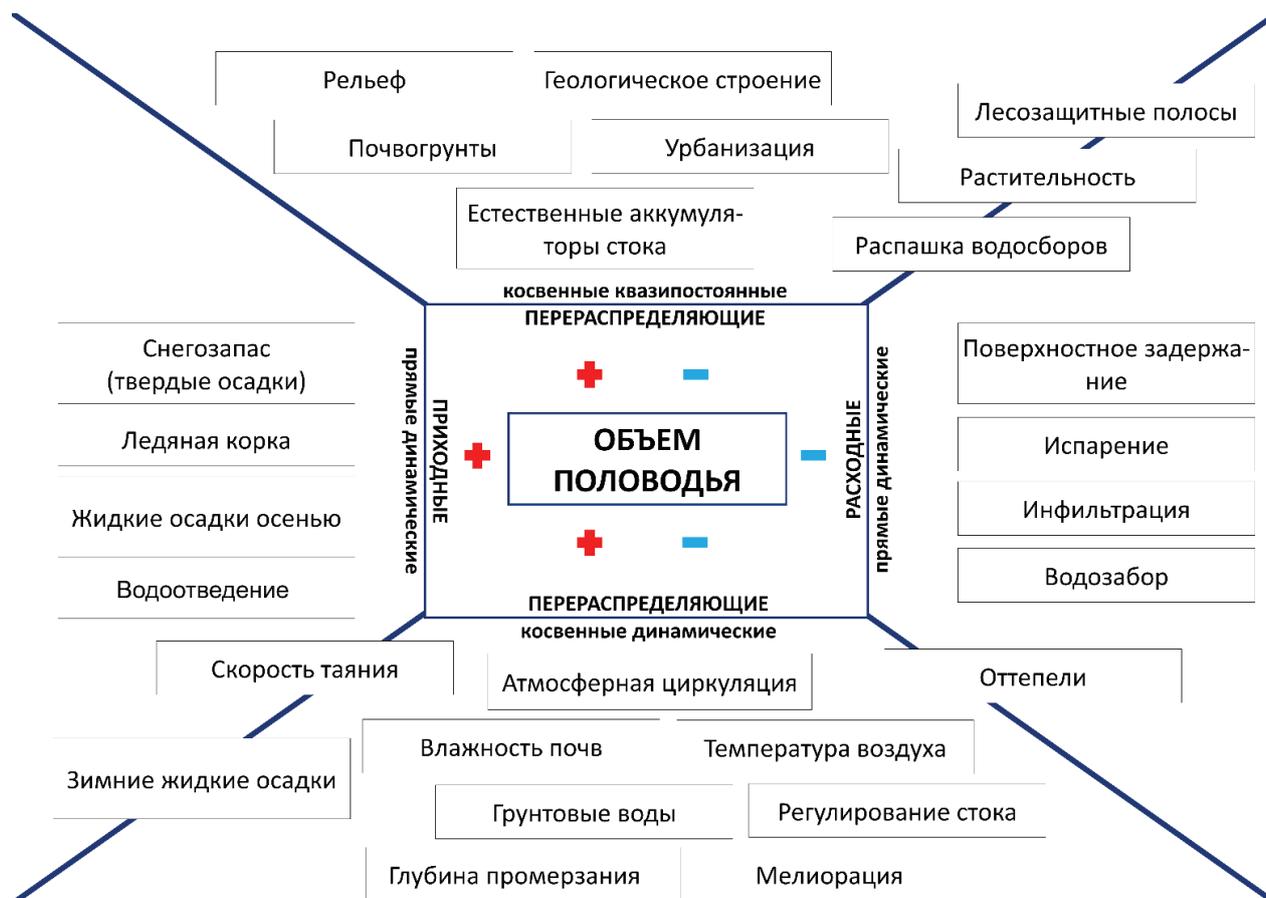


Рисунок 1 – Модернизированная классификация факторов формирования стока половодья

В рамках анализа работ по теме современного изменения климата и его влияния на водный сток установлено, что интенсивность и направленность изменений имеет разную величину и знак в зависимости от параметра, сезона года и географического положения. Это формирует разную по направленности и интенсивности динамику стока весеннего половодья.

В результате установленные в середине XX в. связи между стоком и ФФС претерпели существенные изменения. Это ставит вопрос актуализации действующих методик прогнозирования. Одновременно растет потребность населения и экономики в повышении дискретности гидрологических прогнозов. Современные технологии могут удовлетворить эту потребность, но для ее реализации требуется установить актуальные действующие ФФС весеннего половодья для каждого региона или отдельной реки.

В **Главе 2** представлено описание материалов и методов исследования. Для реализации поставленных задач на основе ежедневных наблюдений за расходами воды создана база данных характеристик стока весеннего половодья для 348 гидрологических постов на 267 реках, замыкающих водосборы площадью от первых сотен до нескольких сот тысяч км². На 49 реках из выборки использованы данные с 2–6 гидрологических постов. Они относятся к бассейнам Волги, Днепра, Дона, Онеги, Мезени, Печоры, Северной Двины и Урала. Вся территория по квазибассейновому принципу разделена на 24 района.

В качестве исходной метеорологической информации использован реанализ ERA5 с шагом 0,25° по широте и долготе. На основе его данных о температуре воздуха, атмосферных осадках, запасе воды в снежном покрове, температуре почвы на разных глубинах и влажности почвы получено 209 характеристик, потенциально способных выступать ФФС половодья. Все они разделены на 17 групп: снежного покрова *F-1*, зимнего периода *F-2*, зимних морозов *F-3*, зимних оттепелей *F-4*, промерзания почвы *F-5*, периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове S_{\max} до его схода *F-6*, периода от S_{\max} до перехода температуры воздуха через 0 °С *F-7*, периода от перехода температуры через 0 °С до схода снежного покрова *F-8*, периода в течение 10 дней после схода снежного покрова *F-9*, периода последних 10 дней зимы *F-10*, периода первых 10 дней весны *F-11*, а также объединение *F-10* и *F-11–F-12*, таяния снежного покрова *F-13* и 4 группы влажности почвы: летней *F-14*, осенней и предзимней *F-15*, периода окончания зимы и начала весны *F-16* и экстремумов *F-17*.

К данным применен статистический метод анализа, включая корреляционный анализ и множественную линейную регрессию – поиск наилучших двух- и трехпараметрических уравнений с учетом ограничений на статистическую и смысловую связность характеристик.

В **Главе 3** представлен пространственный и временной анализ характеристик стока половодья для современного периода. Диагностировано снижение среднего слоя стока половодья на ЕТР до 95 мм (рис. 2). Сравнение с картами СНиП 1985 г. указывает на смещение изолиний 10–140 мм к северу на

100–200 км, а на западе – до 400 км. К северу от них наблюдаются разнонаправленные изменения, подтверждаемые [Третий оценочный доклад..., 2022]. Коэффициент автокорреляции слоя стока половодья не превышает 0,3 в 78% случаев. К северу от 56° с.ш. наиболее подходящим для описания характеристик выступает трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого–Менкеля, а к югу – распределение Пирсона III типа. Установлены значимые изменения для коэффициента вариации C_v и отношения к нему коэффициента асимметрии C_s/C_v . Общая картина параметров стала значительно более пестрой, нарушилась субширотность.

С помощью непараметрического теста Петита (“Pettitt’s test”) и анализа разностно-интегральных кривых установлено, что наиболее ранние изменения слоя стока весеннего половодья начали происходить в бассейнах Хопра, Иловли и Самары в 1960-х гг., чуть позже – на Нижней Каме. В 1980-е гг., к которым относится 46% статистически достоверных трендов, изменения охватили практически весь Дон, Оку, Печору, правобережную Мезень, Нижнюю Вятку и Верхний Урал (рис. 3). В 1990-е гг. перелом произошел на Западной Двине, Днепре, Верхней Волге и верхней части Северной Двины. Позже всех на современное изменение климата отреагировали реки бассейнов Северной Двины, Онеги, Мезени, Камы, Белой, Нижней Волги и среднего течения Урала. Таким образом, к началу современного изменения климата в 1980-е гг. перелом диагностирован для половины водосборов.

Результаты анализа характеристик потенциальных ФФС дополняют выводы [Третий оценочный доклад..., 2022]. Так, на более чем половине ЕТР смягчение зим и рост коэффициента вариации температуры воздуха на 20–100% привело к сокращению запаса воды в снеге на 50–128%. К окончанию зимы его сокращение составило до 45%, а к началу весны – до 95%. Рост до 69% на реках северо-запада, Верхней Волги, Сухоны, Юга и Нижнего Дона диагностирован для числа зимних оттепелей со сходом снежного покрова, а их продолжительность выросла на западе ЕТР на 36–66%. Для пассивного и активного таяния выявлены отрицательные тренды до –77%. Наибольшие изменения характерны для центра, запада и юга ЕТР.

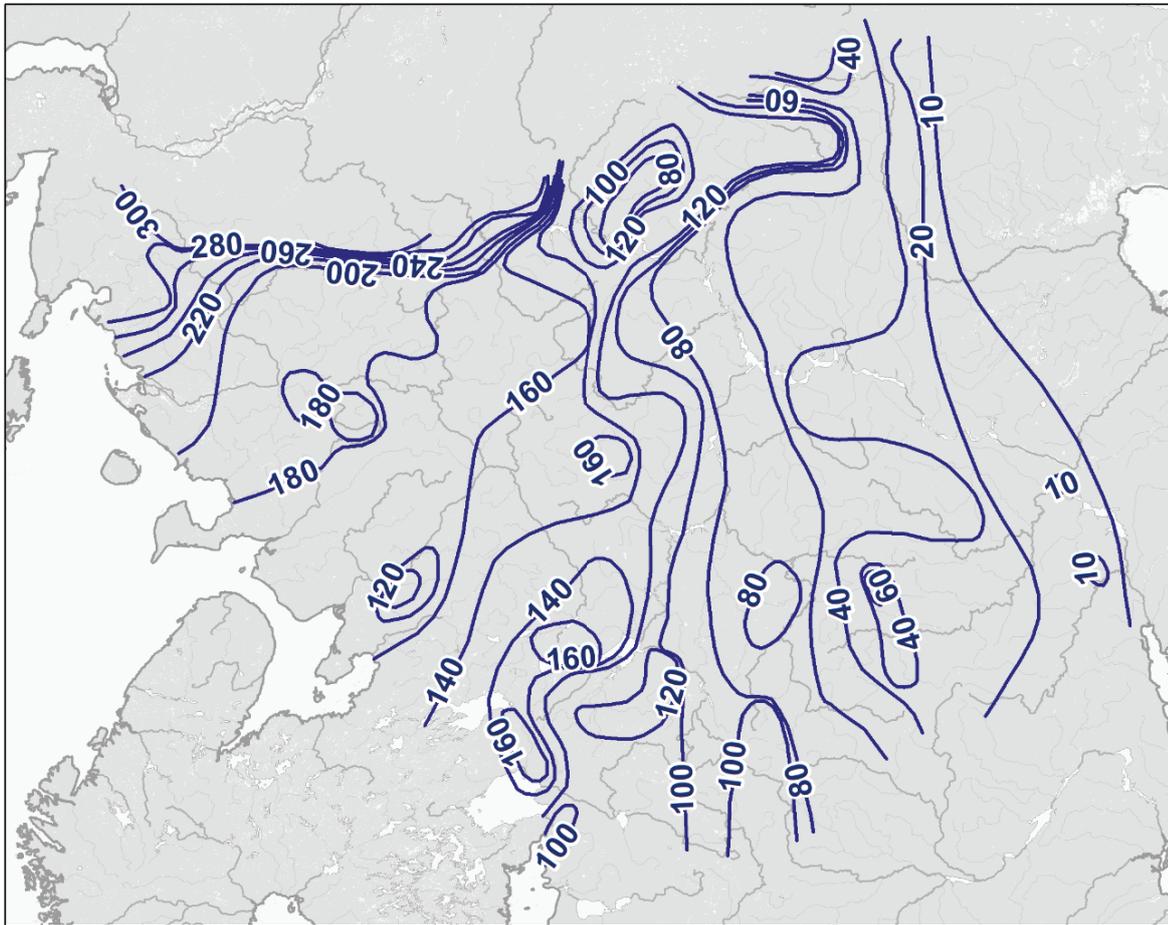


Рисунок 2 – Средний слой стока воды весеннего половодья (мм) в 1980–2017 гг.

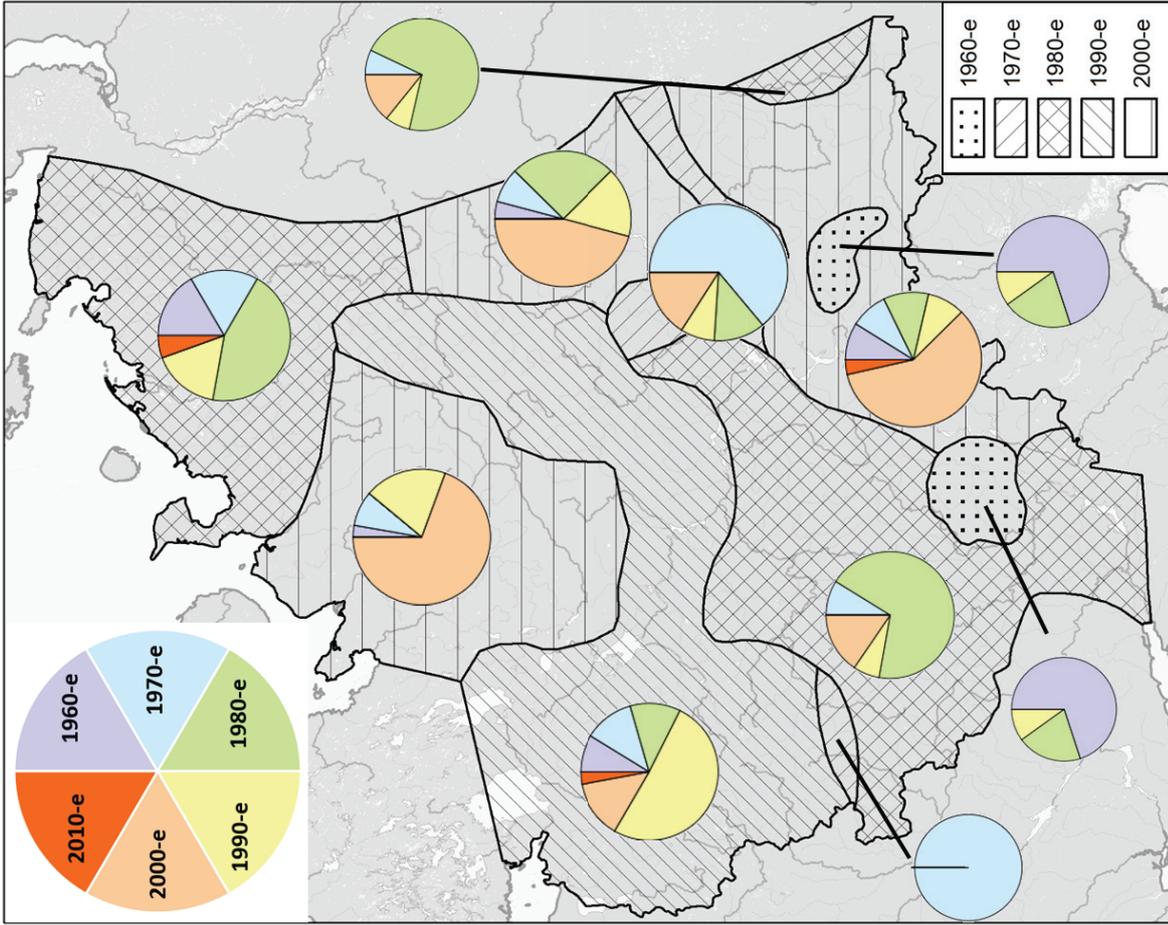


Рисунок 3 – Районирование ЕТР по началу современных изменений стока половодья

В Главе 4 в рамках парного корреляционного анализа показано, что характеристики снежного покрова описывают в среднем лишь 23% дисперсии слоя стока половодья, тогда как на характеристики зимнего периода и зимних морозов приходится 24 и 30% соответственно. Величина вклада снежного покрова возрастает до 62% на Днестре и Верхней Оке, для зимних морозов – до 67% на Белой, Сакмаре и Мезени и до 74% для характеристик зимних морозов на реках севера ЕТР, Верхней Волги и Камы. Среди приходных факторов трех групп $F-1$, $F-2$ и $F-3$ в 62% случаев наибольшую долю дисперсии слоя стока половодья описывает сумма осадков при отрицательных температурах $SnowTP$. В 26% случаев, особенно на Урале и Каме, больший вес имеют суммарные осадки $TPsum$. И лишь 12% приходится на максимальный запас воды в снежном покрове S_{max} . В ареалах доминирования разница их тесноты связи со стоком весьма значительна.

В зоне недостаточного увлажнения в трех группах доминируют перераспределяющие факторы: сроки и продолжительность залегания снежного покрова $F-1$, температура воздуха зимнего периода $F-2$, температура воздуха и продолжительность зимних морозов $F-3$. Эти характеристики описывают на 4–15% больше дисперсии, нежели приходные факторы.

Оттепели $F-4$ как ФФС описывают 14% изменчивости стока половодья в среднем и до 38% – на юге ЕТР. Они представлены на Нижней Волге и Каме суммами осадков, на остальной части ЕТР – температурой воздуха и продолжительностью оттепелей.

На промерзание почвы $F-5$ приходится до 52% изменчивости слоя стока половодья на Верхней Оке, Дону и Урале, хотя в среднем по ЕТР этот показатель составляет 12%. Помимо глубины оно представлено продолжительностью промерзания почвы, например, на Верхней Оке, Верхней Каме и Печоре.

Характеристики периодов конца зимы и начала весны (группы $F-6–F-12$) в среднем описывают 12–17% изменчивости стока. К югу от Северных Увалов более значимы характеристики периодов от S_{max} до перехода температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и до схода снега, а к северу – характеристики 10–20 дней на границе зимы и весны. Они относительно равнозначно представлены запасом воды в снеге, температурой воздуха и осадками, и лишь в 5% случаев – продолжительностью периода.

Таяние снежного покрова $F-13$ описывает 14% изменчивости слоя стока весеннего половодья, увеличиваясь до 43% на Дону и Верхней Оке. Помимо активного таяния, распространенного на Каме, на Дону значима пассивная фаза (до перехода температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), а в средней полосе ЕТР – их интегральные характеристики.

Влажность почвы перед началом половодья и ее экстремумы как ФФС наиболее распространены на ЕТР и описывают 18–20% дисперсии слоя стока половодья. На предзимние характеристики приходится в среднем 13%, но именно они в междуречье Нижней Волги и Урала выступают определяющим фактором с вкладом более 50% в изменчивость стока.

Общая картина главного фактора формирования стока половодья получается крайне пестрой. А оценка средних и максимальных вкладов ФФС в дисперсию стока по бассейнам указывает на значимые различия в факторообусловленности. Так, на Северной Двине значимы условия зимы и снегонакопления, на Белой – зимы и влажности почвы, тогда как для рек северо-запада и Среднего Дона вклады факторов близки по значениям.

В **Главе 5** приведены результаты анализа ФФС на основе лучших двух- и трехпараметрических уравнений E_best . Двухпараметрические уравнения показали, что в большинстве случаев приходная составляющая представлена суммой общих и твердых осадков за зимний период, а в роли ФФС-2 выступает влажность почвы разных периодов. Множественный коэффициент корреляции MR таких уравнений на 0,1–0,6 выше, чем для квазиводнобалансовых, где сток выступает функцией запаса воды в снеге и влажности почвы или глубины промерзания. Также показана несостоятельность утверждений о незначимости глубины промерзания почвы как ФФС в современных условиях для рек севера ЕТР, а для Дона – низкой значимости влажности почвы.

Анализ трехпараметрических уравнений подтверждает выводы главы 4 об отсутствии единого ФФС 1-го ранга, имеющего наибольшую корреляционную связь со слоем стока (ФФС-1). На ЕТР он представлен 100 характеристиками всех групп (рис. 4а). ФФС-1 в среднем описывает 32% дисперсии стока, увеличиваясь до 73% на реках севера ЕТР, Верхней Оки и Верхней Камы. В зависимости от географического положения он различается по роли в водном

балансе, типу и времени воздействия. К северу от 53–55° с.ш. в роли ФФС-1 выступают приходные факторы. На них приходится 61% выборки. На 30% водосборов ЕТР главенствует сумма твердых осадков, хотя локализована она на реках севера ЕТР и Верхней Каме. На Урале, Вятке и Белой доминируют суммарные осадки с 1 ноября до схода снежного покрова, а в средней полосе ЕТР – максимальный суточный, 10-суточный и средний запас воды в снеге (рис. 5).

К югу от 53–55° с.ш. в качестве ФФС-1 выступают перераспределяющие факторы: влажность почвы, температура воздуха, глубина промерзания, таяния снежного покрова, сроки и продолжительность явлений (рис. 6а). На них приходится практически 40% случаев всей выборки. Для этих рек условия, в которых происходит водоподача, играют гораздо более значимую роль, нежели объем водоподачи.

Во 2-м ранге (следующий по тесноте связи со слоем стока половодья, ФФС-2) пестрота распределения факторов возрастает, а акцент смещается на влажность почвы и оттепели (рис. 4б). Для ФФС 3-го ранга (ФФС-3) растет вклад периодов перехода от зимы к весне (рис. 4в).

Деление по физическому смыслу показывает, что в качестве ФФС-1 чаще выступают твердые и общие осадки (рис. 6а), ФФС-2 – влажность почвы, общие осадки и температура воздуха (рис. 6б), а ФФС-3 – температура воздуха и влажность почвы (рис. 6в). Факторы 2-го и 3-го рангов отличаются высокой пространственной пестротой, но, как факторы, температура воздуха и влажность почвы более выражены в 3-м ранге (рис. 6б, в).

Роль промерзания почвы как значимого ФФС в пределах большей части ЕТР не подтверждена. Она входит в уравнения менее чем для 7% рек выборки. Ареал ее доминирования локализован в степях и по югу лесостепи между Доном, Северским Донцом и Окой. Наравне со срочной глубиной промерзания, значимая роль диагностирована для средней за зиму величины.

Влажность почвы в пределах ЕТР выступает в роли всех ФФС. Наибольшую дисперсию стока она описывает в зоне недостаточного увлажнения – в бассейнах Урала, Белой, Нижней Волги и Дона. Чаще всего она представлена влажностью почвы перед окончанием зимы и максимальной влажностью почвы группы *F*-17, которая по срокам формируется позже (рис. 7).

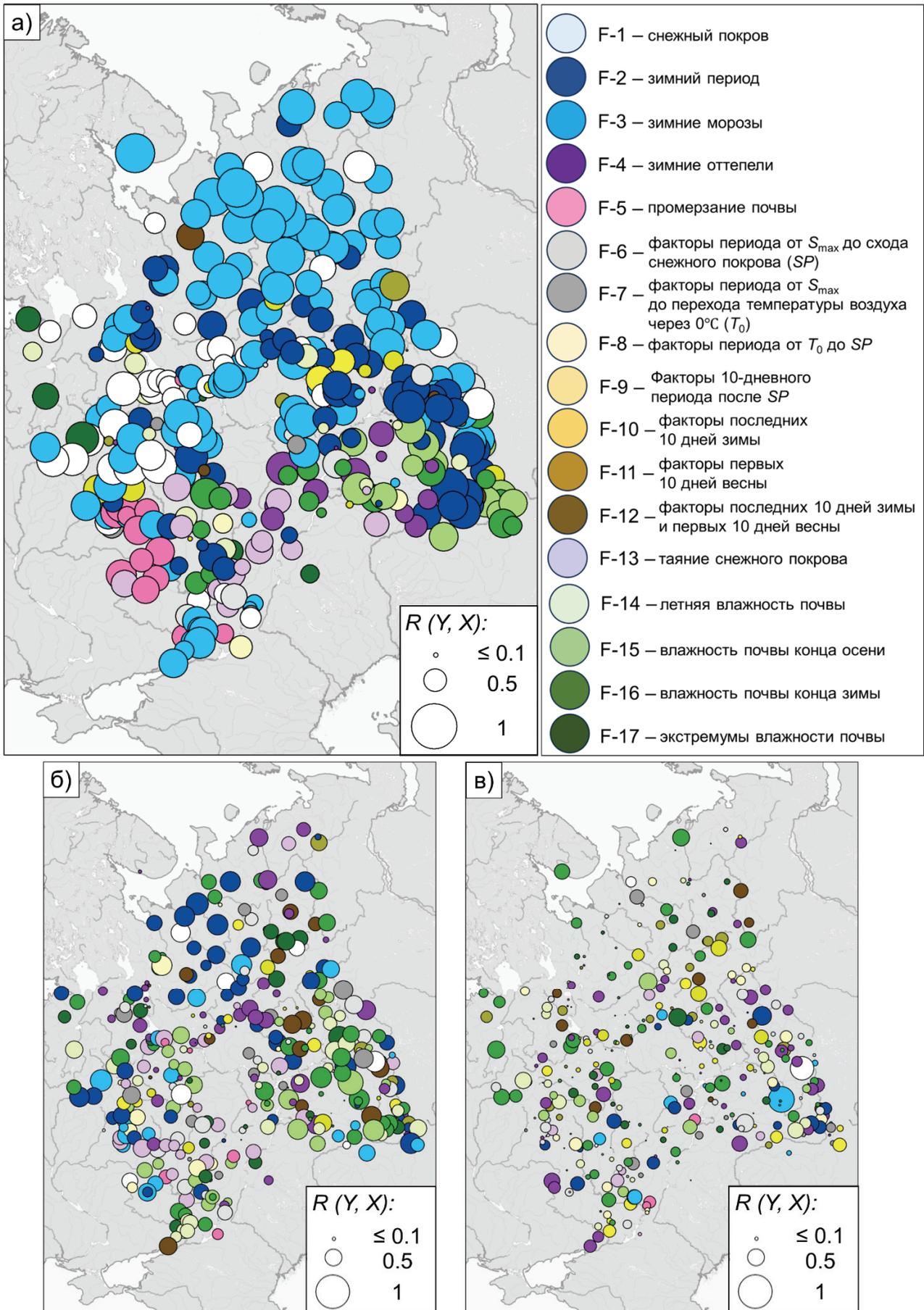


Рисунок 4 – ФФС-1 (а), ФФС-2 (б) и ФФС-3 (в) весеннего половодья по трехпараметрическим уравнениям (размер символа пропорционален модулю $R(Y, X)$)

Температура воздуха в роли ФФС-1 выступает в 17%, ФФС-2 – в 25% и ФФС-3 – в 58% случаев. В роли первых двух факторов она локализована на юге ЕТР характеристиками групп $F-2$ и $F-3$. В роли ФФС-3 ее ареал смещается к северу от Северных Увалов, а группы меняются на $F-8-F-11$. Среди 53 характеристик температуры воздуха в уравнениях отсутствует доминирующая. Как правило, она представлена характеристиками отрицательных температур, стандартным отклонением и коэффициентом вариации.

Вместе с тем, характеристики скорости таяния снежного покрова в качестве ФФС присутствуют в уравнениях для азональных рек Дона, Оки, Верхней Волги и севера ЕТР, где почвогрунты характеризуются большой впитывающей способностью и минимальным почвенным и грунтовым стоком.

Прежде мало анализируемые в литературе сроки и продолжительность явлений выступают ФФС для 14 и 25% рек. Для ЕТР они представлены сроками формирования максимальной (Ловать и Вычегда) и минимальной (Яренга и Луга) влажности почвы или ее класса (Ворона и Мезень), установления (Дон у ст-цы Казанская и Белая у с. Шупша) и схода (Кема и Северский Донец) снежного покрова, начала зимы (Тосна и Тихая Сосна). Более физически обосновано пространственное распределение параметров продолжительности явлений, представленных числом дней с промерзшей почвой (на Девиге и Чире), общей продолжительностью таяния снежного покрова (на Бузулуке и Битюге) и нормированной на общую продолжительностью его залегания (на Мокше и Буге), нормированной продолжительностью активного (Кутулук и Меша) и пассивного (Самара и Большой Караман) таяния.

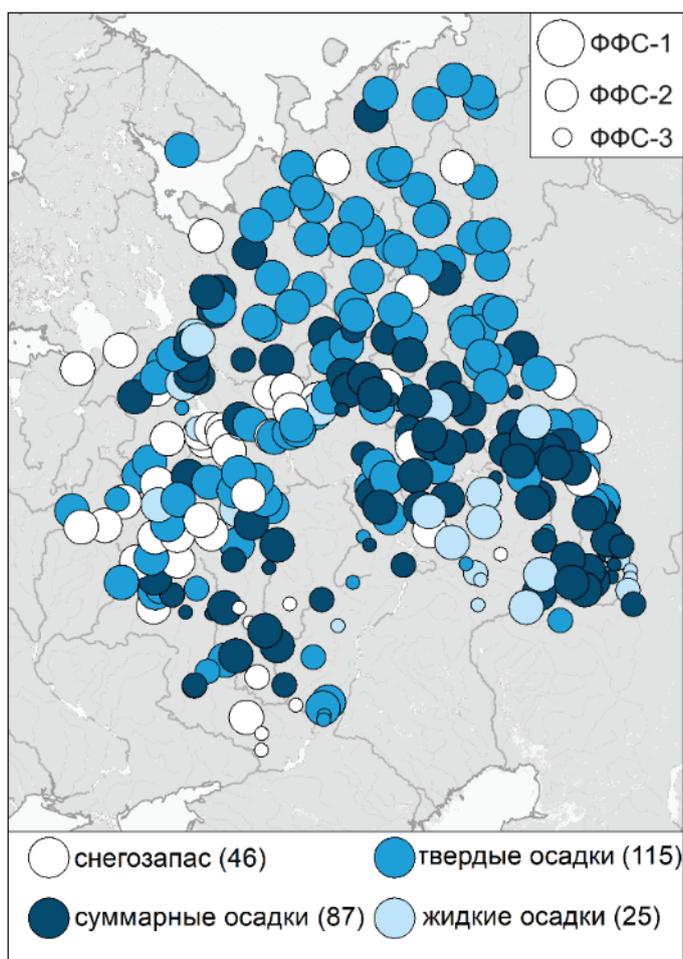


Рисунок 5 – Уравнения E_{best} , включающие приходную составляющую

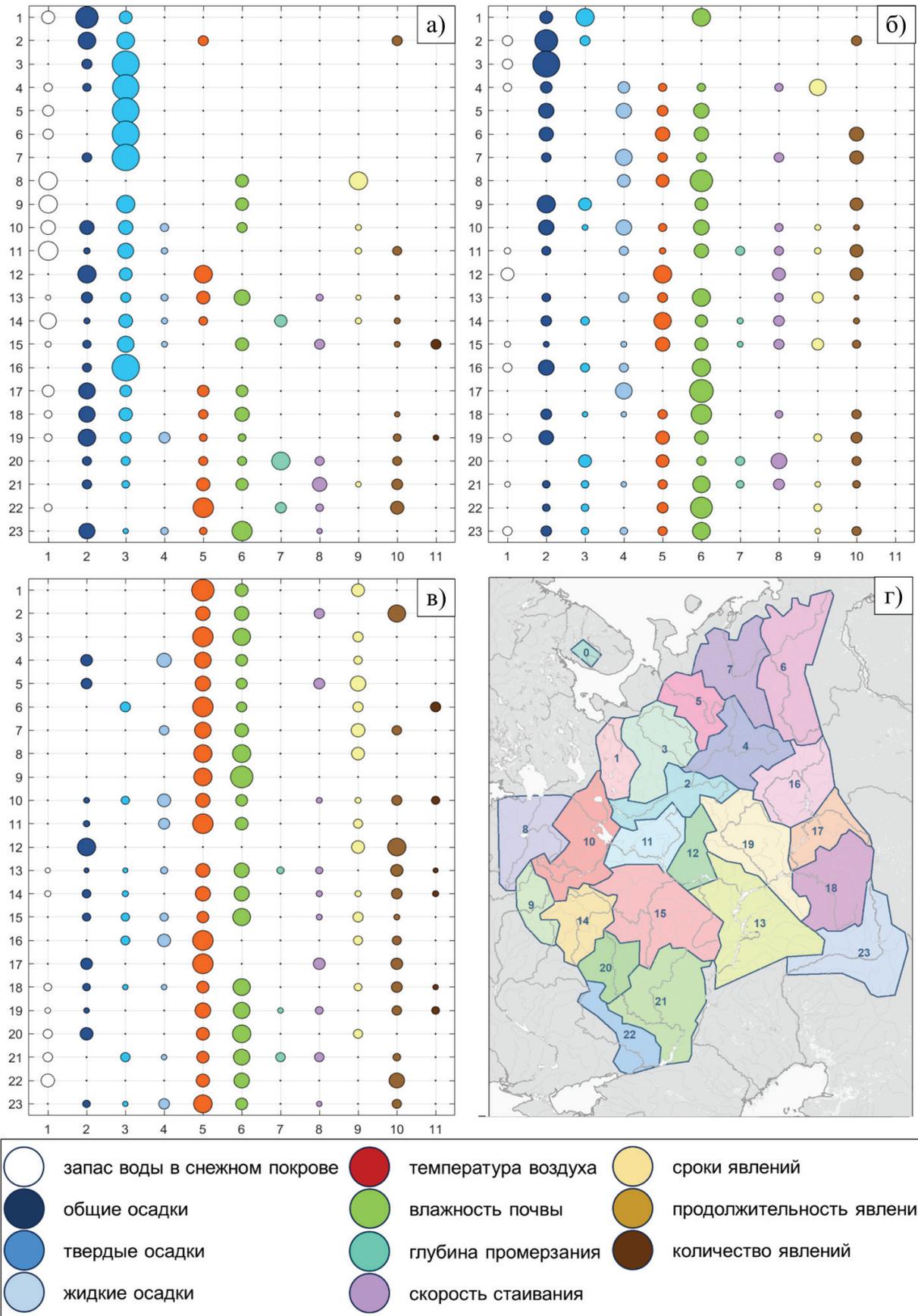


Рисунок 6 – Частота появления характеристик различных типов в роли ФФС-1 (а), ФФС-2 (б), ФФС-3 (в) в уравнениях вида E_{best} для 24 подбассейнов (г) в пределах ЕТР (номера подбассейнов по вертикали). Размер символа пропорционален количеству случаев появления характеристики в пределах подбассейна

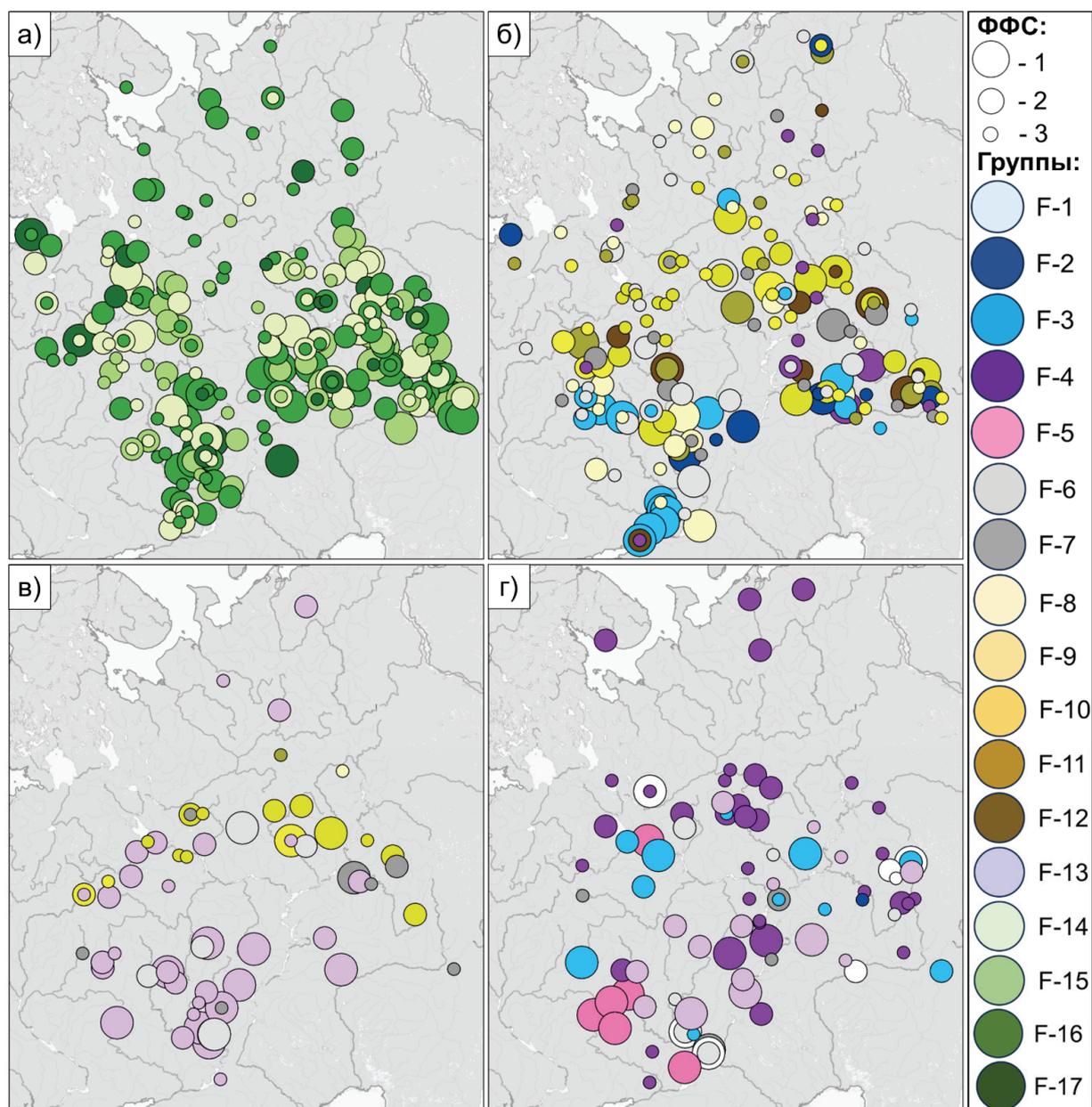


Рисунок 7 – Влажность почвы (а), температура воздуха (б), температурные тренды и скорость таяния (в), продолжительность явлений (г) как ФФС разных рангов

Качество полученного набора статистических уравнений оценивается как хорошее: среднее значение множественного коэффициента корреляции MR составило 0,80 с изменением в диапазоне от 0,61 для малых рек центра и юга ЕТР до 0,93 на Пинеге. Среднее значение среднеквадратической ошибки $RMSE$ составило 19 мм: от 4 мм в бассейнах Дона и Нижней Волги до 51 мм на склонах Уральских гор. Нормированные на среднее значение слоя стока половодья величины характеризуются субмеридиональным направлением с наиболее резким ростом в зоне недостаточного увлажнения и повышенной проницаемостью почв.

Кроме набора уравнений вида E_{best} для большинства рек получены трехпараметрические квазиводнобалансовые уравнения E_{wb} , включавшие в себя запас воды в снеге группы $F-1$, глубину промерзания почвы группы $F-5$ и влажность почвы групп $F-14-F-17$. Уравнения вида E_{best} по тесноте связи в среднем на 0,1–0,2 превосходят уравнения E_{wb} , а пространственное распределение этой разности схоже с распределением доминирующего вида приходной составляющей и согласуется с результатами анализа парных связей стока с приходными компонентами. Среднеквадратическая ошибка для статистического подхода снижается на 3,7 мм в сравнении с квазиводнобалансовым, а в горных районах – на 6 мм и более, а ее градиент имеет восточное и северо-восточное направление. Нормированные на средний сток ошибки указывают на улучшение качества описания слоя стока половодья в среднем на 5% и до 10–15% – в зоне недостаточного увлажнения.

Уравнения вида E_{best} , как и уравнения E_{wb} , требуют регулярной актуализации в условиях изменения климата. Этот результат получен на основе оценки устойчивости состава уравнений вида E_{best} с 1950 г. с 38-летним скользящим осреднением. Установлено, что развитие продолжительных группировок лет по водности или климатические тренды оказывают непосредственное влияние на состав уравнений вида E_{best} , а также их показатели качества MR и $RMSE$. На примере р. Дон у г. Задонск показана полная смена состава характеристик уравнений и на 2/3 – групп, к которым они относятся. При этом в начале XXI в. понижался ранг и у глубины промерзания, выступающей ФФС-1.

По данным 124 водосборов на 48 реках диагностировано отсутствие устойчивости состава факторов в пределах речного бассейна. Полностью стабильного состава уравнений сверху вниз по течению не диагностировано ни для одной реки. Для всех рек отмечается смена параметра внутри группы при сохранении ранга, смена параметра и группы при сохранении ранга, смена ранга при сохранении параметра и группы, а также полная смена состава ведущих факторов. Но закономерность их изменения не поддается описанию. Наименьшие изменения наблюдаются для Пинеги: в ФФС-2 сокращается на 10 дней период оценки влияющих сумм осадков. А для 13 рек (Клязьма, Молома, Сухона, Сысола, Мезень, Вашка, Печора, Ижма, Унжа, Кама, Иньва,

Быстрый Танып и Иловля) и 6 участков (Сакмара, Ока, Днепр, Вятка, Юрюзань, Уфа) повышенной устойчивостью характеризуется ФФС-1 – осадки за зимний период и сумма твердых осадков.

С увеличением площади водосбора не происходит закономерного изменения тесноты связи факторов со стоком. Так, на Урале и Северной Двине вклад ФФС-3 вниз по течению снижается, на Сухоне и Уфе – увеличивается, а на Печоре и Белой – меняется разнонаправленно.

Не прослеживается закономерности и относительно природных зон. Все это указывает на высокую значимость локальных особенностей формирования стока даже для зональных рек.

Следует отметить, что не все уравнения существенным образом отличаются от разработанных в течение XX в. Это указывает одновременно и на надежность проведенных исследований, так и на существенную подверженность процесса формирования стока половодья климатическим и антропогенным изменениям конца XX в. – начала XXI в.

В **Главе 6** полученные результаты объединены в виде районирования в целях визуализации основных рекомендаций по поиску оптимальных трехпараметрических статистических уравнений, которые могут быть положены в основу основных или уточняющих прогнозов, а также могут использоваться в качестве дополнения к традиционным схемам или результатам математического моделирования. Районирование создавалось на основе послойного анализа ФФС-1, ФФС-2 и ФФС-3. Основной фактор выражен заглавной римской цифрой, второй член – арабской цифрой в верхнем углу, рекомендованные третьи факторы перечислены снизу в порядке убывания частоты их появления слева направо (рис. 8).

По ФФС-1 в пределах ЕТР выделено 11 районов и 25 районов в их пределах – по ФФС-2. По третьему фактору ФФС-3 выделение районов в рамках выбранного экспертного подхода считается нецелесообразным в силу высокой пестроты поля. Полученное районирование в большинстве своем согласуется с картой трансформации водного режима [Фролова и др., 2020] и картой современных типов водного режима, полученной аналогичным синтетическим путем на основе анализа среднемесячных расходов воды и сезонных показателей стока.

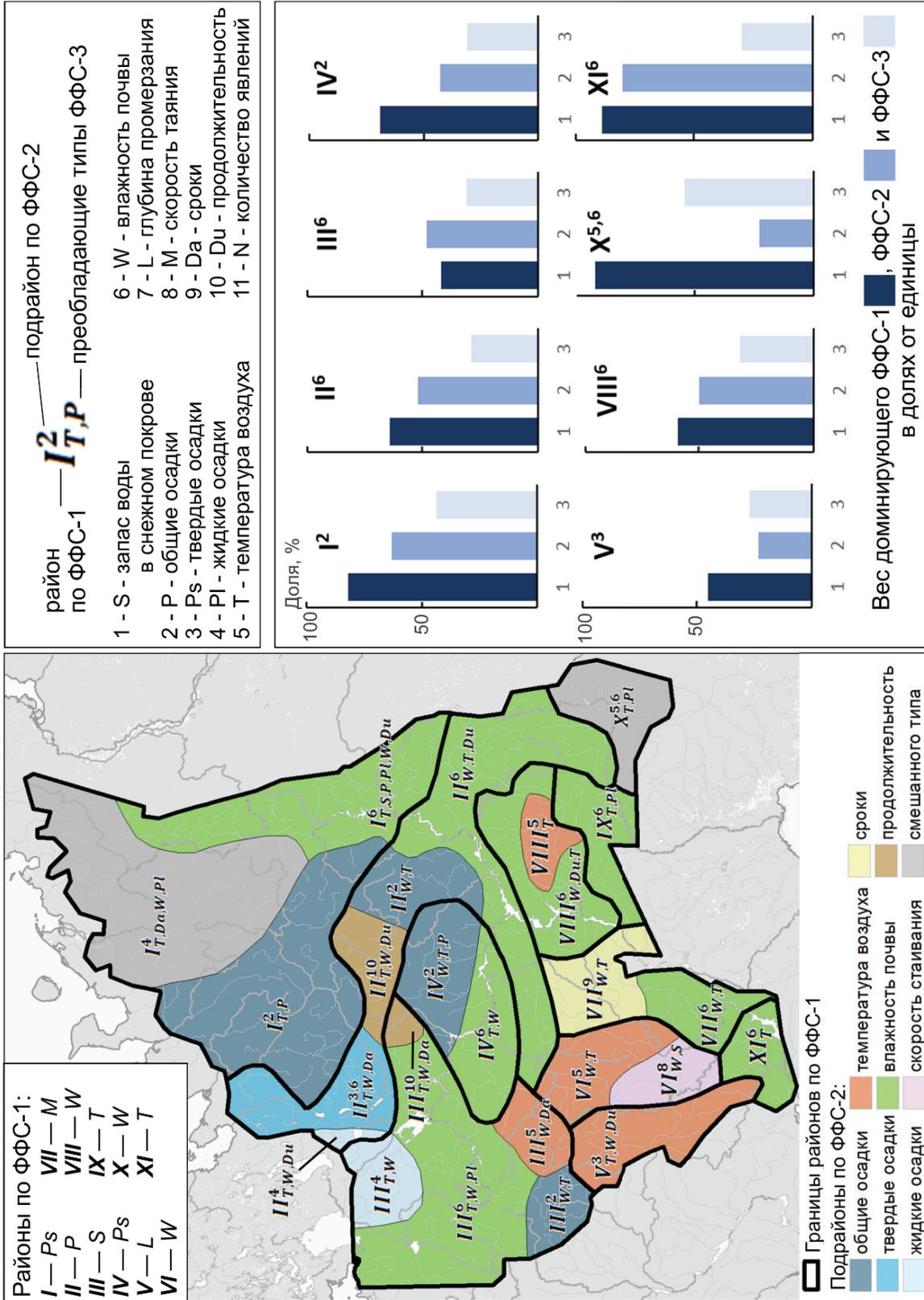


Рисунок 8 – Районирование ЕТР по факторам формирования слоя стока весеннего половодья на основе анализа трехпараметрических регрессионных уравнений и примеры относительного распределения доминирующих типов характеристик ФФС-1, ФФС-2 и ФФС-3

В I и IV районах, охватывающих водосборы Печоры, Мезени, большей части Северной Двины, Нижней Оки и Суры, Клязьмы и левобережной Волги от Унжи до Илети ФФС-1 выступают суммы твердых осадков за зиму. Район II с доминированием суммарных осадков за зиму в целом согласуется с выводами (рис. 5), протягиваясь от Онеги к верховьям Урала и Сакмары. Запас воды в снежном покрове как ФФС-1 представлен в районе III, охватывающем западный сектор ЕТР от Балтийского бассейна до Десны и Костромы. Влажность почвы в роли ФФС-1 доминирует в зоне недостаточного увлажнения, формируя сразу три района – VI, VIII и X. К югу от них расположились районы IX и XI с главенством температуры воздуха.

Влажность почвы в роли ФФС-2 представлена в центральной и восточной частях ЕТР, а также на Нижнем Дону и Урале. К северу от этой области вторым фактором чаще выступают с запада на северо-восток жидкие осадки, твердые осадки, общие осадки и запас воды в снежном покрове. Южнее расположились области влияния температуры воздуха, скорости таяния и сроков явлений.

Результаты районирования показывают высокую степень изменчивости вклада главного, второстепенного и третьестепенного ФФС весеннего половодья даже в случае доминирования определенного типа параметра по физическому смыслу. Так, практически однородны по ФФС-1 районы I, X и XI: выделенный главный фактор представлен в них в 82, 92 и 89% соответственно. В районах III, V, VI, VII выделенный тип главного фактора представлен в 42–45% случаев, в VIII – в 59%, во II, IV и IX – в 63–69%. Наименьшая пестрота по ФФС-2 отмечается в подрайонах II⁴, II¹⁰, III², III⁵, VIII⁵ и XI⁶, а для ФФС-3 – в подрайонах III², VII⁹ и X^{5,6}. Среди подрайонов наиболее однородны в среднем XI⁶ на Нижнем Дону и I², охватывающий большую часть бассейнов Северной Двины и Мезени. Одновременно с этим отмечается большая доля районов и подрайонов, где, несмотря на выделение доминирующих по физическому смыслу предикторов, распределения близки к смешанным. В них число иных факторов достигает 50% или превышает эту величину. Данные результаты рекомендуется учитывать при анализе условий формирования стока весеннего половодья, особенно при построении

региональных зависимостей или переносе полученных выводов на расположенные рядом реки.

В **Заключении** показано, что основным итогом работы является обобщение знаний о процессах формирования весеннего половодья и разработка подхода к анализу действующих факторов формирования стока половодья в условиях нестационарного климата.

В рамках работы проведена оценка современных гидрометеорологических данных, в частности, о слое стока и факторах формирования. Созданный массив данных лег в основу комплексного анализа трансформации половодья. Применение предложенного подхода при дальнейшем изменении климата позволит получать актуальные результаты о факторах формирования стока половодья и в будущем.

Основные выводы исследования заключены в следующем.

1) Предложена модернизированная классификация факторов формирования весеннего половодья, в которой место каждого фактора определяется его ролью в водном балансе, динамичностью, характером воздействия и подверженностью влияния совместно с другими факторами.

2) Сформирована база гидрометеорологических данных, включающая данные о весеннем половодье по 348 гидрологическим постам на 267 реках и более 200 метеорологических характеристик, осредненных для каждого водосбора по данным реанализа ERA5.

3) Диагностирована неоднородная по времени трансформация пространственного распределения параметров слоя стока весеннего половодья. Она включает в себя значительное смещение к северу изолиний среднего стока и увеличение изменчивости коэффициента вариации и отношения коэффициента асимметрии к нему. Основной причиной изменений условий формирования весеннего половодья явился характер синоптических процессов на границе зимы и весны.

4) Показан вклад более 200 характеристик в дисперсию слоя стока весеннего половодья. Например, установлено, что 14–17% изменчивости стока описывается характеристиками текущих весенних процессов.

5) Установлено, что среди приходных факторов в пределах ЕТР наибольшая дисперсия слоя стока половодья в 60% случаев определяется суммой твердых осадков за зиму, в 30% случаев – суммой осадков за зимний период, а запасом воды в снежном покрове – лишь в 10% случаев. Разница парных коэффициентов корреляции со слоем стока весеннего половодья между разными факторами может достигать 0,3 и более.

6) Показано, что влажность почвы может быть как первым по тесноте связи, так вторым и третьим фактором формирования стока. Наибольшая ее значимость достигается в зоне недостаточного увлажнения. Для всей ЕТР установлено, что на фоне современных неустойчивых зим применяемая в настоящее время в методиках гидрологического прогнозирования влажность почвы перед установлением снежного покрова описывает лишь 15% изменчивости слоя стока весеннего половодья. В то же время влажность почвы перед началом половодья описывает 20% изменчивости в бассейнах Дона, Нижней Волги, Белой и Урала.

7) Чем южнее, тем важнее становится роль температуры воздуха как фактора формирования стока. Температура воздуха, температурные тренды и скорость таяния снежного покрова присутствуют в половине уравнений изученных речных водосборов.

8) Диагностировано, что среди характеристик таяния снежного покрова значимую роль играет не только его активная фаза, но и пассивное, а также общее таяние. Так, например, пассивное таяние преобладает в бассейне р. Дон, а на Верхней Волге, Верхней Оке, левобережных притоках Горьковского вдхр. и Вятке – общее таяние. В то же время, в восточном и северном секторах ЕТР больший вес имеют оттепели, а в правобережной части бассейне Дона, на реках южной части Урала и его предгорий, а также в бассейне Вятки – глубина промерзания почвы.

9) Показана значимость сроков и продолжительность явлений. В зоне недостаточного увлажнения продолжительность залегания снежного покрова, характерные даты и температура воздуха зимой тесно связаны со стоком весеннего половодья в отличие от классических приходных составляющих.

Продолжительность оттепелей и промерзания почвы значимы для рек бассейнов Верхней Оки, рек правобережной части бассейна Дона, верхнего течения Белой и левобережья Урала.

10) Установлена значительная пространственная пестрота первой триады факторов формирования весеннего половодья и отсутствие единых для ЕТР преобладающих факторов и их характеристик. Для ФФС-1 выделены районы доминирования влажности почвы (бассейны Нижней Волги, Нижней Камы и Белой, а также на Хопре и Урале в верхнем течении) и глубины промерзания (бассейн Дона). Высокая изменчивость первой триады факторов формирования стока наблюдается даже в рамках одного бассейна.

11) Зоне недостаточного увлажнения соответствует область, для которой условия подачи влаги к поверхности почвы в весенний период играют гораздо бóльшую значимость, нежели объем водоподачи. Отсюда в статистических уравнениях для рек этой зоны могут отсутствовать приходные составляющие.

12) Впервые представлено районирование ЕТР по факторам формирования стока половодья: на основе статистического анализа выделено 11 районов по главному фактору и 25 подрайонов по второстепенному.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Ефремова (Варенцова) Н.А.** Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории и его изменение / Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова (Варенцова) Н.А., Повалишников Е.С. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20. 1,96 п.л. ИФ РИНЦ = 0,54, доля участия 1/6.

2. **Efremova (Varentsova) N.A.** Hydrological hazards in Russia: Origin, classification, changes and risk assessment / Frolova N.L., Kireeva M.B., Magritckiy D.V., Bolgov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Dzhamalov R.G., Efremova (Varentsova) N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A. // Natural Hazards. 2017. Vol. 88. № 1. P. 103–131. 3,35 п.л. SJR = 3.3, доля участия 1/17.

3. **Варенцова Н.А.** Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость / Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Илич В.П., Сазонов А.А. // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 694–709. 1,85 п.л. ИФ РИНЦ = 1,51, доля участия 1/4. *Переводная версия:* **Varentsova N.A.** Forecasting water inflow into the Tsimlyansk Reservoir during spring flood under current climate conditions: Problems and reproducibility / Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A. // Water Resources. 2020. Vol. 47. № 6. P. 953–967. 1,73 п.л. SJR = 0.32, доля участия 1/4.

4. **Варенцова Н.А.** Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона / Варенцова Н.А., Гречушникова М.Г., Повалишникова Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 5. С. 91–108. 2,08 п.л. SJR = 0.26, доля участия 1/6.

5. **Варенцова Н.А.** Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений / Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28. 2,66 п.л. ИФ РИНЦ = 0,54, доля участия 1/3.

6. **Варенцова Н.А.** Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований / Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. Т. 384. № 2. С. 92–116. 2,89 п.л. ИФ РИНЦ = 0,98, доля участия 1/6.

7. **Варенцова Н.А.** Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона / Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. Т. 384. № 2. С. 117–146. 3,46 п.л. ИФ РИНЦ = 0,98, доля участия 1/6.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях:

8. **Варенцова Н.А.** Нормативно-правовые основы проектов определения границ зон затопления и существующие проблемы / Варенцова Н.А., Никифоров Д.А., Гранич П.С. // Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 11–12. С. 36–43. 0,92 п.л. ИФ РИНЦ = 0,29, доля участия 1/2.