

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Варенцова Наталья Александровна

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

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук, профессор
Фролова Наталья Леонидовна

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Весеннее половодье на реках Европейской территории России.....	9
1.1 Роль половодья в гидрологическом цикле рек ЕТР	9
1.2 Представления о факторах формирования стока в XX–XXI вв.	10
1.3 Актуализация классификации ФФС половодья	25
1.4 Современные тенденции изменения основных факторов формирования весеннего половодья	27
1.5 Современные тенденции изменения характеристик весеннего половодья	32
1.6 Проблемы прогнозирования в условиях нестационарного климата	36
Выводы к главе 1	38
Глава 2. Материалы и методы	40
2.1. Гидрометеорологическая освещенность территории исследования.....	40
2.2. Об особенностях используемых факторов	45
2.3. Методы исследования.....	46
Глава 3. Сток весеннего половодья и его изменение в современный период	49
3.1. Особенности изменения стока весеннего половодья	49
3.2. Основные факторы изменений	56
Глава 4. Регрессионный анализ слоя стока половодья с факторами его формирования	63
4.1. Связь стока половодья с характеристиками снежного покрова (группа <i>F-1</i>), зимнего периода (группа <i>F-2</i>) и зимних морозов (группа <i>F-3</i>)	63
4.2. Связь стока половодья с зимними оттепелями (группа <i>F-4</i>)	69
4.3. Связь стока половодья с промерзанием почвы (группа <i>F-5</i>)	71
4.4. Связь стока половодья с условиями конца зимы – начала весны (группы <i>F-6, F-7, F-8, F-9, F-10, F-11 И F-12</i>)	73
4.5. Связь стока половодья с таянием снежного покрова (группа <i>F-13</i>)	84
4.6. Связь стока половодья с влажностью почвы (группы <i>F-14, F-15, F-16 И F-17</i>).....	87
4.7. Некоторые выводы по факторам формирования стока половодья	94
Глава 5. Множественный регрессионный анализ стока половодья	104
5.1. Анализ двухпараметрических уравнений на примере крупных рек.....	104
5.2. Пространственный анализ факторов формирования весеннего половодья крупных	

регионов ЕТР на основе трехпараметрических уравнений	108
5.2.1. Главный фактор формирования стока	108
5.2.2. Второстепенный фактор формирования стока.....	115
5.2.3. Третий по значимости фактор формирования стока	118
5.2.4. Приходная составляющая трехпараметрических уравнений	121
5.2.5. Роль влажности почвы в статистических уравнениях.....	124
5.2.6. Роль глубины промерзания почвы в статистических уравнениях.....	126
5.2.7. Роль температуры воздуха и таяния снежного покрова в статистических уравнениях	126
5.2.8. Сроки и продолжительность явлений как фактор формирования стока в уравнениях	128
5.2.9. Надежность полученных статистических и квазиводнобалансовых уравнений.....	129
5.2.10. Основные выводы по анализу статистических уравнений.....	134
5.3. Масштабные эффекты факторов формирования стока на примере рек ЕТР	137
Глава 6. Региональные рекомендации по составлению уравнений, которые могут быть положены в основу уточняющих прогноз зависимостей	141
Заключение	154
Список сокращений и условных обозначений.....	156
Список литературы.....	157
Приложения	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. В современных климатических условиях весеннее половодье по-прежнему играет ведущую роль в водном режиме рек Европейской территории России (ЕТР). Несмотря на рост доли паводковой составляющей, именно оно напрямую определяет условия жизнедеятельности населения экономики в течение 1–3 месяцев и косвенно – на протяжении оставшейся части года. Как и остальные характеристики водного стока, его величины подвержены значительной пространственно-временной изменчивости под действием множества факторов. Подобные флуктуации редко совпадают с потребностями населения и экономики, которые, в свою очередь, нуждаются в квазиравномерном распределении водных ресурсов во времени и концентрации в пределах густонаселенных территорий.

В течение XX в. советскими гидрологами был разработан целый ряд физико-статистических методик прогнозирования элементов весеннего половодья – от максимальных расходов и уровней воды до декадного и суточного гидрографов. Они покрыли существовавшие на тот момент потребности в прогнозах, но на современном этапе их уже не хватает. 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. В настоящее время ведутся работы по корректировке действующих методик долгосрочного прогнозирования, разрабатываются методические указания по наблюдениям [Бельчиков и др., 2019]. Однако все это производится на базе сформированных в XX в. представлений о факторах формирования стока практически без изменений.

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 ввели описание потерь 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 интегральной 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 состояния 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.

Материалы и методы исследований. В основе работы лежат данные о слое стока весеннего половодья, метеорологических и агрометеорологических факторах. Для формирования базы данных о слое стока использованы ежедневные расходы воды с 348 гидрологических постов на 267 реках в пределах ЕТР. Они представляют бассейны Волги, Днепра, Дона, Онеги, Мезени, Печоры, Северной Двины, Урала и ряда малых и средних рек северо-западной части равнины. Анализируемые реки различаются по ландшафтно-гидрологическим, климатическим условиям и антропогенной нагрузке. База потенциальных факторов формирования стока создана на основе данных реанализа ERA5. Исходные метеорологические величины представлены полями регулярной сетки с шагом 0.25° по пространству и сутками по времени. На их основе рассчитаны 209 характеристик потенциальных ФФС, осредненных в пределах каждого речного водосбора. Все полученные оценки и проведенные расчеты реализованы для периода с 1980 по 2017 гг.

Анализ данных проведен с использованием различных методов статистического анализа.

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.

Степень достоверности и апробация результатов. Все исследования, проведенные в рамках диссертационного исследования, включая сбор, подготовку и анализ материалов,

выполнены при соблюдении необходимых требований и методик [Госстрой_России, 2004; Руководство..., 1989; Методические рекомендации..., 2005; Guide..., 2008].

Результаты работы включены в научные 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.).

Материалы и выводы работы 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» имени Л. Н. Карлина 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).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 7 из них – 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, включающих 104 отечественных и 35 зарубежных изданий.

Благодарности. Автор выражает благодарность М.И. 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 выпускникам кафедры 2011 г. за конструктивные советы при подготовке диссертации, сотрудникам структурных подразделений Росгидромета за помощь при сборе материалов и обмен опытом по вопросам формирования стока половодья и его прогнозированию. Также я благодарю свою семью за неоценимую помощь и поддержку в период работы над диссертацией, в частности М.И. Варенцова за помощь при автоматизации расчетов и Т.М. Варенцова за время, предоставленное для работы над диссертацией.

ГЛАВА 1. ВЕСЕННЕЕ ПОЛОВОДЬЕ НА РЕКАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

1.1 Роль половодья в гидрологическом цикле рек ЕТР

Весеннее половодье в пределах ЕТР – одна из важнейших фаз водного режима, формирующая от 40 до 100 % годового стока [Алексеевский и др., 2013; Кислов и др., 2008; Фролова и др., 2013]. Актуальность его изучения связана с ущербами от наводнений в этот период [Frolova et al., 2017]: затоплением населенных пунктов и линейных объектов (дороги, мосты, опоры ЛЭП и др.), повреждением сооружений ледяными полями, корчеходом и самим водным потоком.

Еще один вид ущербов от половодья, актуальный в последние десятилетия – низкий весенний сток, приводящий к сложностям при управлении водохозяйственными системами. Сток половодья в пределах ЕТР многие десятилетия рассматривается как источник водных ресурсов на протяжении всего года. Однако на фоне изменения климата растет повторяемость как единичных низких половодий, так и их серий, что неминуемо ведет к развитию маловодий и росту рисков нарушения водообеспечения населения и объектов экономики [Kreibich et al., 2022].

Третий вид современных угроз – поздние половодья, как правило, характеризующиеся или высокой интенсивностью развития, и большим паводковым стоком на спаде или после окончания половодья. Как правило, они приводят к необходимости формирования залповых сбросов у субъектов водного хозяйства, повышая общественные и экономические риски.

Только за последние 30 лет число опасных гидрологических явлений выросло практически в три раза [Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата, 2014]. Практически все южная и центральная части ЕТР по наводнениям относятся к районам средней и высокой степени опасности, низкая и незначительная опасность фиксируется лишь для бассейнов Северной Двины ниже Котласа, Мезени и Печоры [Гладкевич и др., 2012]. В случае маловодий пространственное распределение рисков и уязвимости объектов экономической инфраструктуры аналогично.

Адаптация к современным процессам и условиям формирования половодья может быть разной и с практической точки зрения включает в себя:

- 1) реализованные меры по защите от опасных половодий, включающие защитные дамбы, русловыправительные работы, модернизацию систем отвода стока;
- 2) разработка более строгой запрещающей нормативной документации, направленной на жесткий контроль застройки приречных территорий;
- 3) развитие системы раннего предупреждения опасности, включающей в себя

более детальные и обновленные методики прогноза как в пространственном, так и временном масштабе.

Большинство существующих методик прогноза характеристик весеннего половодья разрабатывались и апробировались на данных о климате начала – середины XX в. Асинхронные и асинфазные изменения метеорологических, агрометеорологических и гидрологических факторов формирования стока (далее – ФФС) половодья привели к нарушению устойчивости их решений в бассейнах центра и юга ЕТР [Варенцова и др., 2020]. Поэтому в условиях современного изменения климата для улучшения прогнозных методик требуется расширение представлений о современных факторах формирования половодья и их характеристиках.

1.2 Представления о факторах формирования стока в XX–XXI вв.

Половодье – процесс многофакторный. На его развитие оказывают влияния условия весны и зимы, но в значительной степени – и предшествующий осенний период, а для ряда регионов доказана значимость предшествующих летних условий [Вершинина, 1977; Перминов, Смирнова, 2014]. Родоначальниками направления изучения ФФС половодья на рубеже XIX–XX вв. стали Г. Тарловский, Ю.В. Ланге, Р.П. Спарро, Е.А. Гейнц и Д.И. Кочерин [Комаров, 1959], а основным толчком к его развитию стало экстремально высокое половодье 1908 г. в бассейне Волги. В работах Е.А. Гейнца и Д.И. Кочерина впервые определены основные ФФС: установлено, что характеристики половодья (объем, максимальный расход воды, форма гидрографа, интенсивность роста) зависят от количества влаги, поступившей на водосбор и условий ее трансформации к замыкающему створу русла. В последующих работах Б.А. Аполлова, Т.И. Великановой, Л.К. Вершининой, Е.С. Змиевой, Г.П. Калинина, В.Д. Комарова, В.М. Мишона, В.Н. Паршина, В.В. Рахманова и других советских и российских гидрологов перечень влияющих на половодье факторов значительно расширяется (рисунок 1.1) [Аполлов и др., 1974; Великанова, 1967; Вершинина, Крестовский, 1980; Змиева, 1955; Комаров, 1959; Мишон и др., 2005а; Паршин, Салов, 1955; Рахманов, 1962; Рахманов, 1981; Рахманов, 1988].

В соответствие с классическими представлениями, ФФС половодья подразделяют по их роли в водном балансе на приходные и расходные, по типу воздействия – на прямые и косвенные, по времени воздействия – на квазипостоянные и динамические. К приходным факторам относят генетически разные составляющие стока – талые, дождевые и подземные воды. Доля талого стока напрямую зависит от запасов воды в снежном покрове на водосборе. Вклад дождевых вод характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью. Их значимость прямо пропорциональна величине запаса воды в снежном покрове: с юга на север европейской территории России доля дождевого стока возрастает с 10 % в бассейне Среднего и

Нижнего Дона до 40–50 % в бассейне рр. Северная Двина и Печора. Доля подземного стока в объеме половодья определяется гидрогеологическими условиями, но редко превышает 5–10 % от суммарного стока [Кислов и др., 2008]. К расходным факторам относят испарение, поверхностное задержание и пополнение влаги в толще почвогрунтов, включая потери в зоне аэрации, на пополнение запасов подземных и грунтовых вод.

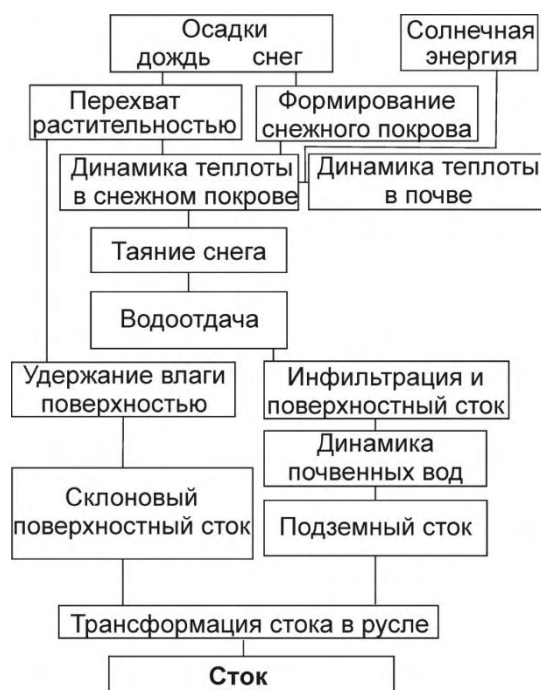


Рисунок 1.1 – Общие представления о факторах формирования стока половодья (по опубликованным работам в XX в.) [Виноградов, 1988]

Прямые факторы связаны с общим запасом влаги на водосборе, в том числе с запасом воды в снеге, ледяной корке и в почвогрунтах, с осадками в период снеготаяния. Информация по косвенным факторам привлекается при невозможности прямых измерений или низкой репрезентативности контактных измерений. Как правило, с их помощью описываются дружность весны, влияние квазипостоянных факторов, включая тип почвы, растительности, рельефа, впитывающей способности водосбора и т. д. [Владимиров, 2009; Гареев и др., 2015; Субботин, 1978]. Последняя с середины 1950-х гг. благодаря исследованиям В.Д. Комарова, Е.С. Змиевой и Т.Т. Макаровой описывается через влажность и глубину промерзания почвы [Вершинина, 1977; Руководство..., 1989]. Эти факторы не являются напрямую стокоформирующими, но ряд их сочетаний может приводить как к увеличению, так и к сокращению потерь стока. Из этого следует, что по существующей воднобалансовой классификации данные факторы не могут быть отнесены ни к одной из групп.

Динамические факторы, такие как характеристики метеорологического, гидрологического и гидрогеологического режимов, отвечают за изменчивость стока половодья

во времени. К ним, как правило, относят осадки, температуру воздуха, уровень грунтовых вод, сток межени и паводков, предшествовавших половодью, и другие. Квазипостоянными на этом фоне выступают характеристики подстилающей поверхности, в масштабах десятилетий редко претерпевающие значимые изменения (размер и форма речного водосбора, геологическое строение, почвогрунты и их характеристики, растительность, распространение болот и озер, рельеф и фильтрационный режим территории, естественные аккумуляторы стока и источники дополнительного питания, виды землепользования). Они в основном отвечают за пространственное перераспределение выпадающих осадков, задержание талых вод на поверхности и в толще водосбора, испарение и время добегания склонового и руслового стока [Аполлов и др., 1974; Попов, 1963]. Примечательно, что в [Многолетние..., 2021] к свойствам подстилающей поверхности относят влажность и глубину промерзания почвы.

Особое место в структуре формирования стока принадлежит антропогенным факторам: изъятию вод на коммунальные, промышленные и сельскохозяйственные нужды, энергетику и транспорт, преобразованию водосбора и русел рек (включая, современные программы оздоровления рек), а также активным воздействиям на ФФС половодья и так далее. Каждый вид хозяйственной деятельности оказывает влияние на внутригодовую неравномерность стока в целом и его отдельных фаз, величину подземного стока или скорость добегания.

Для оценки влияния на сток половодья вышеперечисленных факторов использовались количественные и качественные характеристики. На набор факторов всегда влиял выбор метода исследований: физико-математического, воднобалансового или статистического. В основу физико-математического подхода заложены общие представления о том, что каждый процесс на речном водосборе можно описать уравнением, основанном на теоретических физико-математических или экспериментально-эмпирических выводах. В XX в. большинство из них легли в основу современных гидрологических моделей. К настоящему времени значительные достижения в моделировании стока имеют научные группы под руководством Д.А. Буракова, Ю.Б. Виноградова, Б.И. Гарцмана, А.Н. Гельфана, Е.М. Гусева, С.А. Кондратьева, В.И. Корня, Л.С. Кучмента, Ю.Г. Мотовилова и др. Методы физико-математического моделирования применяются чаще для изучения и прогнозирования водного стока [Бельчиков и др., 2019; Виноградов, 1988; Кучмент и др., 1983].

Частным случаем физико-математического подхода является представление о речном водосборе, как о системе с неравномерным распределением емкости и переменной инфильтрационной способностью. В основе этого подхода лежат интегральные полуэмпирические уравнения емкостного и инфильтрационно-емкостного типов водопоглощения, которые стали основой физико-статистических методов прогнозирования. Эти подходы легли в основу прогнозов притока воды к Цимлянскому водохранилищу и потерь

талых вод в левобережной части Нижнего Дона [Быстров, 1980; Вершинина, 1977]. Однако для северной части ЕТР представленные схематизации оказались неприменимы [Бураков, Литвинова, 2010].

Наибольшая эффективность применения подобных уравнений достигается при задании точного объема водоподачи на водосбор. Однако низкая плотность сети наблюдений за влажностью и глубиной промерзания почвы и их природная высокая пространственная изменчивость зачастую не позволяют провести надежные оценки водопоглотительной способности водосбора даже для средних рек. Эти условия накладывают ограничения на применимость методов в качестве основных.

Предельным случаем упрощения физико-математического подхода можно назвать воднобалансовый. Он применим исключительно для водосборов лесной зоны избыточного увлажнения – для Западной Двины, Верхней Волги и Верхней Вятки [Крестовский, 1977; Руководство..., 1989]. В этих условиях водопоглотительная способность речных бассейнов определяется емкостью зоны аэрации, фильтрацией в грунтовые воды и испарением. Воднобалансовый подход физически обоснован, однако отсутствие простых и надежных схем определения потерь стока для любого речного водосбора в любых ландшафтных условиях накладывают ограничения на его использование.

В отличие от двух предыдущих статистический подход основан полностью на эмпирических зависимостях. Он приобрел распространенность из-за низкой плотности наблюдательной сети, сложности организации наблюдений, а также потребности экстраполяции полученных результатов на неизученные речные водосборы [Борщ и др., 2018].

Физически обоснованные статистические зависимости активно использовались для изучения факторов формирования и прогноза весеннего стока рек севера Восточно-Европейской равнины на протяжении всего XX в. Их результаты и выводы часто ложились в основу оперативных методик прогнозирования характеристик половодья. В настоящее время одной из ветвей статистического подхода в гидрологии стало применение методов машинного обучения [Li et al., 2021; Merz et al., 2020; Schmidt et al., 2020].

На протяжении длительного времени с использованием статистического метода проводился поиск ФФС и их комбинаций в целях детального описания стока половодья и последующего использования результатов для прогнозирования. Как правило, перечень анализируемых ФФС ограничивался запасом воды в снежном покрове и неравномерностью его залегания по площади водосбора, запасом воды в ледяной корке и ее распространенностью на водосборе, дополнительными осадками, глубиной промерзания и влажностью почвы. В зависимости от природной зоны и характерных ландшафтов учитывались и различные квазипостоянные факторы.

Запас воды в снежном покрове (S) или сумма осадков за зиму – наиболее важный прямой приходный динамический ФФС весеннего половодья. Накапливаемый в пределах полевых участков и овражно-балочной сети запас воды в снежном покрове формирует пик половодья, а для его объема значимы запасы в лесных массивах. Как правило, анализу подвергался только максимальный запас воды в снеге за весь зимний период ($S_{\max}$).

В пределах ЕТР в середине XX в. среднемноголетнее значение максимального запаса воды в снежном покрове варьировалось от 30–40 мм в низовьях Дона и Приазовье до 160–180 мм в верховьях Печоры, Вычегды и Камы. В лиственных и смешанных лесах, как правило, он на 10–20 % был выше, чем в полях, а в хвойных лесах – на 10–15 %. В западных и южных частях ЕТР на фоне повышенной частоты интенсивных оттепелей эта разница достигала 30 % и более [Великанова, 1967; Змиева, 1955; Попов, 1963; Рахманов, 1962; Руководство..., 1989]. В силу трудоемкости лесных снегомерных съемок, низкой надежности и репрезентативности получаемых результатов запас воды в снеге на залесенной части водосбора оценивался через эмпирический коэффициент [Соколов, 1962; Чурюлин и др., 2018].

Пространственная изменчивость запаса воды в снежном покрове наряду с другими метеорологическими элементами во многом определяется факторами подстилающей поверхности. В зимний период значительно влияние рельефа, в частности **высоты местности, экспозиции склонов и расчлененности**. Так, в лесостепной зоне ЕТР градиент изменения максимального запаса воды в снежном покрове по высоте в среднем равен 40 мм на 100 м высоты. Экспозиция склона определяет продолжительность залегания снежного покрова [Мишон и др., 2005b].

Расчлененность рельефа влияет на возможность перехвата снежного покрова на водосборе и характеризуется коэффициентом снегонакопления [Владимиров, 2009; Комаров, 1959; Мишон и др., 2005b; Попов, 1963]. Его наибольшие значения (до 10–20) присущи узким оврагам и балкам, особенно если в верхней части склоны более пологие, чем в нижней, и расположены перпендикулярно преобладающему направлению зимних ветров. Максимальных значений он достигает в малоснежные зимы, когда за счет снега овражно-балочной сети почти полностью формируется весеннее половодье [Вершинина, 1977].

Густоту овражно-балочной сети и первичных звеньев русловой сети нельзя отнести к квазипостоянным факторам. Так, в районах наибольшей антропогенной нагрузки – в степях и лесостепях ЕТР отмечены наиболее существенные изменения сначала XIX в. Сокращение первичного звена русловой сети привело к росту потерь стока на испарение и инфильтрацию, сокращению скорости добега талого стока [Авилова и др., 1998; Голосов, Панин, 1998; Иванова и др., 1996]. При этом существуют перспективы возобновления роста овражно-балочной сети в первой половине XXI в. [Веретенникова и др., 1998].

Интенсивность таяния снежного покрова ($i_{\text{сп}}$) начала рассматриваться как самостоятельная характеристика фактора с 1937 г. Единого мнения о вкладе интенсивности снеготаяния не было. Одни исследования указывали на ее слабую связь с характером половодья в отличие от продолжительности таяния особенно в границах лесной зоны [Комаров, 1959; Попов, 1963], другие – склонялись к обратному [Вершинина, 1974; Паршин, Салов, 1955].

Трудоемкость при проведении ее измерений не позволила организовать массовые наблюдения, а расчеты по методу теплового баланса имели большие погрешности. Даже современные наблюдения с привлечением спутниковой съемки для смоченного (тающего) снега показывают большие ошибки, хотя и таяние снеготаяния отслеживается вполне надежно [Чурюлин и др., 2018].

По результатам работ на воднобалансовых станциях ЕТР были установлены основные градации интенсивности таяния: низкая – 5–6 мм/сутки, средняя – 8–12 мм/сутки, высокая – более 15–17 мм/сутки. Предельная скорость снеготаяния в полях установлена в размере 25–30 мм/сутки, при проталинах – до 60 мм/сутки. В хвойном лесу интенсивность таяния оценивалась в размере до 10–12 мм/сутки, но не более 20 мм/сутки [Комаров, 1959; Попов, 1963].

Наибольшее распространение в XX в. получил метод, основанный на эмпирических зависимостях слоя стаивания от суммы положительных среднесуточных температур [Комаров, 1959; Линслей и др., 1962]. Так, для рр. Москва и Пехорка он составил 2,1 мм/сутки, для густого ельника – 1,4 мм/сутки, для ельника средней густоты и смешанных лесов – 1,8 мм/сутки, для редколесья – 3–4 мм/сутки. Последнее значение подтверждается работами П.П. Кузьмина. В поле коэффициент стаивания рекомендовалось принимать равным 5,2 мм/сутки. Также в ряде работ использовались максимальные срочные температуры воздуха [Вершинина, 1974].

Выпадение атмосферных осадков в твердой фазе в зимние и весенние месяцы формирует приходную составляющую половодья. В то же время, жидкие осадки весной в зависимости от их объема, интенсивности и типа поверхности, на которую они выпадают, могут относиться и к перераспределяющим факторам. Например, морось при определенных синоптических условиях может приводить к увеличению испарения и инфильтрации, обеспечивая постепенный сход снежной толщи без формирования ярко выраженной волны половодья.

Снегомерные съемки в северной части ЕТР до сих пор представляют собой крайне трудоемкую задачу, отчасти в силу обширных лесных массивов. По этой причине ряд исследователей в методиках прогноза характеристик половодья использовал данные об осадках, суммируя их за зимний период, но примеров подобных работ в XX в. крайне мало [Аполлов и др., 1974; Комаров, 1959].

Схожая схема принималась при учете еще одного фактора, который рассматривался как дополнительные потери – **зимних оттепелей**. Они оценивались в 3 мм на 1 °С положительной

среднесуточной температуры [Вершинина, 1977; Вершинина, Крестовский, 1980]. Подобные оценки – результат многолетних наблюдений на сети воднобалансовых станций ЕТР.

Осадки в период весеннего половодья (X) чаще всего характеризуют приходную составляющую. В середине XX в. их норма в бассейнах Дона, Днепра и Нижней Волги составляла 5–15 мм, в бассейнах Оки, Верхней Волги и Камы, а также в верховьях Северной Двины – 15–20 мм, в бассейне Печоры – до 40 мм [Алюшинская и др., 1962]. В отдельные годы в пределах всей ЕТР эта величина могла колебаться от 0 до 70 мм. Лишь часть этих осадков оценивалась как эффективная: 5–10 мм влаги перехватывалось смешанным лесом, 15–25 мм – хвойным [Комаров, 1959], а коэффициент стока осадков, выпавших на проталины, не превышал 0,2.

В работах гидрологов XX в. постулировался факт существенного влияния весенних осадков на половодье. Так, для рек бассейна Камы В.Д. Комаров показал значимое увеличение тесноты связи слоя стока весеннего половодья и запаса воды в снеге при привлечении данных о весенних осадках.

Гораздо больше работ посвящено суммарному влиянию запаса воды в снеге и дополнительных осадков на слой стока весеннего половодья Y . Одной из первых стала работа Е.А. Гейнца в 1903 г., в которой анализировалась подобная связь для р. Ока у г. Орел [Комаров, 1959]. В 1930-х гг. установлены одни из первых зависимостей для р. Волга у г. Ярославль и р. Ока у г. Калуга, а в 1940-х гг. – для рр. Кама, Вятка и Северная Двина. Надежность подобного двухпараметрического описания стока половодья отлична для разных географических зон. Наибольшая теснота связи в середине XX в. достигалась для севера лесной зоны (коэффициент корреляции $R = 0,8–0,9$). Отсюда был сделан вывод о главенстве роли суммы осадков и запаса воды в снежном покрове в формировании стока половодья [Алюшинская и др., 1962; Вершинина, 1977; Рахманов, 1977; Субботин, 1978]. В то же время, в центральных и западных районах степной и лесостепной зон, а также южной половины лесной зоны R характеризовался значениями 0,7–0,8, снижаясь на востоке степей, лесостепей и юга лесной зоны, а также на реках северо-запада до 0,4–0,6. Для рек этих территорий зависимость вида $Y = f(S_{\max} + X)$ оказалась недостаточной.

По этой причине, а также из-за больших ошибок определения членов уравнения водного баланса с 1930-х гг. возрастает интерес к изучению факторов, влияющих на потери стока в период весеннего половодья. В 1939–1947 гг. Комаров В.Д. ввел понятие **потерь стока p_0** – сумму величин полной поверхностной емкости бассейна и затрат талой воды на инфильтрацию в увлажненную мерзлую почву, обусловленных некоторым количеством открытых сверху некапиллярных пор в верхнем слое почвы и частичным оттаиванием ее на проталинах. В сущности, p_0 – это отклонение зависимости от прямой идеального соответствия между запасом воды в снежном покрове и стоком (Рисунок 1.2). И если верхняя часть зависимости была

рассчитана на основе наблюдавшихся половодий, то нижняя, соответствовавшая хорошо проницаемой почве, исключительно низкому коэффициенту стока или малым влагозапасам в снеге, обосновывалась зимними паводками.

Среднегодовое значение потерь p_0 возрастало с северо-запада на восток и юго-восток с 30 до 60 мм, достигая в отдельные годы более 100 мм [Вершинина, Змиева, 1980; Каримова, 1980]. Для рек лесной зоны большое внимание уделялось **лесной подстилке**. Её водоудерживающая способность оценивалась в размере до 20 мм, в заболоченных лесах – до 30 мм, а при наличии сфагнома и торфа – до 50 мм воды [Комаров, 1959; Молчанов, 1952]. То есть достижение оптимального увлажнения на севере требовало больше влаги, чем на юге ЕТР. При этом диагностировался рост средних потерь с увеличением разности полной и наименьшей полевой влагоемкости почв бассейна [Змиева, 1955], а также тесная связь с расчленённостью рельефа [Паршин, Салов, 1955] и типом ландшафта [Крестовский, Хатькова, 1980]. В то же время, потери на полевых и лесных участках водосборов – динамические факторы, поэтому они не могли быть заданы константой [Крестовский, Соколова, 1980].

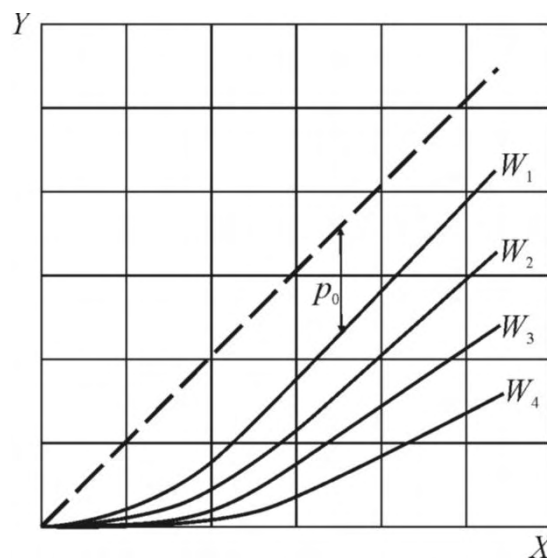


Рисунок 1.2 – Общий вид зависимости стока за половодье (Y) от запаса воды в снежном покрове (S), сложенного с осадками за время таяния (X) и осеннего увлажнения почвы (W_1-W_4 – разная влажность почвы), p_0 – отклонение зависимости от прямой идеального соответствия между запасом воды в снежном покрове и стоком [Комаров, 1959]

Параметр p_0 , несмотря на глубокие выводы о его факторообусловленности, не поддавался ни контактному измерению, ни строгому математическому описанию на основе измеряемых величин. Первые работы были направлены на определение его через коэффициент стока η , варьирующий для рек ЕТР в пределах 0,02–0,95. Е.Г. Попов предлагал использовать отношение интенсивности впитывания к поступлению талой воды на почву, что в первом приближении близко к $(1 - \eta)$. Еще раньше Е.А. Гейнц предложил использовать среднюю температуру зимы

как косвенную характеристику потерь стока.

Весомый вклад в развитие математического описания потерь стока внесли изменения программ наблюдений на государственной гидрометеорологической сети. Они положили начало массовым наблюдениям за снежным покровом, влажностью почвы, глубиной промерзания и другими показателями. На их основе были получены выводы о значимом влиянии **влажности и глубины промерзания почв** на потери талого стока в период весеннего половодья. В частности, в [Барабанов и др., 2018; Владимиров, 2008; Калюжный, Лавров, 2012; Субботин, 1978] показано:

- в лесной зоне и на заболоченных участках глубина промерзания почвы слабо влияет на сток половодья, водоупор создается за счет высокой влажности почвы;
- в лесостепи и степи наименьшие потери достигаются при большом промерзании и влажности почв, близкой к наименьшей полевой влагоемкости;
- в районах частого развития ледяной корки сток половодья тесно связан с глубиной промерзания почвы;
- в суглинистых почвах водонепроницаемый слой возникает, если во время таяния начальная влажность почвы составляет более 60 % общего объема пор, а в песчаных почвах – при значениях, близких к наименьшей полевой влагоемкости. В лесных массивах водонепроницаемый слой образуется крайне редко;
- для глинистых и суглинистых почв необходимо учитывать залесенность водосбора и распределение массивов леса по площади.

В результате к концу XX в. большинство математических описаний стока половодья сводилось к следующим постулатам:

- 1) слабо промерзшая почва обеспечивает рост потерь талых вод;
- 2) слабое увлажнение почвы осенью влечет увеличение потерь талых вод;
- 3) при стоке по мерзлой и хорошо увлажненной с осени почве потери талых вод невелики и практически не зависят от продолжительности таяния. В этих условиях наблюдается тесная связь стока за половодье с запасом воды в снежном покрове (с учетом осадков за время таяния);
- 4) для большинства рек ЕТР требуется совместный учет влияния промерзания и влажности почвы.

В то же время, в работах разных лет отмечается, что большие потери могут формироваться при сочетании малого увлажнения и большой глубины промерзания [Калюжный, Лавров, 2012; Калюжный, Лавров, 2016а].

Влажность почвогрунтов при достижении высоких значений формирует практически непроницаемый слой в почве. Низкая влажность почвы, анализируемая в отрыве от остальных факторов, указывает на большую фильтрационную способность почвогрунтов и, следовательно,

большие потери стока для половодья как фазы водного режима [Владимиров, 2009]. В то же время, суглинистые и глинистые почвы при значительном промерзании и интенсивной водоподаче талых вод за определенные интервалы времени образуют воздушные водоупоры, повышающие коэффициент стока до промачивания верхнего почвенного слоя [Варенцова и др., 2022b] .

Результаты контактных измерений в оперативной практике прогнозов применялись редко. Наиболее известной для ЕТР является методика прогноза притока воды к Цимлянскому водохранилищу [Вершинина, 1977; Вершинина, Крестовский, 1980] и прогнозы стока половодья в бассейне р. Белая [Каримова, 1980]. Трудоемкость измерений не позволяла создать густую наблюдательную сеть, достаточную для получения репрезентативных полей данных в условиях высокой пространственной изменчивости влажности почвы. Кроме того, невозможность проведения контактных измерений зимой ограничивала возможности оценки предполоводной влажности почвы. Последнее привело к тому, что в дальнейшем гидрологи опирались на величину предзимней влажности почвы, поскольку в климатических условиях середины XX в. она считалась примерно равной предполоводной. Она описывалась косвенной характеристикой [Аполлов и др., 1974; Вершинина, 1977; Руководство..., 1989]. Так, в 1935 г. Б.Д. Зайков на примере стока половодья р. Большой Узень у г. Новоузенск предложил зависимость:

$$y = 0,1X\sqrt{X - z}, \quad (1.1)$$

где X – сумма зимне-весенних осадков до окончания половодья, а z – испарение по графикам Мейера с 1 октября до установления снежного покрова [Комаров, 1959].

Этот способ косвенной оценки влагоемкости водосбора был популярен для водосборов лесной зоны, включая рр. Кама, Вятка и их притоков (рр. Летка, Кобра, Великая, Большая Холуница и Весляна). Альтернативой было использование величины осеннего паводочного стока рек или среднемесячных расходов воды в осенне-зимний период [Великанова, 1967; Каримова, 1980; Макарова, 1955; Рахманов, 1977]. В США были разработаны схемы, учитывающие осадки за каждый день в течение заданного периода с неким редуцированным коэффициентом [Линслей и др., 1962].

Наиболее распространенной стала оценка поверхностной влагоемкости $W_{пв}$, предложенная Е.С. Змиевой [Змиева, 1955]. Ее получали путем сложения:

- осадков за вычетом испарения по графикам Б.В. Полякова за 90 дней до даты перехода температуры воздуха через 0°C осенью;
- осадков за период от даты перехода через 0°C до даты образования устойчивого снежного покрова;
- количества воды, образующейся из снега в период оттепели и попадающей

на поверхность почвы.

В таком виде параметр вошел в ряд прогностических методик, включая прогнозы половодья на р. Оке и других реках нечерноземной зоны ЕТР [Змиева, 1977; Субботин, 1978].

Дополнительное увлажнение почвы в период интенсивных оттепелей предлагалось оценивать как разницу поступившей к поверхности почвы влаги (водоотдача из снежного покрова и сумма осадков за оттепель), поверхностного стока и количества образовавшейся ледяной корки [Вершинина, 1974].

Еще одна косвенная характеристика впитывающей способности водосбора – глубина промерзания почвы. В первой половине XX в. в пределах ЕТР средняя максимальная глубина промерзания почвы увеличивалась от 30–40 см в Приазовье до 60 см в бассейнах рр. Медведица, Хопер, Сула, Ворскла и до 80–100 см в бассейнах рр. Кама и Печора [Комаров, 1959; Разумова, 1953].

При промерзании происходят структурные изменения пористости почв, плотности, водопроницаемости и теплофизических характеристик. Считается, что в первую половину зимы она в основном определяется январскими морозами, если к этому времени высота снежного покрова не превышает 15–25 см [Леонович и др., 2015]. Именно в малоснежные морозные зимы формируются наибольшие аномалии глубины промерзания почвы.

Промерзание наиболее интенсивно развивается в суглинках, у которых малый размер пор и большая способность перехвата осенних осадков. В отдельных случаях в лесных массивах она может достигать 1 м [Владимиров, 2009].

Экспериментально было показано, что при глубине промерзания 60 см и более почва становится практически непроницаемой для талых вод, а до 25 см – практически не влияет на инфильтрацию. Наиболее резкие изменения фильтрационных свойств почвы происходит при глубине промерзания 30–45 см. Это предопределило использование параметра в основном для рек южной и центральной частей ЕТР.

Чаще всего при анализе ФФС половодья и разработке методов прогнозов использовали среднюю максимальную или среднюю на дату глубину промерзания почвы. Предпринималась попытка учета неравномерности промерзания почвы через кривые распределения по аналогии со снежным покровом [Змиева, 1977]. Так, для слабопромерзших участков коэффициент талого стока назначался равным 0,1. Подобный учет неоднородности глубины промерзания для ряда рек лесной зоны позволил вдвое снизить погрешность прогноза.

Среди прочих ФФС, которым уделялось внимание советскими гидрологами, отдельного внимания заслуживает **ледяная корка**, образующаяся в период оттепелей. Притертая ледяная корка способствует увеличению коэффициента талого стока весной. Аналогичный эффект достигается при выпадении жидких осадков весной на наст, а при оттепелях он сокращает потери

на испарение снежного покрова. Эти эффекты приобретают значимость при обширном развитии корки на водосборе или ее толщине 2–4 см, что наблюдалось достаточно редко. По этой причине, как правило, оценивался лишь запас воды в ледяной корке, который суммировался с запасом воды в снежном покрове.

Помимо перечисленных факторов, отмечалась связь характеристик половодья с **почвенным и растительным покровом**, характером рельефа, **глубиной залегания грунтовых вод**. В XX в. сделаны выводы о характере половодья для однородных физико-географических и ландшафтных зон [Великанова, 1967; Комаров, 1959; Паршин, Салов, 1955]. Большое число работ посвящено влиянию **леса**, в частности, многократному снижению интенсивности снеготаяния и увеличению потерь талого стока в лесных массивах, особенно на песчаных почвах [Крестовский, 1986; Соколов, 1962].

Отдельный блок факторов стока – антропогенные [Варенцова и др., 2021; Водогрецкий, 1990; Георгиади и др., 2020; Джамалов и др., 2017; Коронкевич и др., 2003; Мишон и др., 2005b; Фролова, 2019; Водные..., 2008]. Регулирование стока, водозабор и водосброс, переброска стока – прямые антропогенные факторы, существенно преобразующие водный режим рек не только в период половодья, но и всего гидрологического года. Влияние оказывают и косвенные факторы переменного воздействия, например, **сельскохозяйственное освоение земель**. Распашка речных водосборов под озимые и создание зяби под яровые культуры в осенний период ведет к увеличению пористости верхнего слоя почвы и ее фильтрационной способности. Коэффициент фильтрации в зимний период для возделываемых почв снижается лишь в 2–4 раза, тогда как на условно-естественных участках – до 10–12 раз. В то же время, распашка влияет и на коэффициент стока: повышая его для грунтовой составляющей и снижая для талых вод [Барабанов и др., 2018; Долгов и др., 2020; Кузник, 1962; Сафина, Голосов, 2018; Соломатин и др., 2007].

Еще один антропогенный фактор – **лесозащитные полосы**. Основная их функция заключается в снижении скорости ветра и увеличении влажности почв. В естественных условиях большая часть снега с метелевым переносом задерживалась в овражно-балочной сети. При создании лесозащитных полос на расстоянии 20–30-кратной высоты деревьев распространяются особые метеорологические условия и снегонакопление. Удержание снега в полях и сокращение сдува его в овражно-балочную сеть также ведет к увеличению времени добегания даже до первичных звеньев русловой сети. Идентичный эффект диагностирован для распашки склонов водосборов.

Лесозащитные полосы оказывают сильное воздействие на прилегающие к ним территории. Так, кроме высоты деревьев, на снегонакопление в зоне их влияния воздействие оказывают конструкция насаждений, положение относительно преобладающих направлений зимних ветров, характер и размеры снегосборной площади, расстояние

между полосами, а также синоптические условия зимы (скорость ветра, количество осадков и их изменчивость во времени). По результатам наблюдений в заповеднике Каменная Степь установлены закономерности снегонакопления внутри полностью взаимодействующей системы лесных полос и разобщенных систем [Мишон и др., 2005а].

Интегральное влияние распахки и создания лесозащитных полос породило предложения по возможности управления инфильтрацией, глубиной промерзания и равномерностью распределения снежного покрова [Барабанов, 2012].

Влияние леса на весенний сток проявляется и при его сведении. Установлено, что при неизменности климата рубки леса с последующим его восстановлением приводят к росту весеннего стока в Нечерноземной зоне ЕТР в пределах 5–10 % на крупных и средних реках и до 25 % – на малых реках [Крестовский, 1977].

Советские и российские гидрологи анализировали большое число факторов формирования стока весеннего половодья: прямые и косвенные, природные и антропогенные, квазипостоянные и динамические. Но большинство из них до настоящего времени не поддаются количественной оценке либо в силу отсутствия соответствующих физико-математических моделей, либо в силу недоступности соответствующих данных.

Мультифакторные оценки характеристик половодья. Одни из первых статистических уравнений имели простой вид: сток половодья увязывался с запасом воды в снеге или эффективными осадками (максимальный запас воды в снежном покрове, сложенный с осадками на период половодья). Но привлечение двух и более факторов при описании слоя стока весеннего половодья, как правило, существенно повышало надежность получаемых зависимостей. К 1920–1930 гг. в качестве дополнительных косвенных характеристик начинает применяться средняя температура воздуха зимой и осадки за сентябрь предшествующего года.

Общий вид зависимостей, которыми пользуются и по сей день, был сформирован в 1940–1950 гг. В эти же сроки активное развитие получили территориальные методы прогнозирования. Считается, что их общей физической основой были метод водного баланса и закономерности движения талых вод в толще почвогрунтов, но реализованы они были квазистатистическим методом. Наиболее распространенную ее форму в 1955 г. практически одновременно предложили Е.С. Змиева, Т.Т. Макарова и В.Д. Комаров, опиравшиеся на успешность его применения при оценке потерь на Каме, Вятке и Белой, а также реках Заволжья:

$$Y = f(S + X, W_{\text{ПВ}} \cdot \frac{L}{50}), \quad (1.2)$$

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

Выражение $W_{\text{ПВ}} \cdot \frac{L}{50}$ описывает количество продуктивной влаги в почве, превратившееся в лед.

Сравнительно надежные зависимости такого вида были получены для р. Медведица (приток р. Дон), рек бассейнов Оки, Белой, Сулы [Змиева, 1955; Каримова, 1980; Комаров, 1959; Макарова, 1955; Паршин, Салов, 1955]. В зависимости от природной зоны и ландшафтных условий её внешний вид претерпевал изменения. Так, для степных и лесостепных водосборов Дона, Оки и рек южного Заволжья при отсутствии связи стока половодья с осенней влажностью почв и уровнем грунтовых вод зависимость выглядела следующим образом:

$$Y = f(S + X, \zeta, L, i_{\text{сп}}), \quad (1.3)$$

где S – запасы воды в снеге, X – осадки за время снеготаяния, ζ – льдистость почвы (в баллах), L – глубина промерзания, $i_{\text{сп}}$ – интенсивность таяния.

Для рек севера и лесной зоны ЕТР в зависимости, как правило, отсутствовала глубина промерзания, так как в середине XX в. промерзание почвы здесь практически ежегодно превышало 60 см [Каримова, 1980; Крестовский, Хатькова, 1980]:

$$Y = f(S + X, W), \quad (1.4)$$

где W – осеннее увлажнение почвы. При оценке увлажнения водосбора по формуле Е.С. Змиевой для сильно залесенных водосборов рассчитывалась сумма осадков с 1 августа до установления снежного покрова. Альтернативный подход для таких водосборов заключался в привлечении данных о стоке воды за февраль [Макарова, 1950].

Были распространены и зависимости вида $Y = f(S+X)$ при условии «оптимальных» показателей влажности и глубины промерзания почвы. Так, для р. Москвы оптимальная влажность почвы принималась ≥ 65 мм, а глубина промерзания ≥ 60 см [Комаров, 1959]. При этом теснота связи R повысилась до 0,92, а продолжительность таяния не оказывала влияния на величину потерь стока.

Еще один вид статистических зависимостей имеет вид [Руководство..., 1989]:

$$Y = (S + X) - p_0 th \frac{X}{p_0}, \quad (1.5)$$

где p_0 – косвенная характеристика потерь, связанная с типом почвы и предзимнего увлажнения. Она определяется через экспоненциальную связь с увлажнением почвы при условии промерзания почвы более чем на 60 см. Анализ половодья по уравнению такого вида реализован В.Д. Комаровым на примере рек степного Заволжья [Комаров, 1959].

Анализ трудов советских и российских гидрологов показывает, что в большинстве из них применяются схожие подходы к описанию слоя стока половодья: он рассматривается как функция запаса воды в снежном покрове, влажности и глубины промерзания почвы. Среди иных динамических факторов встречаются ледяная корка, сумма температур за оттепель, меженный сток рек [Вершинина, Крестовский, 1980; Каримова, 1980]. Практически повсеместно

указывается на большую зависимость от весенних условий, но на практике чаще всего используется норма суммы осадков за период развития половодья. Причем эта норма распространяется одинаково на малые, средние и крупные реки. В ряде работ качественным коэффициентом выступала дружность весны [Руководство..., 1989]. Также предлагалось учитывать произведение дефицита влажности на глубину оттаивания почвы на ранних проталинах в момент освобождения половины водосбора от снежного покрова [Змиева, 1955].

Зарубежные исследования XX–XXI в. в большинстве своем подтверждают полученные выводы [Déry et al., 2009; Prowse et al., 2006; Walker, 2019]. Основными факторами формирования стока весеннего половодья выступают приходные (твердые и жидкие осадки) и расходные (испарение, эвапотранспирация, влажность почвы и уровень грунтовых вод) составляющие [Blöschl et al., 2019; Davie, 2008; Guide..., 2008].

Для зарубежных исследований существенным отличием в последние десятилетия является минимизация использования натурных наблюдений. Всемирной метеорологической организацией еще в начале 1990-х гг. в силу низкой репрезентативности результатов ряда контактных измерений рекомендовано использование альтернативных источников информации. Так, для количественной оценки запаса воды в снежном покрове предлагается прибегать к результатам моделирования, данным реанализа и спутникового мониторинга, аэрофотосъемке [Burn, Whitfield, 2018; Partasenok et al., 2014]. Оценка испарения допускается прямыми методами и косвенными – через коротковолновую или длинноволновую радиацию, температуру воздуха и поверхности воды, влажность воздуха и давление водяного пара, скорость ветра. Для оценки влажности почвы на водосборе помимо прямых методов рекомендовано использование тензометрической съемки, съемки по методу электрического сопротивления, спутниковой съемки в видимом и инфракрасном спектрах, микроволновой и гамма-съемок. В то же время, для оценки потерь половодья ВМО рекомендует использование вероятностного или климатологического подходов [Jones et al., 2015; Guide..., 1994].

Примечательно, что в зарубежных работах чаще прибегают к использованию не абсолютных величин, а их отклонений от нормы. Например, в [Ahmed et al., 2021; Jones et al., 2015; Prowse et al., 2006] на примере крупнейших рек арктического бассейна и их притоков выделены реки, для которых положительная аномалия температуры в весенний период ведет к увеличению продолжительности половодья, а также реки с обратным эффектом. Схожие условия диагностированы для связи сроков начала, объема и пика половодья с температурой воздуха и осадками в холодный период.

В весенний период по аналогии с отечественными исследованиями для оценки скорости таяния снежного покрова чаще всего применяют метод температурных коэффициентов, которые, например, для Северной Америки в среднем варьируют от 2–4 в апреле до 4–7 мм/°C в июне

в зависимости от залесенности водосбора.

Гораздо большее внимание в сравнении с отечественными исследованиями уделяется связи характера половодья с динамикой атмосферной циркуляции. Так, в работах [Burn et al., 2004; Curran, Biles, 2021; Jones et al., 2015; Rood et al., 2016] указывается на влияние тихоокеанской декадной осцилляции (PDO) на развитие многоводного половодья и наводнений на севере США, в [Ahmed et al., 2021; Assani, 2017] сделаны выводы о тесной связи характеристик половодья с положительной и отрицательной фазами североатлантического колебания (NAO), арктического колебания (АО), PDO и Эль-Ниньо (ENSO).

В части квазипостоянных ФФС половодья зарубежные исследователи чаще всего выделяют среднюю высоту водосбора, площадь оледенения и распространение вечной мерзлоты. Подтверждаются гипотезы отечественных исследователей о влиянии рельефа, залесенности и густоты лесного полога.

Определения вкладов каждого из ФФС в половодье также редки, как и в отечественной литературе, и в основном представляют собой качественные выводы [Naikm, Jay, 2011]. Только в единичных публикациях присутствуют приближенные оценки: в [Flow Forecasting..., 2012] на основе статистического анализа установлено, что запас воды в снеге в бассейне р. Фрейзер (Канада) лишь на 20–40 % определяют риск высокого половодья, в то время как синоптические условия весны обеспечивают до 60–80 %.

На этом перечень применяемых в последние восемь десятков лет для описания половодья динамических и квазипостоянных факторов исчерпывается. Утверждения о значимости весенних условий, как правило, не подкреплялись дополнительными факторами, что в настоящее время само по себе является актуальной задачей.

1.3 Актуализация классификации ФФС половодья

Анализ отечественной и зарубежной литературы позволяет не только сформировать всестороннее представление о действующих ФФС, но и предложить модернизированную их классификацию (Рисунок 1.3). Она объединяет в себе существующие классификации по роли в водном балансе, по типу и времени воздействия, диагностируя место каждого фактора и его характеристик в процессе формирования стока. В ней принят принцип деления факторов на:

- приходные прямые положительные;
- расходные прямые отрицательные;
- перераспределяющие косвенные динамические;
- перераспределяющие косвенные квазипостоянные.

К прямым положительным факторам, как и в классической гидрологии, относятся запас воды в снежном покрове, выпадающие в твердой фазе осадки, ледяная корка, жидкие осадки

осенью и водоотведение. К прямым отрицательным – испарение, инфильтрация, поверхностное задержание и изъятие вод из русла.



Рисунок 1.3 – Модернизированная классификация факторов формирования стока половодья и их характеристик [Варенцова и др., 2022b]

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 упрощение, в соответствии с которым перераспределяющий фактор не может оказывать прямого воздействия на сток. Так, среди косвенных динамических факторов кроме классических влажности и глубины промерзания почвы появляется атмосферная циркуляция. Именно она формирует режимы температуры и увлажнения территории, определяет устойчивость холодного периода, столь значимую при накоплении запаса воды в снежном покрове. Соответственно, сюда же относим и температуру воздуха. Весомую роль играет и уровень грунтовых вод.

В отношении ряда антропогенных факторов (регулирование стока, мелиорация и урбанизация), а также естественных аккумуляторов стока несмотря на вид их воздействия подобное предположение считается допустимым.

Ряд фактов и процессов относится к пограничным состояниям. Среди них зимние жидкие

осадки, скорость таяния, оттепели, растительность, лесозащитные полосы и распашка водосборов. Например, скорость таяния при низких значениях ведет к увеличению потерь, соответственно, исключительно положительным фактором назвать ее нельзя. Зимние жидкие осадки увеличивают сумму накопленных осадков за зиму, но могут приводить и к увеличению испарения или смыву снежного покрова, вызывая паводки. Оттепели могут давать положительный эффект для водного баланса половодья в случае образования притертой ледяной корки, которая ведет в дальнейшем к увеличению коэффициента стока.

К пограничным квазипостоянным факторам, в первую очередь, относятся распашка, создание лесозащитных полос и растительность в целом. О них речь шла в предыдущем разделе. Удержание снега в полях и сокращение сдува его в овражно-балочную сеть ведет к увеличению времени добегания даже до первичных звеньев русловой сети. Невозможность отнесения этих факторов к исключительно косвенным определяется тем, что в результате их воздействия происходит перехват влаги. А период воздействия их простирается от конца лета – начала осени до периода развития половодья.

1.4 Современные тенденции изменения основных факторов формирования весеннего половодья

Наблюдаемое изменение климата в XX–XXI вв. привело к изменению множества метеорологических, агрометеорологических и гидрологических характеристик. Эти изменения различаются по знаку, интенсивности и значимости влияния на весеннее половодье. Усугубляют ситуацию продолжающиеся сокращения сети и программ наблюдений, не позволяющие привлекать гидрометеорологическую информацию в прежних объемах [Бельчиков и др., 2019].

Поэтому современное состояние и динамика основополагающих факторов формирования стока и происходящих процессов требуют краткого анализа. Наиболее ёмкими и всесторонне рассматривающими данную тематику являются три доклада Росгидромета об изменении климата в России, материалы которых легли в основу данного раздела [Оценочный доклад..., 2014; Третий оценочный доклад..., 2022].

Циркуляция атмосферы – первостепенный косвенный динамический ФФС половодья, определяющий глобальные условия формирования стока. Практически все динамические ФФС связаны с ней. Наиболее часто встречается описание ее через индексы циркуляции атмосферы: северо-атлантического колебания (NAO), восточно-атлантического колебания (EA), Арктической осцилляции (АО), колебания полярной области (Pol), Южного колебания (SOI), северо-тихоокеанского колебания (NPI), Эль-Ниньо (ENSO) [Переведенцев и др., 2013; Оценочный доклад..., 2008b; Третий оценочный доклад..., 2022].

Европейская территория России находится под действием Исландского и Алеутского

минимумов, Азорского и Сибирского максимумов. В зимний период, особенно в январе, НАО и ЕА оказывают наибольшее влияние на формирование водного стока практически на всей ЕТР за исключением водосборов, расположенных к югу от 50° с. ш. (Нижняя Волга, Средний Дон, низовья рр. Хопёр и Медведица). При одновременных положительных фазах НАО и ЕА траектории движения циклонов смещаются к северу от $50\text{--}52^{\circ}$ с. ш., приводя к формированию маловодья в бассейнах Дона и Нижней Волги. Также зимой это ведет к развитию положительной аномалии температуры воздуха (более 3°C). При одновременных отрицательных фазах НАО и ЕА перемещение циклонов тяготеет к южной части территории, что способствует росту влагозапасов в пределах водосборов центра и юга Восточно-европейской равнины. При этом может развиваться температурная аномалия до -5°C , усиление процессов блокирования западного переноса и формирование продолжительного устойчивого холодного периода [Нестеров, 1998].

С конца 1970-х гг. в январе–марте чаще всего наблюдаются положительные фазы НАО и ЕА, а с 1990-х гг. положительная фаза НАО распространилась и на апрель. В среднем за календарную зиму положительная аномалия этого индекса сохраняется с 1980-х гг., то есть с начала современного изменения климата. Параллельно для октября отмечаются устойчивый отрицательный тренд интенсивности НАО и преобладание его отрицательной фазы [Михайлова, Юровский, 2016]. Как следствие, с второй половины XX в. над ЕТР значительно снизилось количество зимних блокирующих антициклонов. Об этом также свидетельствует и изменение приземного давления от $+1$ гПа в бассейне Нижней Волги до -5 гПа – на западе бассейнов Дона и Днепра [Неушкин и др., 2012].

На фоне развития Эль-Ниньо на западе ЕТР формируется положительная аномалия осадков, а на фоне развития Ла-Нинья в центре и на юге равнины наблюдается отрицательная аномалия осадков и отрицательная аномалия температуры воздуха (преимущественно на юге и юго-востоке равнины) [Третий оценочный доклад..., 2022].

Зимние и весенние изменения циркуляции атмосферы над ЕТР привели к снижению скорости ветра. Наиболее интенсивная динамика отмечается на северо-западе и в центральной части равнины: до $11.8\text{--}16.5\%$ /10 лет, что соответствует $39\text{--}54\%$ за 1977–2011 гг.

Наблюдаемые неоднородные изменения в циркуляции атмосферы по сравнению с серединой XX в. указывают на масштабность и неоднородность изменения условий формирования стока половодья во времени и пространстве. По этой причине важным представляется сравнительный анализ факторов формирования стока в прошлом и настоящем, что необходимо для понимания текущих особенностей формирования половодья и оценки рисков от климатических изменений в будущем.

Первое, на что влияет динамика циркуляции атмосферы – **температура воздуха**. Для нее

в пределах ЕТР диагностированы положительные тренды в осенний, зимний и весенний периоды с коэффициентами 0,55, 0,72 и 0,44 °C/10 лет, соответственно. Область наиболее интенсивных изменений в зимнее время охватывает практически всю территорию ЕТР к северу от 50° с.ш., осенью – тяготеет к бассейнам Дона, Средней Волги, Урала, Северной Двины и Мезени, а весной – к правобережной части нижней Печоры, Верхнему Днепру, Дону и Нижней Волге [Kharlamov, Kireeva, 2020; Третий оценочный доклад..., 2022].

Положительный тренд температуры воздуха привел к росту числа дней и интенсивности оттепелей, которые прежде рассматривались лишь в виде оговорок [Вершинина, 1977; Джамалов и др., 2017; Фролова и др., 2020]. Увеличение количества оттепельных дней в зимнее время охватывает практически всю ЕТР к северу от 45° с.ш., весной – ограничивается 45–55° с.ш., а также Кольским полуостровом (между ними расположилась область отрицательных трендов в бассейнах рек Балтийского моря). Одновременно с этим сократилась продолжительность устойчивого холодного периода, например, в бассейнах Волги и Дона – до 5–20 суток (Рисунок 1.4) [Kireeva et al., 2019; Калужный, Лавров, 2016b].

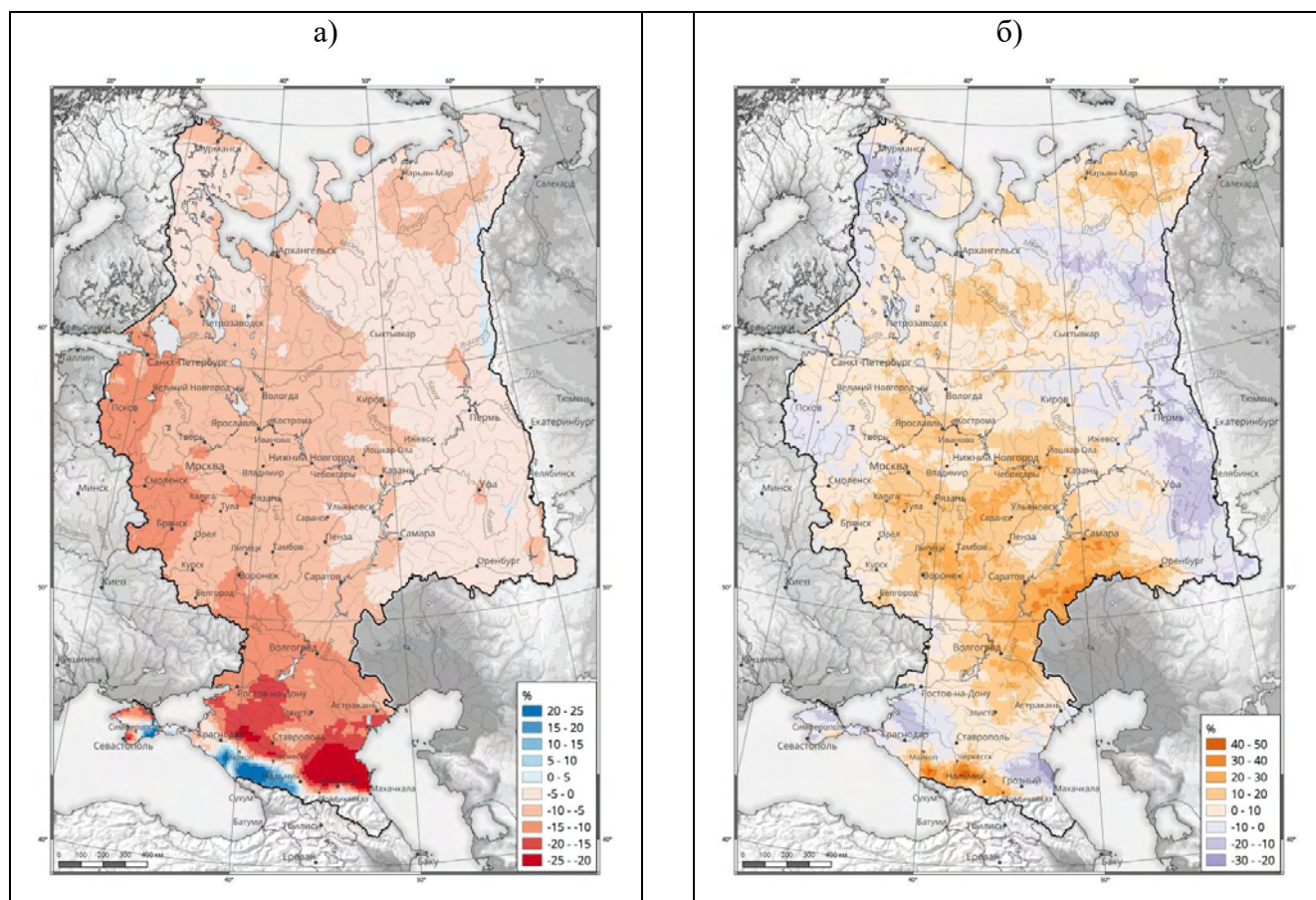


Рисунок 1.4 – Изменение среднего количества дней с отрицательными температурами (а) и количества оттепелей (б) начиная с 1978 г. по отношению к величинам до 1978 г.

[Фролова и др., 2020]

Изменение температуры воздуха зимой уже привело к серьезнейшим последствиям для

речного стока: возрос зимний и сократился весенний сток на большей части ЕТР [Naikm, Jay, 2011; Киреева и др., 2017; Сафина, Голосов, 2018; Фролова и др., 2020; Многолетние..., 2021; Многолетние колебания..., 2021]. Наблюдается увеличение продолжительности периода перехода от устойчивых отрицательных к устойчивым положительным температурам, включая 0, 5 и 10 °С, что говорит о снижении дружности весны и, как следствие, деградации половодья. Например, коэффициент дружности половодья в бассейне Дона с 1970 г. снизился в 1,5–2 раза [Джамалов и др., 2017], что привело к увеличению потерь талого стока.

С изменением температурного режима зимнего периода связано и изменение **атмосферных осадков**. Их статистически значимые положительные тренды диагностируются для зимы и весны (1,1 и 1,8 мм/месяц/10 лет, соответственно), наиболее ярко выражаясь в бассейнах рек Балтийского, Белого, Баренцева морей, а также Верхней Камы. Одновременно с этим отрицательные тренды установлены для лета и осени. Несмотря на их не подтверждённую статистическую значимость, они создают предпосылки для увеличения аридности территорий. [Kharlamov, Kireeva, 2020; Фролова и др., 2020; Третий оценочный доклад..., 2022]

В осенний и зимний период более значимы структурные изменения осадков. С 1936 до 2020 г. количество твердых осадков на юге ЕТР сократилось на 22 %, смешанных в целом по равнине – выросло на 35 %, а жидких – на 14 %. На этом фоне отмечается рост паводковой составляющей в структуре формирования половодья (Рисунок 1.5) [Blöschl et al., 2019; Kharlamov et al., 2021; Kireeva et al., 2020; Киреева и др., 2018a; Киреева и др., 2018b; Фролова и др., 2019].

Интегральным показателем количества твердых осадков является **снежный покров**. В настоящее время его средняя максимальная высота увеличивается от 10 см на юге до 80 см на севере и северо-востоке ЕТР, а средний максимальный запас воды на полевых участках – от первых миллиметров на юге до 150–200 мм в бассейнах Верхней и Средней Камы, низовьях Печоры и в Хибинах. На лесных участках средний максимальный запас воды в снеге составляет от 50 до 150 мм и характеризуется меньшим коэффициентом вариации [Калужный, Лавров, 2016b]. При этом от формирующей его суммы осадков за зиму $S_{\max}$ в среднем составляет 50–70 %, варьируя в отдельные годы от 0 до 90 % [Многолетние изменения..., 2021].

В настоящее время отрицательные тренды отсечены для максимальной высоты и запасов воды в снежном покрове на полевых участках в бассейне Финского залива, для числа дней со снежным покровом и запаса воды в лесах – практически для всей территории ЕТР. Положительные тренды диагностированы для максимальной высоты снежного покрова и запаса воды в нем в полях в бассейнах Средней Волги, Камы и правобережья Верхнего Дона [Третий оценочный доклад..., 2022]. Незначительны изменения запаса воды в снежном покрове на полевых участках бассейна Онеги, Верхней Волги и Оки, Дона и Нижней Волги. Однако устойчивость вклада снежного покрова в формирование весеннего половодья не может

быть доказана лишь отсутствием трендов непосредственно в рядах гидрометеорологических данных [Варенцова и др., 2022a].

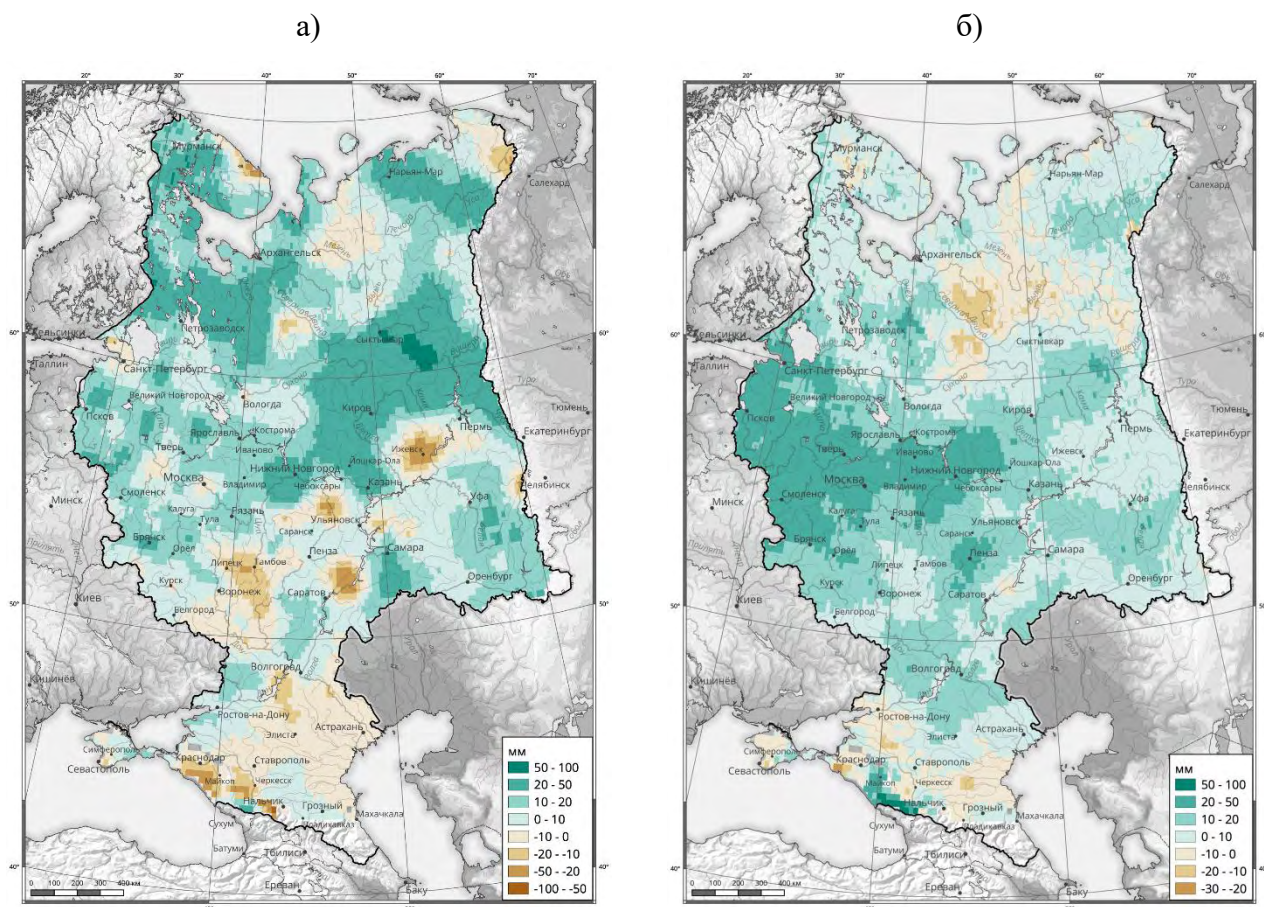


Рисунок 1.5 – Изменение среднего количества твердых (А) и жидких (Б) осадков в зимний период начиная с 1978 г. по отношению к величинам до 1978 г. [Фролова и др., 2020]

Ледяная корка, прежде обеспечивавшая повышенный коэффициент стока, также подверглась изменениям. В пределах Восточно-Европейской равнины средняя продолжительность залегания ледяной корки варьирует от 1,5–3,5 до 24 суток в бассейнах Кубани, Волги, Днепра, Нижнего Дона и верховьев Северной Двины в поле и до 4 суток в лесу в бассейнах Верхней Волги, Дона и Днепра. Средняя максимальная толщина ее при этом не превышает 8 мм в поле и 2 мм в лесу.

Для максимальной ее толщины отрицательный тренд диагностирован для всей ЕТР с интенсификацией в западных областях (2–4 мм/10 лет). Продолжительность залегания также сокращается, но в основном – на полевых участках [Третий оценочный доклад..., 2022]. Изменение характеристик снежного покрова и ледяной корки отражается на процессах таяния весной и в зимние оттепели.

Наряду с вышеперечисленными факторами высокую значимость имеет **снеготаяние**. С середины XX в. для оценки его интенсивности в статистических методах прибегают

к использованию коэффициентов стаивания [Шихов, Абдуллин, 2014]. Подобное допущение приводило и приводит к существенным ошибкам. Так, для степной и лесостепной зон бассейна Дона значения коэффициента стаивания при осадках до 10 мм за оттепель составляют 5–6 мм/°С, при интенсивных осадках – до 15–25 мм/°С, в отдельных случаях – до 40–50 мм/°С [Варенцова и др., 2020].

Однако при обращении к исходным данным выявлено, что сокращение запаса воды в снежном покрове со скоростью до 62 мм за декаду может происходить и при отрицательной среднесуточной температуре воздуха, а значения коэффициента стаивания, определенный по данным снегосъемок и осадков, варьируют в очень широких пределах – от 0,5 до 100 мм/(°С·сут). Данные выводы согласуются с [Комаров, 1959]. Следовательно, применение оперативных данных для оценки даже текущей величины интенсивности таяния может быть заведомо ложным [Варенцова и др., 2020].

Внимания требуют и изменения косвенных факторов потерь и перераспределения стока – **влажности и глубины промерзания почвы**. В текущих климатических условиях в пределах Восточно-Европейской равнины отмечается повсеместное снижение влажности почв в верхнем метровом слое со скоростью 0,4–1,2 мм/10 лет весной и 0,6–2,8 мм/10 лет в июле [Третий оценочный доклад..., 2022], хотя в некоторых исследованиях показан ее рост [Фролова и др., 2019]. Исключение составляют речные бассейны Северо-Кавказского федерального округа, где тренд наблюдается слабopоложительный тренд. Отмечается и плавное увеличение температуры почвы на глубинах до 3 м.

В совокупности это ведет к повышению аридности территории [Третий оценочный доклад..., 2022]. Растет и впитывающая способность речных водосборов в период весеннего половодья. Примечательно, что отрицательный тренд весенней влажности почв наблюдается несмотря на учащение интенсивных зимних оттепелей [Варенцова и др., 2022a].

Интегральное воздействие положительных трендов температуры воздуха зимой и оттепелей, а также отрицательного тренда продолжительности холодного периода способствует уменьшению глубины промерзания почвы [Kireeva et al., 2020]. К примеру, в бассейне Волги она в среднем она составляет до 40–85 см, что на 24–49 % меньше, чем в первой половине XX в. [Джамалов и др., 2015; Сафина, Голосов, 2018].

Представленные результаты наглядно демонстрируют неоднородность изменения основополагающих ФФС половодья во времени и пространстве, что в очередной раз указывает на актуальность проведения статистического анализа с определением современных уровней значимости ФФС для рек ЕТР.

1.5 Современные тенденции изменения характеристик весеннего половодья

Аналогичная неоднородность изменений по скорости и направленности прослеживается

и для основных характеристик весеннего половодья в пределах ЕТР: объема стока, максимальных расходов воды и сроков развития основных фаз [Blöschl et al., 2019; Kharlamov et al., 2021; Magritsy et al., 2018; Борщ и др., 2022; Варенцова и др., 2022а; Киреева и др., 2018а; Осипова, Болгов, 2020; Фролова и др., 2020]. Наиболее существенные тренды снижения половодного стока отмечаются в зоне недостаточного увлажнения южного склона ЕТР [Kharlamov et al., 2021]. Так, уменьшение максимальных расходов воды на 40–50 % произошло в бассейне Дона, на Нижней Волге – до 70 %, а годовая амплитуда для суточных расходов воды сократилась в 2–3 раза [Варенцова и др., 2021; Горбаренко и др., 2021; Джамалов и др., 2015; Осипова, Болгов, 2020; Фролова и др., 2020; Многолетние изменения..., 2021]. Снижение объема весеннего стока в пределах большей части бассейна Волги достигло 10–20 % [Frolova et al., 2017], а на Дону – до 50 % [Gelfan et al., 2021; Kireeva et al., 2020; Георгиади и др., 2017; Джамалов и др., 2017]. Строгое разделение климатического и антропогенного воздействия в величине этих изменений – задача отдельного исследования. Тем не менее, известно, что в расположенном в зоне недостаточного увлажнения бассейне Дона доля суммарного полезного объема водохранилищ к настоящему времени составляет до 43–45 % от сокращения объема стока половодья. В то же время, в бассейне Волги, преимущественно расположенной в зоне достаточного увлажнения, этот показатель достигает 70 %. Это наглядно отражает последствия антропогенного воздействия на речные водосборы [Варенцова и др., 2021; Варенцова и др., 2022а].

В работе [Лавров, Калюжный, 2016] показано, что для всего бассейна Волги сокращение слоя стока половодья наблюдается на 70 % рек, а на 30 % диагностирован рост. В то же время, лишь для трети из них тренды по состоянию на 2016 г. статистически значимы, в настоящее время их число удвоилось. Скорость изменений также выросла: по полученным в настоящее время оценкам сокращение объема половодья на реках с его отрицательной динамикой составило 40–60 %, тогда как в 1978–2010 гг. эта величина составляла лишь порядка 10 % [Многолетние колебания..., 2021].

Вслед за изменением объемных показателей половодья растет коэффициент естественной зарегулированности стока: до 0,6–0,7 на реках северного склона ЕТР и Урала, и более 0,7 – на реках бассейнов Оки, Дона и Кубани [Фролова и др., 2020].

Рост слоя стока половодья присущ горным и предгорным районам ЕТР, а также в северо-западных районах и Карелии (Рисунок 1.6). На реках севера ЕТР и Верхней Камы статистически значимых трендов на сегодняшний день в литературе не выявлено [Frolova et al., 2017; Magritsy et al., 2018]. Реакция стока половодья на изменение климата наиболее выражена на малых водосборах. Так, на малых реках при сокращении глубины промерзания коэффициент талого стока снизился до 0,3–0,4, что подтверждается как наблюдениями на гидрологических постах, так и на воднобалансовых станциях.

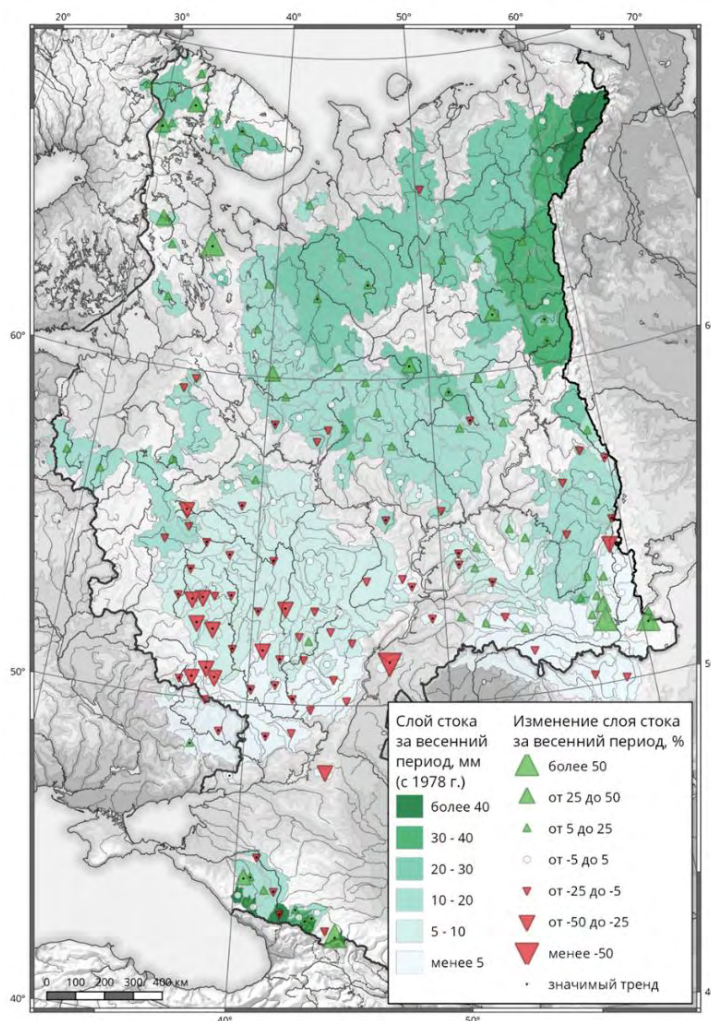


Рисунок 1.6 – Изменение слоя стока за весенний период [Фролова и др., 2020]

Вследствие изменения климата нарушена однородность в рядах максимального стока рек южной и юго-западной частей ЕТР. В бассейнах Дона, Днепра, Оки и Нижней Волги с начала 1980-х гг. снижение максимальных расходов воды составило 40–60 %, сократилась и дисперсия (Рисунок 1.7а). Статистически значимые отрицательные тренды диагностированы на более чем 90 % действующих стоковых постах (Рисунок 1.7б). В то же время, положительные тренды выявлены для ряда рек северной части бассейна Волги и склонов Уральских гор [Горбаренко и др., 2021; Многолетние колебания..., 2021]. В других работах приводятся несколько отличные результаты.

Изменению подверглись и сроки развития весеннего половодья. Окончание половодья для южной половины ЕТР сместилось на июнь, что отмечается, например, на Медведице и Хопре, притоках Верхней и Средней Волге, Вятки и Белой. В то же время, на северных реках половодье стало более растянутым: на Северной Двине, Онеге и Мезени оно теперь чаще завершается в июле.

Оценка вклада климатических и антропогенных изменений в наблюдаемую динамику

стока половодья присутствует в работах [Барабанов и др., 2018; Георгиади и др., 2017]. Показано, что в бассейне Дона до 1980 г. вклад антропогенной составляющей в сокращение половодья превалировал, после – отошел на второй план. В то же время, отмечается, что с 1930 г. по настоящее время масштабы изменения стока половодья были выше, чем межени. При этом общая картина изменений выглядит следующим образом (Рисунок 1.8).

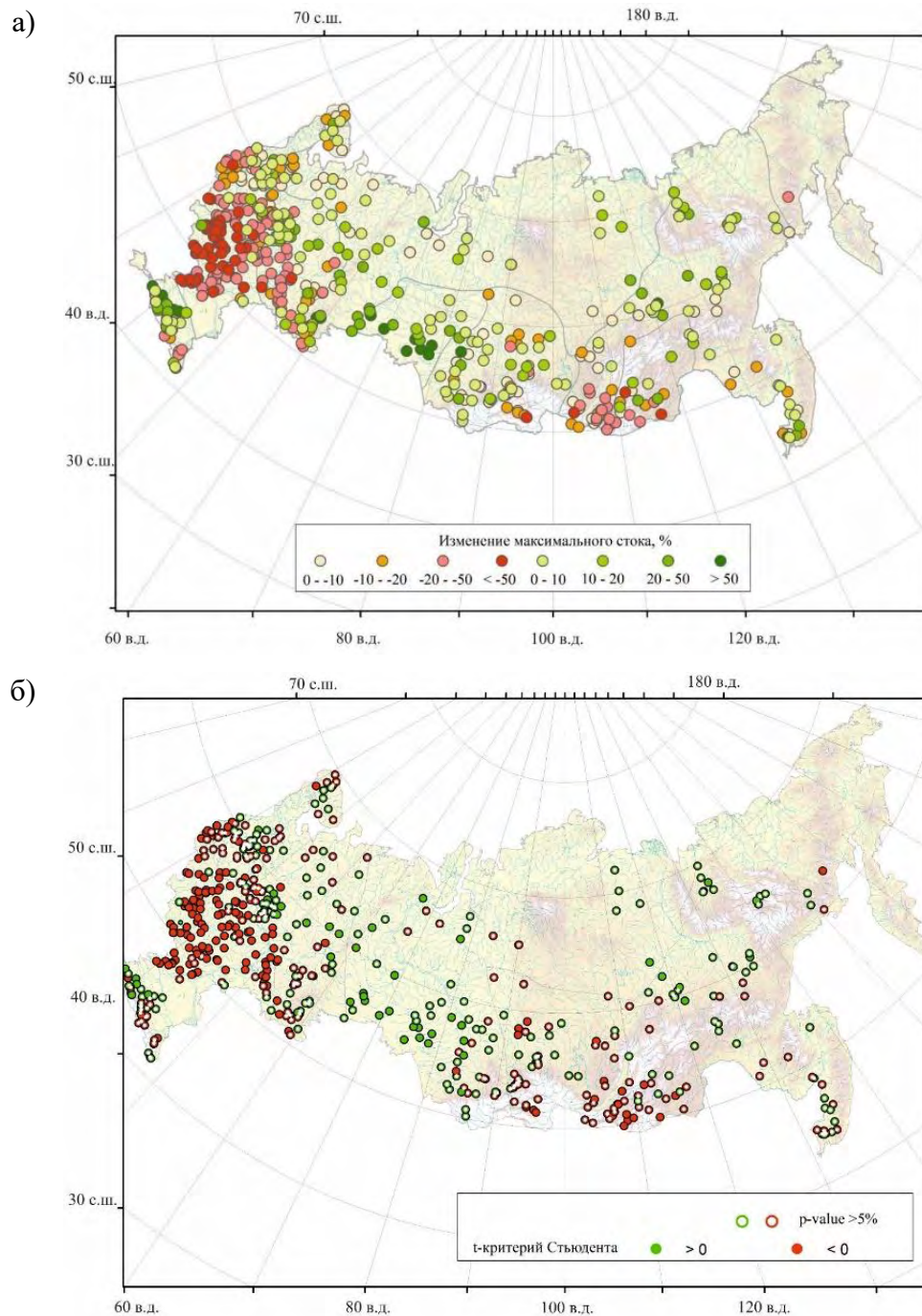


Рисунок 1.7 – Изменение максимального стока (а) и оценка его статистической значимости по критерию Стьюдента для $p < 5\%$ (б) [Фролова и др., 2022]

Отметим, что гидрологические процессы более инерционны, нежели современное изменение климата. В связи с этим и на основе рассмотренной литературы приходится говорить

о разных сроках начала, скоростях и тенденциях изменений [Алексеевский и др., 2013; Осипова, Болгов, 2020; Фролова и др., 2020]. Подобная асинхронность и, зачастую, асинфазность ведут к нарушению устойчивости уравнений, полученных в конце XX в. для прогноза стока весеннего половодья. Многие из них были предложены для прогнозирования среднего по срокам половодья с умеренной или дружной весной и отсутствием паводков. В последние десятилетия часто приходится говорить о растянутых или комбинированных веснах.

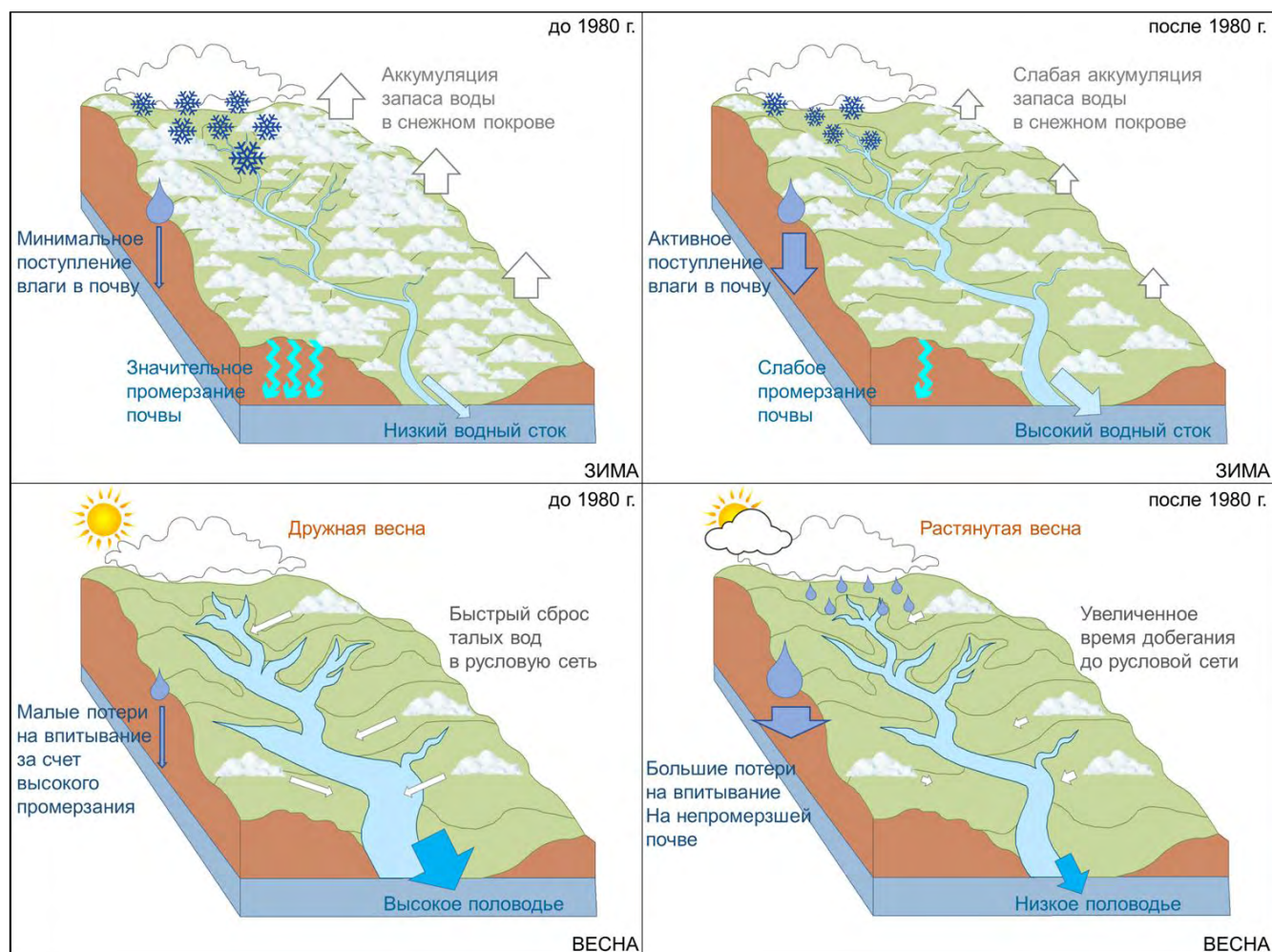


Рисунок 1.8 – Принципиальные отличия условий формирования стока весеннего половодья до и после начала современного изменения климата

1.6 Проблемы прогнозирования в условиях нестационарного климата

Разнонаправленные и отличающиеся по интенсивности тренды стока половодья актуализируют вопрос уточнения действующих методик прогнозирования [Бельчиков и др., 2019; Борщ и др., 2022]. Одновременно с этим направленные изменения ФФС ставят под сомнение достаточность уточнения коэффициентов в уравнениях. Как отмечено выше в разделе 1.2, существующие наиболее распространенные методики подразумевают использование данных о запасе воды в снеге, норме осадков на период половодья, влажности и глубине промерзания

почвы, а также однозначную связь слоя стока половодья с максимальным расходом и уровнем воды в расчетном створе [Алюшинская и др., 1962; Вершинина, 1977; Змиева, 1955; Лавров, Калужный, 2016; Рахманов, 1981; Рахманов, 1988; Субботин, 1978]. За истекшие 40 лет все эти связи претерпели изменения [Варенцова и др., 2020]. Например, для многих рек центральной и южной половины ЕТР изменился угол наклона кривой связи максимальных расходов и объема половодья (Рисунок 1.9).

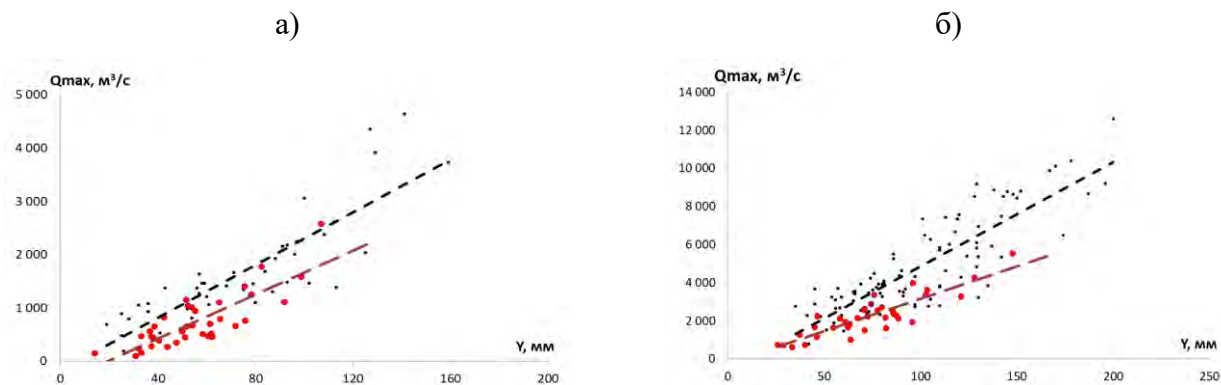


Рисунок 1.9 – Связь слоя стока половодья и максимального расхода воды в период весеннего половодья для р. Ока у г. Белев (а) и Калуга (б) до 1980 г. (черный) и после 1980 г. (красный)

Продолжающееся освоение речных пойм под жилое строительство и производство отчасти влияет на рост количества опасных явлений. Но капитальное строительство требует точные прогнозы в период высокой водности рек для снижения уязвимости. Этого можно достичь при выполнении минимум двух условий: большее число пунктов, для которых делается прогноз (прогнозопунктов), и высокая частота его выпуска и уточнения. В действующих методиках, разработанных во второй половине XX в., количество прогнозопунктов невелико: оно определялось трудоемкостью вычислений при разработке. Также полученные по ним результаты, как правило, не поддаются интерполяции или экстраполяции. По причине трудоемкости ограничения накладывались и на частоту выпуска гидрологических прогнозов. В настоящее время прогноз характеристик весеннего половодья выпускается ежегодно примерно в одни и те же сроки. Для выпуска предварительных прогнозов или их уточнений отсутствуют математически обоснованные решения.

Современные технологии позволяют выполнить оба условия, тем самым приблизив гидрологические прогнозы к площадным по типу синоптических. Тем самым, они могут стать надежной опорой для принятия управленческих решений по минимизации рисков для населения и экономики. Но на первом этапе требуется установить актуальные действующие ФФС весеннего половодья для каждого региона или отдельной реки.

Выводы к главе 1

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 ФФС, а также их комбинации, отвечающие за развитие высокого, среднего или низкого стока весной. Основываясь на физике процесса и измеряемых на государственной наблюдательной сети показателей, к 1950-м гг. сформировался классический вид зависимости – объема половодья от запаса воды в снежном покрове, осадков в период половодья, влажности и глубины промерзания почвы. В качестве дополнительных измеряемых показателей в зависимости такого вида могли включать данные о ледяной корке, температуре воздуха в зимний период и отдельных оттепелях, осеннем и зимнем стоке. Для учета интенсивности таяния, льдистости почв, залесенности, расчлененности, как правило, использовались поправочные коэффициенты.

За рубежом в дополнение к используемым в СССР и России факторам, часто привлекали данные об индексах атмосферной циркуляции, характеристиках водосборов и распространении ледников и вечной мерзлоты. Гораздо большее внимание ими уделяется аномалиям характеристик, а не их абсолютным величинам. Но, пожалуй, главным отличием от отечественной науки является гораздо больший акцент на данные бесконтактных методов наблюдения (зондирование Земли из космоса, аэрофотосъемка) и моделирования (как сами модели, так и реанализы). В качестве рекомендаций это зафиксировано даже в Руководстве по гидрологической практике, изданном Всемирной Метеорологической Организацией [Guide..., 2008].

Многочисленность действующих ФФС половодья требует их классификации. Так, в соответствие с классическими представлениями, они делятся по роли в водном балансе на приходные и расходные, по типу воздействия – на прямые и косвенные, по времени воздействия – на квазипостоянные и динамические. Особую роль играют антропогенные факторы, способные выступать любым вышеперечисленным типом. Анализ отечественной и зарубежной литературы позволил предложить модернизированную классификацию ФФС (Рисунок 1.3). В ней принят принцип деления факторов на приходные прямые положительные, расходные прямые отрицательные, перераспределяющие косвенные динамические и перераспределяющие косвенные квазипостоянные. Основной ее особенностью стало введение понятия перераспределяющих и пограничных факторов.

С 1950-х по 1980-е гг. велась активная разработка методик долгосрочного прогнозирования стока весеннего половодья на основе новых представлений об условиях его формирования. Полученные в этот период зависимости до сих пор находятся в оперативной практике территориальных управлений Росгидромета. Но наблюдаемое в последние четыре

десятилетия изменение климата оказало воздействие на основные ФФС и непосредственно сток половодья. Согласно множеству публикаций, диагностируются значимые тренды динамики циркуляции атмосферы над европейской территорией России, температуры воздуха и атмосферных осадков, влажности и глубины промерзания почвы. Их интенсивность и направленность в зависимости от фактора и его характеристики, сезона года и географического положения имеет разную величину и знак. Это, в свою очередь, ведет к направленному изменению стока весеннего половодья. Согласно результатам последних исследований, величина его в разных районах равнины составляет от 0 до 70 % для разных характеристик половодья, а для отдельных рек – еще больше.

В результате установленные в середине XX в. связи претерпели существенные изменения. Подобная ситуация требует решение вопроса актуализации действующих методик прогнозирования, ставя под сомнение достаточность уточнения коэффициентов в уравнениях. Одновременно с этим существенно растет потребность населения и экономики в совершенствовании гидрологических прогнозов, в частности, с точки зрения увеличения их детализации по времени и пространству. Современные технологии позволяют удовлетворить данную потребность, но для ее реализации требуется установить актуальные действующие ФФС весеннего половодья для каждого региона или отдельной реки.

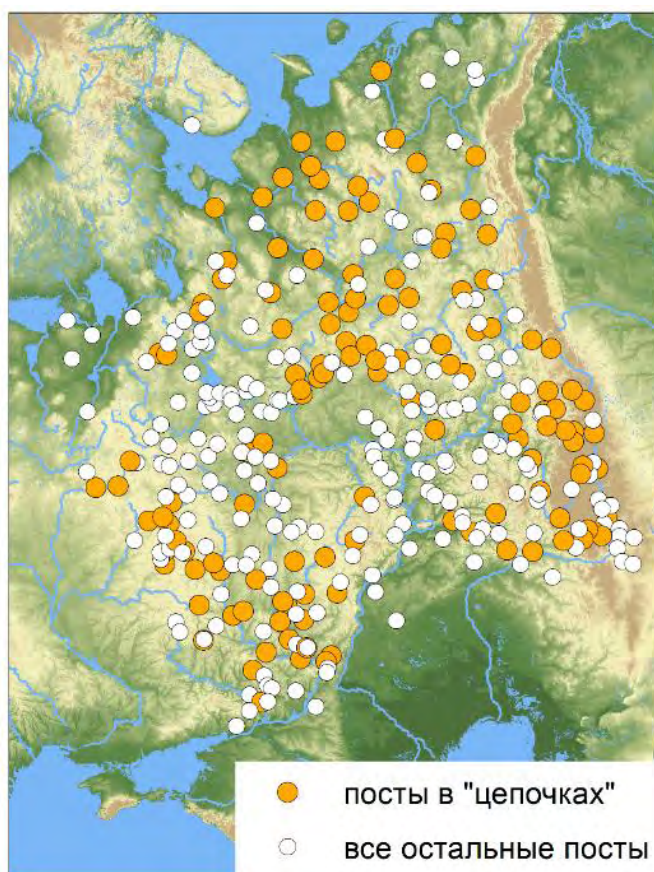
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Гидрометеорологическая освещенность территории исследования

Для анализа современных действующих ФФС весеннего половодья и их характеристик сформированы две базы: гидрологическая и метеорологическая.

В основе гидрологической базы данных лежат ряды наблюдений с 348 гидрологических постов (Рисунок 2.1). Они замыкают водосборы площадью от 128 до 348 000 км²: 57 % из них относятся к диапазону площадей от 2 000 до 50 000 км², 37 % – до 2 000 км² и 6 % – свыше 50 000 км².

Опорной гидрологической характеристикой выбран слой стока весеннего половодья. Для всех выбранных гидрологических постов он определялся по данным суточных расходов воды методом экспертных оценок по точкам перегиба гидрографа. Особенностью полученного набора является привлечение 49 рек в различных ландшафтных зонах, на которых сформированы «цепочки» из 2–6 вложенных водосборов. Они позволили оценить масштабные эффекты ФФС.



регион	кол-во постов площади водосборов
Дон	$\frac{52}{730 - 204\ 000}$
Верхняя Волга	$\frac{95}{128 - 188\ 000}$
Кама	$\frac{71}{196 - 124\ 000}$
Нижняя Волга	$\frac{33}{632 - 22\ 800}$
Северный Край	$\frac{57}{3\ 940 - 348\ 000}$
Урал	$\frac{28}{334 - 29\ 600}$
Днепр	$\frac{4}{247 - 14\ 100}$
Балтийский бассейн	$\frac{6}{505 - 14\ 700}$
Кольский п-ов	$\frac{1}{7\ 940}$

Рисунок 2.1 – Гидрологические посты, использованные в работе (в правой части: в числителе – количество гидрологических постов, в знаменателе – минимальная и максимальная площади водосборов в км²)

Расчеты проводились для периода с 1980 по 2017 гг., поскольку для него обеспечиваются

условия максимальной полноты и надежности данных. Для наиболее полных продолжительных рядов наблюдений расчеты дополнительно проведены за период 1950–1979 гг. При наличии пропусков в данных наблюдений, не позволяющих определить объем стока половодья, применялись регрессионные методы восстановления по рекам аналогам в соответствии с СП 33-101-2003 «Определение основных гидрологических характеристик». Требование к тесноте связи назначалось на уровне парного коэффициента корреляции $r = 0,8$. При невозможности выполнения поставленного условия допускалось сохранение пяти пропусков на 38-летний ряд [Варенцова и др., 2022a].

Для представления обобщенных выводов по современному состоянию стока половодья и его условиям формирования все использованные в работе гидрологические посты экспертным методом разделены на 24 подбассейна (Рисунок 2.2, Приложение А).

Метеорологическая база данных. Классические отечественные подходы изучения ФФС весеннего половодья в большинстве своем опираются на натурные данные наблюдений на станциях, постах и маршрутах Росгидромета. В то же время, отчеты Росгидромета о состоянии и функционировании сети [www.voeikovmgo.ru] указывают на то, что минимальная плотность синоптической сети по критериям ВМО не достигается практически на половине ЕТР: в Северном, Северо-Западном, Центральном-Черноземном, Приволжском и Уральском УГМС. Оптимальная плотность синоптической сети по тем же критериям достигается лишь в Крымском УГМС. Агрометеорологических наблюдений еще меньше: на сегодняшний день в целом по России наблюдения за температурой почвы на глубинах под естественным покровом проводятся всего на 507 станциях, при этом практически на половине из них – по неполному набору глубин. Снегомерные съёмки на полевом и лесном маршрутах проводились на 60 и 40 % станциях, соответственно, а их количество постепенно сокращается.

Поставленная задача анализа ФФС требует доступных непрерывных и продолжительных рядов данных по пространству и времени. Наблюдательная сеть Росгидромета в пределах ЕТР не в полной мере удовлетворяет поставленным условиям. В то же время, в последние десятилетия стремительно развиваются реанализы – сеточные базы данных гидрометеорологических характеристики, полученные путем ассимиляции данных наземных, аэрологических, морских и спутниковых наблюдений в численные модели атмосферы [Parker et al., 2016]. Их основные преимущества заключаются в непрерывности и высокой дискретности в пространстве и времени, многолетнем временном охвате, наличии физически согласованных данных по сотням характеристик атмосферы и деятельного слоя суши. Качество реанализов постоянно улучшается по мере развития вычислительных технологий, совершенствования моделей и появления новых систем наблюдения. В работе в качестве исключительного источника метеорологических данных использованы данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды

[Hersbach и др., 2020], являющегося одним из самых новых и детальных глобальных реанализов. Данные реанализа ERA5 имеют шаг по пространству $0.25 \times 0.25^\circ$ и 1 ч по времени.



Рисунок 2.2 – Схема районирования, использованного в работе

Высокое качество данных реанализа подтверждено множеством отечественных и зарубежных работ. Поле температуры воздуха реанализ воспроизводит с коэффициентом корреляции свыше 0.8–0.95. Наилучшие результаты достигаются на крупных равнинах, хуже – в горах даже при густой наземной сети. Также его надежность подтверждается согласованностью результатов производных расчетов, например, для гидрологического моделирования или же оценки термической нагрузки при увеличении смертности [Mistry et al., 2022; Rivoire et al., 2021; Tarek et al., 2020]. Для осадков корреляция со стационарными данными ниже, но превышает аналогичные оценки для реанализов ERA-Interim, JRA-55 (Япония), MERRA-2 (США). Отмечается и завышение осадков в среднем на 23 % зимой и до 40 % весной с локальными максимумами до 55 % [Григорьев и др., 2022]. При устранении систематического смещения ошибка существенно снижается. Несогласованность возникает в том числе из-за несоответствия средних по ячейке $0.25 \times 0.25^\circ$ значений из реанализа и локальных значений, наблюдаемых на метеостанциях. Допустимость привлечения данных о влажности почвы

подтверждается в [Кланг и др., 2024].

Есть и работы для отдельных регионов ЕТР, в которых указывается, что наибольшие расхождения отмечаются для периодов схода снега [Крючков, Калинин, 2021]. В то же время, неосвещенным здесь остается качество и репрезентативность самой снегомерной съемки. Поэтому однозначную оценку качеству данных реанализа в этот период дать затруднительно.

При дальнейшей работе с метеорологическими данными понятие ФФС используется в более узком смысле. К факторам относятся температура воздуха, осадки, снежный покров, промерзание и влажность почвы. Каждый фактор описывается рядом количественных характеристик – значениями сумм, экстремумов, количества дней, явлений и так далее.

Из массива данных реанализа ERA5 использовались температура воздуха, атмосферные осадки, запас воды в снежном покрове, температура почвы на разных глубинах и влажность почвы. На их основе сформирован массив из 209 метеорологических характеристик, потенциальных ФФС половодья. Все характеристики осреднены для каждого водосбора и охватывают большую часть периода формирования условий предстоящего половодья. Среди них: запас воды в снежном покрове, характеристики температурного режима, суммы твердых, жидких и общих осадков, характеристики промерзания и влажности почвы, характеристики таяния снега. Все характеристики рассчитаны за разные интервалы: от лета до начала весны. Кроме классических максимальных и на определенную дату значений использованы средние и минимальные за период значения, их трендовые коэффициенты, коэффициенты вариации и среднеквадратические отклонения, а также сроки, продолжительность и количество явлений за рассматриваемый период. Полный перечень характеристик и пояснения по их расчету представлены Приложении А.

С целью генерализации предложена классификация характеристик ФФС в соответствии с ключевыми физическими процессами и временем их действия. Предложенная классификация включает 17 групп: снежный покров, зимний период, зимник морозы, зимние оттепели, промерзание почвы, факторы периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до его схода, факторы периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до перехода температуры воздуха через 0°C, факторы периода от перехода температуры через 0°C до схода снежного покрова, факторы 10-дневного периода после схода снежного покрова, факторы последних 10 дней зимы, факторы первых 10 дней весны, а также их объединение, факторы таяния снежного покрова и 4 группы по влажности почвы (Метеорологические характеристики получены и проанализированы в рамках проекта РНФ №19-77-10032 «Структурные изменения процессов формирования стока рек Восточно-Европейской равнины в условиях нестационарности климата» [Отчет..., 2020; Отчет..., 2021], Таблица 2.1). Назначение групп производилось экспертным методом, без использования методов

автоматической кластеризации.

Метеорологические характеристики получены и проанализированы в рамках проекта РНФ №19-77-10032 «Структурные изменения процессов формирования стока рек Восточно-Европейской равнины в условиях нестационарности климата» [Отчет..., 2020; Отчет..., 2021].

Таблица 2.1 – Краткое описание характеристик ФФС, рассчитанных по данным ERA5

№	Группа	Состав характеристик
F-1	снежный покров	характерные даты, средние и максимальные запасы воды в снежном покрове за выбранные периоды, коэффициенты вариации
F-2	зимний период	продолжительность периода, средняя температура воздуха, суммы осадков за различные интервалы, коэффициенты вариации
F-3	зимние морозы	продолжительность периодов, средняя температура воздуха, суммы осадков и коэффициенты вариации
F-4	зимние оттепели	продолжительность периодов, средняя температура воздуха, суммы осадков и коэффициенты вариации
F-5	промерзание почвы	продолжительность периода, максимальная и средние за периоды глубины промерзания
F-6	характеристики периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до его схода	продолжительность периода, суммы и средние значения температуры воздуха, амплитуда температуры воздуха за период, коэффициенты линейных трендов температуры воздуха, общая сумма осадков, сумма осадков при отрицательной и положительной температуре воздуха, коэффициенты вариации, средняя глубина снежного покрова
F-7	характеристики периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до перехода температуры воздуха через 0°C	
F-8	характеристики периода от перехода температуры через 0°C до схода снежного покрова	
F-9	характеристики 10-дневного периода после схода снежного покрова	
F-10	характеристики последних 10 дней зимы	
F-11	характеристики первых 10 дней весны	
F-12	характеристики последних 10 дней зимы и первых 10 дней весны	
F-13	таяние снежного покрова	время, скорость и трендовые коэффициенты периода таяния (для всего периода, для периодов пассивного и активного таяния)

Таблица 2.1 – Продолжение

№	Группа	Состав характеристик
<i>F-14</i>	летняя влажности почвы	влажность почвы летом (количественные показатели и классы влажности почвы)
<i>F-15</i>	влажность почвы предзимнего периода	влажность почвы в конце октября и перед установлением снежного покрова (количественные показатели и классы влажности почвы)
<i>F-16</i>	влажность почвы конца зимы	влажность почвы в феврале – марте (количественные показатели и классы влажности почвы)
<i>F-17</i>	экстремумы влажности почвы	наибольшие и наименьшие значения влажности почвы за период формирования условий половодья (количественные показатели, классы влажности почвы и сроки, в которые они наблюдались)

В текущей работе не рассматриваются суммы осадков за период развития весеннего половодья. Их значимая роль в структуре формирования стока не отрицается. В то же время, для корректной оценки их влияния требуется учитывать индивидуальные временные границы прохождения весеннего половодья и сокращение степени покрытости снежным покровом каждого конкретного водосбора. Подобная задача выходит за рамки данного исследования.

Все характеристики для всех водосборов рассчитаны для периода 1980–2017 гг., а ФФС усреднены в границах водосборов.

2.2. Об особенностях используемых характеристик ФФС

Среди рассчитанных по данным реанализа ERA5 характеристик потенциальных ФФС есть классические – максимальный запас воды в снежном покрове, влажность почвы и глубина промерзания почвы последней декады или последнего числа месяца. Наряду с ними представлены характеристики, требующие некоторых пояснений.

Для задач исследования определялись различные суммы атмосферных осадков. Так, осадки, выпадавшие при отрицательной среднесуточной температуре воздуха, идентифицировались как твердые осадки и начинались с обозначения *SnowTP*. Осадки, выпадавшие при положительной среднесуточной температуре воздуха, идентифицировались как жидкие и обозначались *ThawTP*. Их сумма – общие осадки *TPsum* [Отчет..., 2021].

Классы сухости (влажности) почвы (индекс *_type*) – категории, определяемые для относительной влажности почвы [Отчет..., 2020]. Пороговыми значениями для нее являются

влажность завядания (далее – ВЗ), наименьшая полевая влагемкость (далее – НПВ) и среднее значение между ними – $(ВЗ+НПВ)/2$. Влажности почвы менее ВЗ соответствует IV класс, для которого характерно отсутствие испарения с почвы и максимальная впитывающая способность почвогрунтов при выпадении осадков. Влажность почвы, превышающая ВЗ, но ниже $(ВЗ+НПВ)/2$, соответствует III классу. Влажность почвы меньше НПВ, но выше $(ВЗ+НПВ)/2$ соответствует II классу, при котором испарение с почвы ниже испаряемости, а часть выпадающих осадков тратится на устранение дефицита влажности почвы. И, наконец, I классу влажности почвы соответствует влажность выше НПВ, когда отмечается избыточная влажность почвы, стекание влаги по почвенному профилю, а испарение близко к величине испаряемости. Подобный подход позволяет сравнивать почвенные условия для разных типов почв и территорий.

Линейная сухость (влажность) почвы (индекс $_{lin}$) – относительная величина на интервале влажности почвы от ВЗ до $(ВЗ+НПВ)/2$. Выше его она назначается равной 1, ниже – 0 [Отчет..., 2020].

2.3. Методы исследования

К данным применен статистический метод, включивший в себя три этапа: простой статистический (оценка современных параметров и их изменение в сравнении с 1950–1979 гг.), корреляционный (оценки парных связей по методу простой регрессии) и регрессионный (множественный регрессионный анализ с привлечением 2-х и 3-х характеристик ФФС). В рамках корреляционного этапа определены коэффициенты корреляции слоя стока половодья с каждой из 209 характеристик и перенесены на картографическую подложку. В рамках множественного регрессионного анализа:

- сформирован перечень пар потенциальных характеристик, априорно не допускающихся к анализу в силу их скоррелированности (например, максимальный запас воды в снежном покрове за январь и январь-февраль);
- для каждого речного водосбора исключены все скоррелированные характеристики с критерием $R_i \geq 0.45$;
- построены двух- и трехпараметрические уравнения линейной регрессии, наиболее точно описывающих сток половодья. Для них же определены характеристики тесноты связи (коэффициент множественной корреляции MR и среднеквадратическая ошибка $RMSE$);
- среди полученных уравнений выбраны наилучшие. Для входящих в них характеристик определены группы и проведена оценка их роли в водном балансе;
- для уравнений в пределах одной реки (вложенные водосборы) определена устойчивость состава характеристик в регрессионных уравнениях;

- для отдельных рек проведена оценка устойчивости статистических уравнений во времени в период с 1950 по 2017 гг.;

- среди полученных наборов уравнений выделены наилучшие квазиводнобалансовые, содержащие в своем составе запас воды в снежном покрове группы $F-1$, влажность почвы групп $F-14 - F-17$ и, по возможности, глубину промерзания группы $F-5$. Они сопоставлены с наилучшими статистическими уравнениями.

Уравнения, содержащие группы $F-1$, $F-5$ и $F-14 - F-17$, имеют приставку «квази-» по причине включения в них не только классических объемных показателей влажности почвы в предзимний период, но и характеристики влажности почвы в другие сезоны, классы сухости (индекс *_type*), и линейную сухость (индекс *_lin*).

Двухпараметрические уравнения составлены для всех доступных комбинаций ФФС (с учетом наложенных ограничений). Для построения трехпараметрических уравнений из полученных результатов выбирались 200 лучших двухпараметрических уравнений. В результате для каждого речного водосбора получены порядка 20 тысяч двухпараметрических уравнений и 40 тысяч трехпараметрических уравнений. Предельное число переменных уравнения при сохранении устойчивости решения определялось длиной ряда.

Значимость или ранг входящих в уравнение ФФС, определялся на основе экспертного анализа полученных уравнений следующим образом. Первым фактором (далее – ФФС-1) назначалась характеристика, входящая в первые 2–5 ранжированных по MR уравнений и имеющая наибольший парный коэффициент корреляции со стоком половодья. Вторым фактором (далее – ФФС-2) назначалась характеристика, входящая с ФФС-1 в лучшие двухпараметрические и трехпараметрические уравнения, но имеющая меньший коэффициент парной корреляции со стоком. Третьим фактором (далее – ФФС-3) назначалась характеристика, входящая в содержащее ФФС-1 и ФФС-2 уравнение, характеризующееся наибольшими MR и $RMSE$.

Все основные и вспомогательные программы написаны в средах Python и Matlab.

Выводы к главе 2:

Для реализации поставленных задач на основе данных о ежедневных расходах воды создана база данных слоя стока весеннего половодья для 348 гидрологических постов на 267 реках, замыкающих водосборы площадью от первых сотен до нескольких сот тысяч км². На 49 реках использованы данные с 2–6 гидрологических постов.

В качестве исходной метеорологической информации использован реанализ ERA5 с шагом 0,25° по широте и долготе. На основе его данных о температуре воздуха, атмосферных осадков, запаса воды в снежном покрове, температуре почвы на разных глубинах и влажности почвы сформировано 209 характеристик потенциальных ФФС половодья. Все они разделены

на 17 групп: снежный покров, зимний период, зимние морозы, зимние оттепели, промерзание почвы, характеристики периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до его схода, характеристики периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до перехода температуры воздуха через 0°C , характеристики периода от перехода температуры через 0°C до схода снежного покрова, характеристики 10-дневного периода после схода снежного покрова, характеристики последних 10 дней зимы, факторы первых 10 дней весны, а также их объединение, характеристики таяния снежного покрова и 4 группы с характеристиками влажности почвы.

Анализ данных проведен на основе статистического подхода, включающего корреляционный анализ и множественную линейную регрессию.

ГЛАВА 3. СТОК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

3.1. Особенности изменения стока весеннего половодья

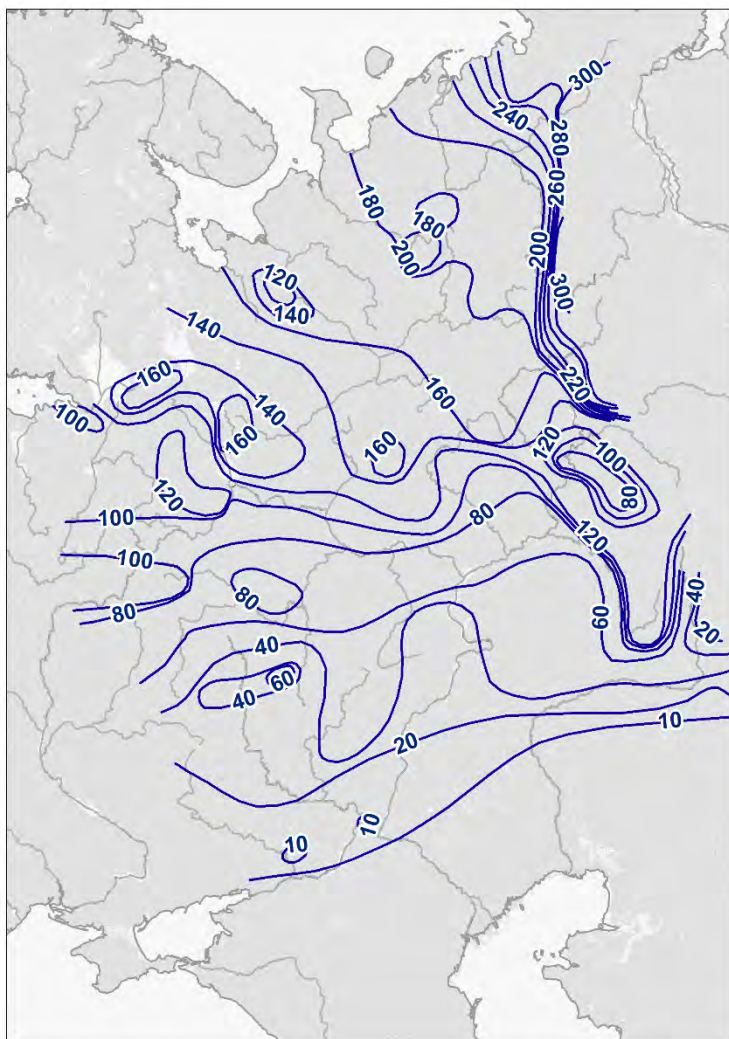
Имеющиеся данные о стоке воды за весеннее половодье позволили оценить современные количественные показатели. Средняя за 1980–2017 гг. величина слоя стока воды в пределах ЕТР составляет 95 мм (Рисунок 3.1а). Его наибольшие значения – свыше 250–300 мм – достигаются в правобережной части бассейна р. Печора и р. Вишера (приток р. Кама). Наименьшие величины слоя стока воды за весеннее половодье отмечаются в южных степях и полупустынях, для которых не характерно формирование устойчивого холодного периода и снежного покрова. Здесь в бассейнах Нижней Волги, Нижнего Урала и левобережья Нижнего Дона сток половодья в среднем не превышает 10 мм.

Периоды наибольшего среднего стока соответствуют 1981 (133 мм), 1994 (129 мм) и 1990 (125 мм) гг., периоды наименьшей водности половодья – 1996 (67 мм), 2015 (71 мм), 2009 (74 мм), 2006 (75 мм) гг. При сглаживании многолетней динамики 5-летним скользящим средним диагностируются периоды повышенной водности в 1990–1995 и 1998–2005 гг., а с 2006 г. наблюдается затяжной период низкой водности вёсен (Рисунок 3.2).

В целом, к югу от 58° с.ш. изолинии стока расположены субширотно, а к северу – постепенно меняют направление на субмеридианальное. Общая картина осложняется влиянием рельефа. Под влиянием обширного распространения озёр на водосборах замкнутые изолинии слоя стока 140–160 мм присутствуют в бассейнах рр. Свирь, Суда и верховья р. Сухона (Рисунок 3.1). К северо-востоку от них в нижнем течении р. Северная Двина, включая бассейн р. Емца сток локально снижается до 120–140 мм. Вероятно, это формируется за счет расположения на подветренной стороне кряжа Ветреный пояс (междуречье р. Онега и Онежского озера). Схожее воздействие отмечается в верховьях рр. Мезень и Пижма, а в левобережной части бассейна Оки между рр. Москва и Клязьма понижение рельефа и увеличение заболоченности местности, наоборот, приводят к локальному повышению стока до 91 мм. Также крупная область локального снижения стока до 80–120 мм приурочена к междуречью рр. Чусовая и Белая, что, вероятнее всего, определяется орографией и развитием карста.

Полученные результаты сопоставлены с картами среднего слоя стока весеннего половодья из Пособия к СНиП 2.01.14-83 [Пособие..., 1984], по сей день применяемыми на практике для изысканий под капитальное строительство и иные инженерные расчеты. Эти карты включают в себя данные от начала наблюдений до 1975 г., то есть до начала современного изменения климата.

а)



б)

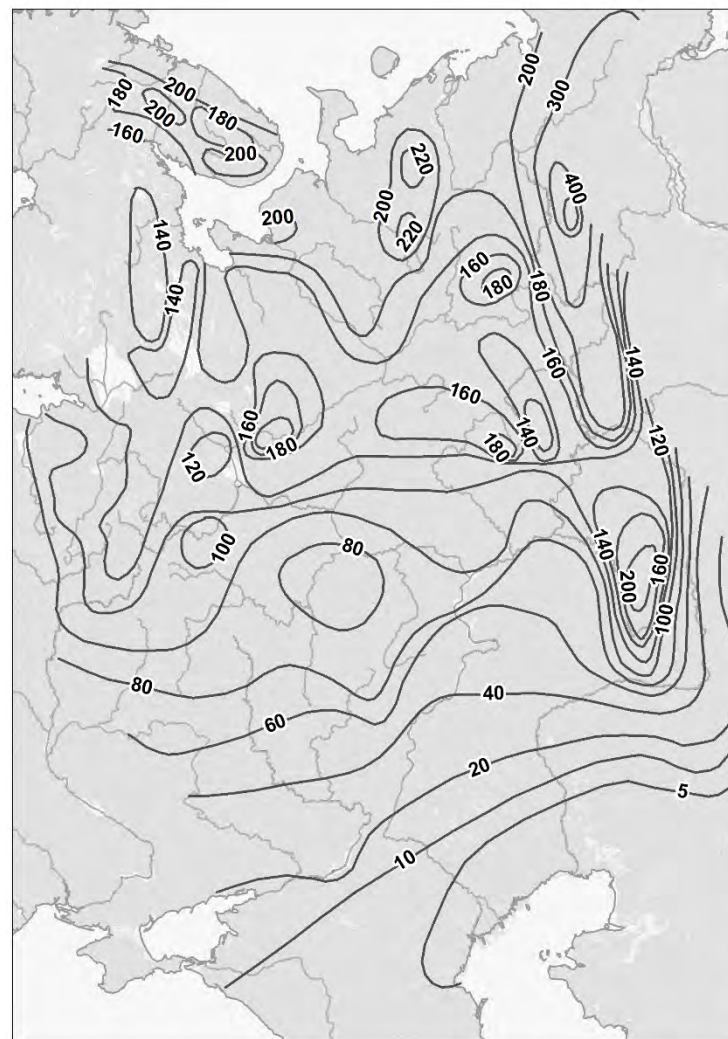


Рисунок 3.1 – Пространственное распределение среднего значения слоя стока воды за весеннее половодье в 1980–2017 гг. (а) и по материалам СНиП 2.01.14-83 (б)

Сопоставление пространственного распределения среднего слоя стока воды за весеннее половодье с картами СНиП (Рисунок 3.1а) указывает на существенные изменения за истекший период (Рисунок 3.1б). Так, изолиния слоя стока 10 мм сместилась к северу на 100–190 км, изолиния 80 мм – на востоке ЕТР на 100–150 км к северу, а на западе – до 400 км. Начиная от изолинии 140 мм, к северу и востоку ЕТР наблюдаются разнонаправленные изменения, как правило, характеризующиеся сдвигом к северу и востоку в западной части равнины и опусканием к югу и западу в восточной части. Последнее указывает на рост стока в бассейнах рр. Печора и Кама, что подтверждается [Третий оценочный доклад..., 2022].

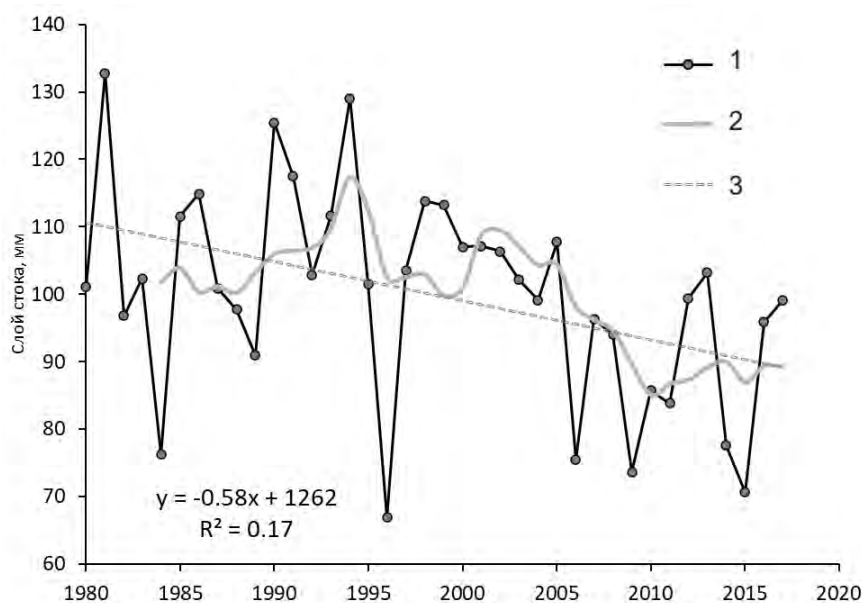


Рисунок 3.2 – Многолетняя динамика среднего слоя стока воды за весеннее половодье в пределах ЕТР в 1980–2017 гг. (1 – фактически наблюдаемый сток, 2 – пятилетнее скользящее среднее, 3 – линия тренда для фактических данных)

В отличие от коэффициента автокорреляции, типы кривых распределений, наиболее точно описывающие эмпирическое распределение значений слоя стока воды за весеннее половодье, локализованы в пространстве. Так, трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого-Менкеля больше подходит для рек южной половины ЕТР, а также большинства рек бассейнов рр. Печора, Мезень и Вычегда (Рисунок 3.3б). Для аппроксимации эмпирического распределения вероятностей в случае слоя стока весеннего половодья рек средней полосы ЕТР и северо-западной ее части больше подходит распределение Пирсона III типа. Наиболее пестрым в данном отношении регионом является бассейн р. Кама, где локализация тех или иных типов кривых не поддается районированию.

Коэффициент вариации C_v в пределах ЕТР меняется в широких пределах: от 0.17 на рр. Коваши и Печора в верховьях до 1.57 на рр. Есауловский Аксай и Большой Караман

(Рисунок 3.4). Наибольшие значения достигаются в южной части равнины, а наименьшие – в бассейнах рек севера ЕТР. Области наибольших пространственных градиентов приходятся на бассейны р. Медведица (приток Дона), Нижней Волги и Урала, где C_v сокращается с 1.2 до 0.6. Наиболее плавные изменения характерны для бассейнов рек севера ЕТР.

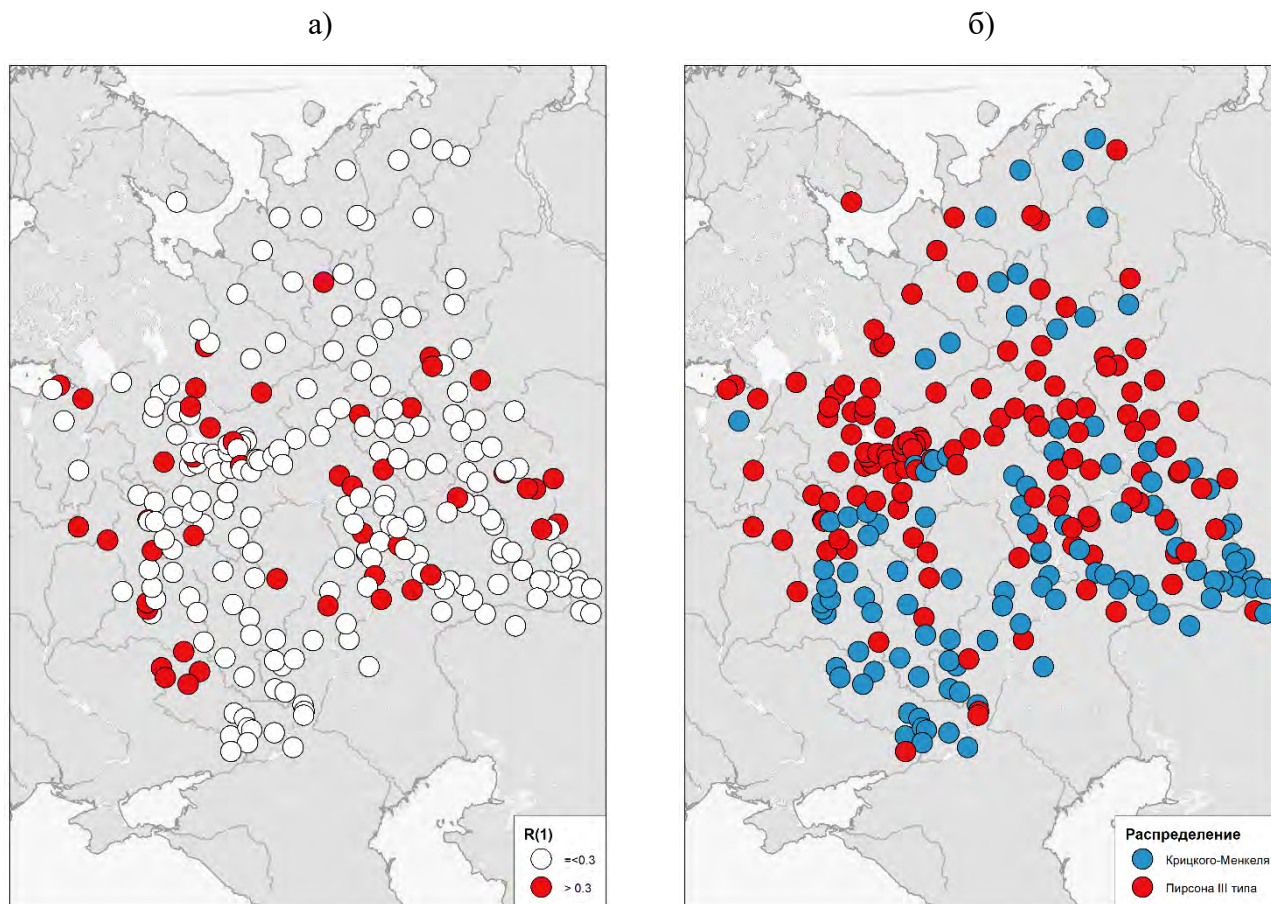


Рисунок 3.3 – Пространственное распределение коэффициента автокорреляции $r(1)$ (а) и типов кривых распределения вероятностей, наиболее точно описывающих эмпирическое распределение для слоя стока воды за весеннее половодье (б)

Связь величин половодий соседних лет для большей части ЕТР незначительная: коэффициент автокорреляции со сдвигом на 1 год $r(1)$ для 78 % речных створов не превышает 0.3 (Рисунок 3.3а). Наибольшие значения достигаются в бассейне Камы на рр. Юрюзань, Сюнь и в верховьях р. Вятка – до 0.66. Высокими значениями $r(1)$ до 0.5 отличаются рр. Тихая Сосна, Оскол и Нежеголь (бассейн Дона), рр. Согожа, Крома и Цон (бассейн Волги). Но распределение по пространству рек с повышенными значениями $r(1)$ не образует единых географических зон.

За истекшие десятилетия пространственное распределение коэффициента вариации в пределах ЕТР изменилось существенно. Общая картина параметра стала значительно более пестрой, нарушена субширотность распределения (Рисунок 3.4). К югу от изолинии $C_v=0.5$ отмечается смещение изолиний на север до 100–250 км. Севернее этой изолинии, наоборот,

изменчивость сокращается в среднем до 0.25–0.35. В частности, исчезает крупная замкнутая область $C_v=0.4-0.5$, соответствующая бассейну р. Волга выше впадения р. Сура, на современном этапе ей соответствуют значения C_v от 0.25 до 0.7.

Вслед за коэффициентом вариации существенные изменения претерпевает и пространственное распределение коэффициента C_s/C_v . В середине XX в. практически 80 % ЕТР соответствовало величине $C_s/C_v=2$. Современные изменения климата значительно увеличили пестроту пространственного распределения отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации (Рисунок 3.5). Значительно расширились области $C_s/C_v=1$: сейчас они охватывают низовья рр. Северная Двина и Мезень, левобережные притоки нижнего течения р. Печора, большую часть бассейна р. Сухона, бассейны рек северо-запада, верховий рр. Днепр и Западная Двина, Верхнюю Волгу, Нижнюю Каму и низовья Вятки. В бассейне Дона сформировалась обширная область $C_s/C_v=2.5$, охватившая большую часть водосбора, а верховьям р. Северский Донец и малым притокам Цимлянского водохр. соответствует $C_s/C_v=3$.

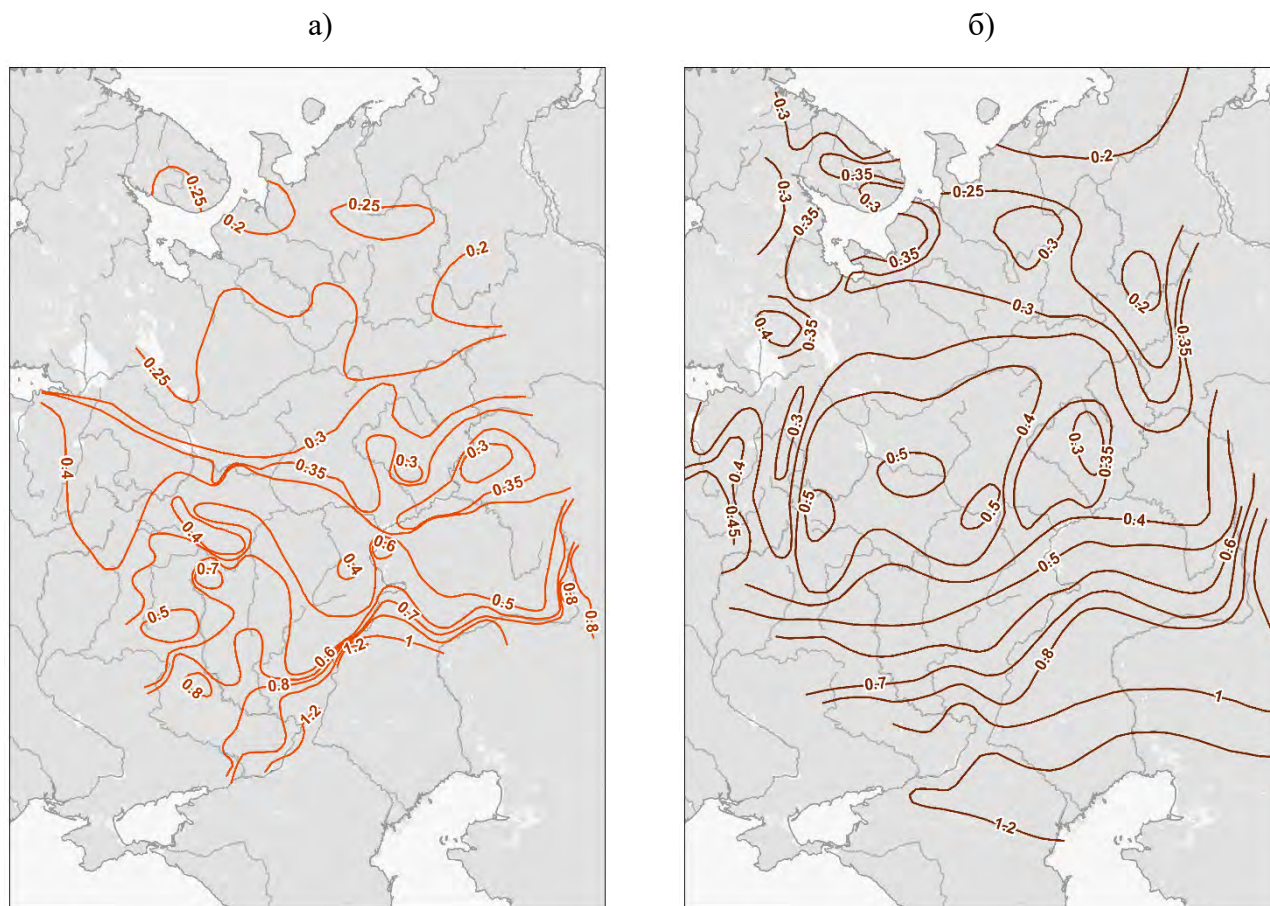


Рисунок 3.4 – Пространственное распределение коэффициента вариации C_v (а) в 1980–2017 гг. и в соответствие с картой СНИП 2.01.14-83 (б)

Для анализа современного состояния слоя стока половодья выбран интервал 1980–2017 гг., соответствующий периоду с наиболее ярко выраженными изменениями климата.

Так, например, среднее значение анализируемой характеристики в пределах ЕТР в этот период сокращается на 5.8 мм/10 лет. Наиболее интенсивное сокращение стока происходит в южной части равнины (Рисунок 3.6а), а на севере и востоке, напротив, отмечается слабый рост (Рисунок 3.6б).

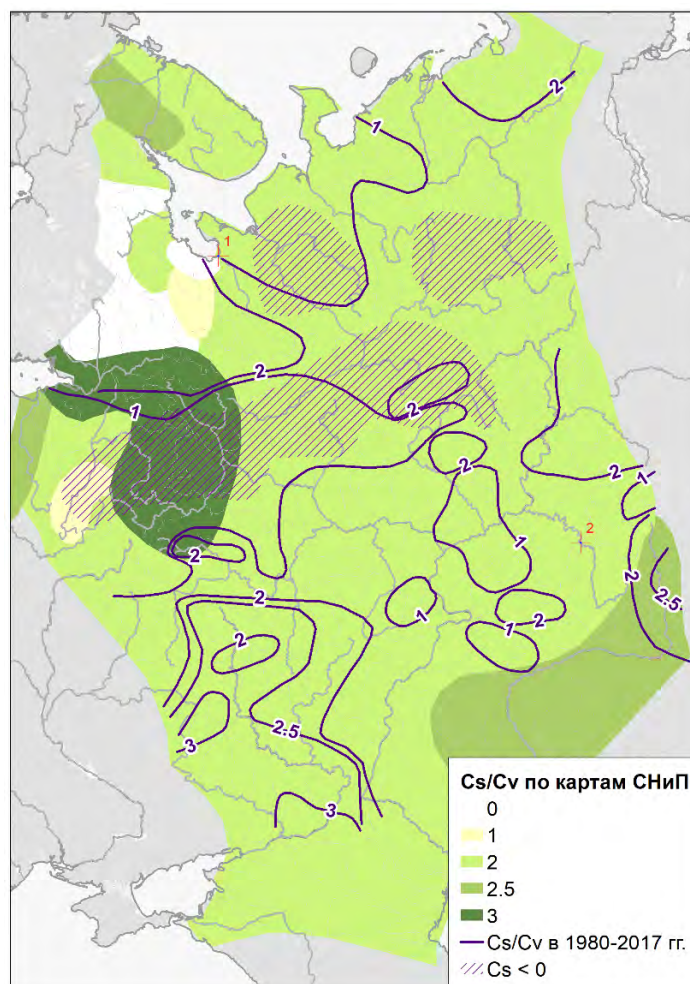


Рисунок 3.5 – Пространственное распределение отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v в 1980–2017 гг. и по материалам СНиП 2.01.14-83

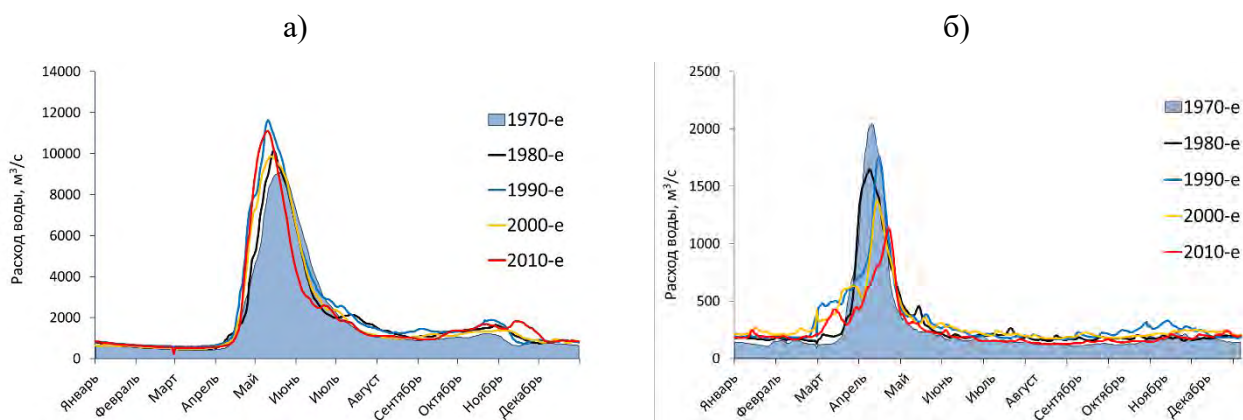


Рисунок 3.6 – Средние за десятилетия гидрографы для р. Северная Двина у д. Абрамково (а) и р. Ока у г. Калуга (б)

Наиболее ранние изменения слоя стока весеннего половодья начали происходить в южной части ЕТР (Рисунок 3.7). Для определения даты нарушения стационарности рядов использован целый ряд подходов: непараметрический тест Петтита, широко используемый для решения этой задачи в гидрологических исследованиях [Frolova et al., 2022] и основанный на сравнении рангов членов ряда до и после некоторого года. При этом тест Петтита выявляет изменение в величине медианы. Оценка года перелома для всего района основывалась в том числе и на анализе временных графиков - суммарных (интегральных) кривых связи от времени или разностно-интегральных кривых (РИК) годового и максимального стока.

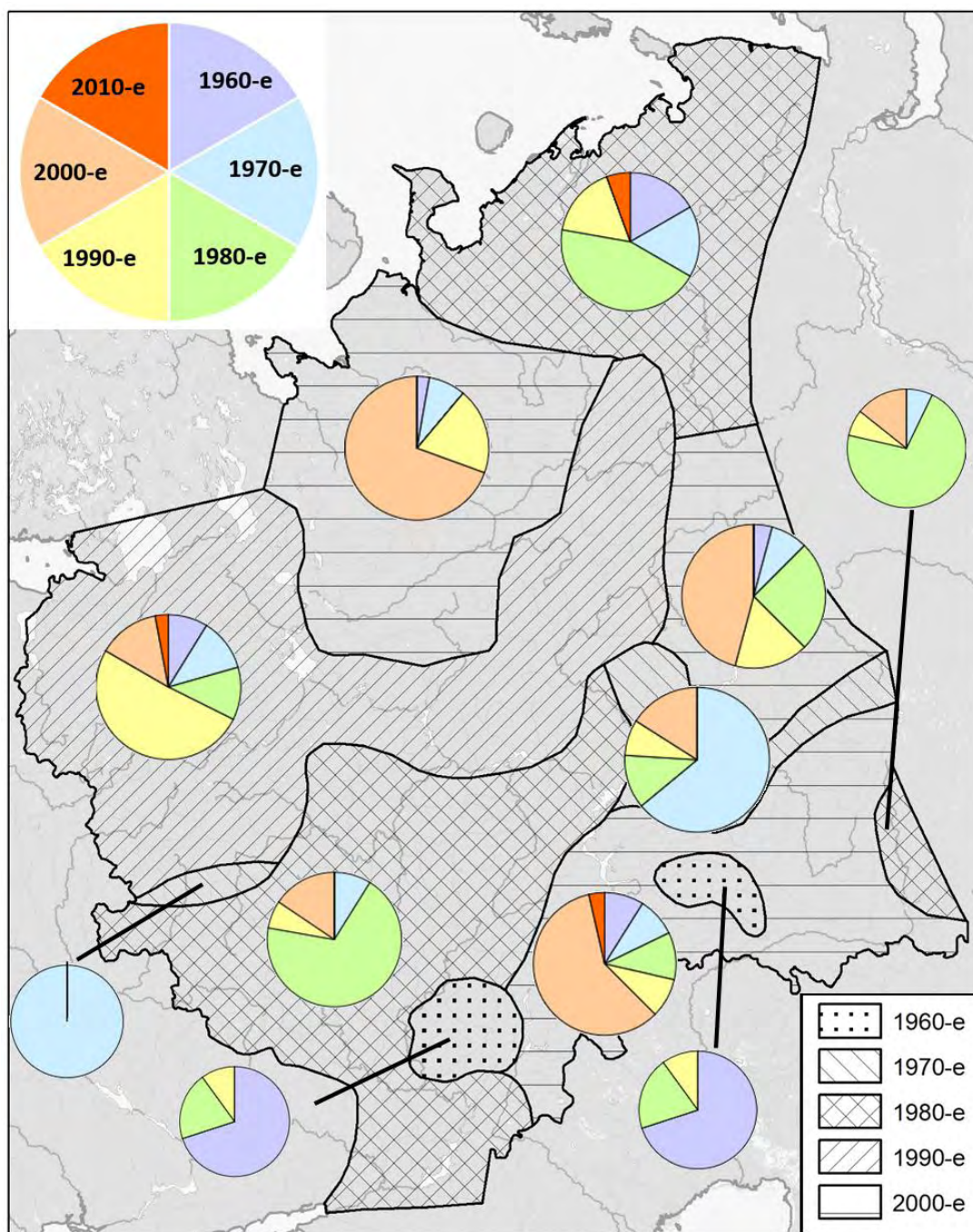


Рисунок 3.7 – Районирование слоя стока весеннего половодья по началу современных изменений стока

В бассейнах рр. Хопер, Иловля и Самара первым переломным периодом на современном этапе являются 1960-е гг., хотя статистическая значимость не подтверждается. В 1970-х гг. статистически значимые изменения слоя весеннего стока при $p < 5\%$ затронули бассейн Нижней Камы, низовья р. Белая, верховья рр. Уфа, Чусовая и небольшой регион в верховьях р. Ока на границе Тульской и Брянской областей. Далее в 1980-е гг. колоссальные изменения охватили огромные территории: практически весь бассейн рр. Дон и Сура, большая часть бассейнов рр. Ока, нижнее течение р. Вятка, бассейн р. Урал выше с. Уральск, а на севере ЕТР – практически весь бассейн р. Печора и правобережную часть бассейна р. Мезень. В следующее десятилетие начало масштабных изменений охватило бассейны рек северо-запада, верховий рр. Западная Двина и Днепр, Верхней Волги, района между рр. Ветлуга и Вятка, а также верхнее течение рр. Юг и Вычегда. Позже всех в 2000-е гг. на современные изменения климата отреагировали реки бассейнов рр. Северная Двина, Онега, левобережной части водосбора р. Мезень, бассейна р. Кама выше г. Сарапул, практически всего бассейна р. Белая, Нижней Волги и среднего течения р. Урал.

Реакция речных водосборов на изменение климата в выделенных районах не отличалась синхронностью. Так, наиболее однородными по началу изменений являются Донской и Верхнеуральский районы (Рисунок 3.7). В них переломный год относится к 1980-м гг. в 69 и 71 % случаев. Высокой однородностью характеризуются и Верхнеокский район (1970-е гг., 100%), Медведицкий (1960-е гг., 70 %), Северодвинский (2000-е гг., 69 %), Самарский (1960-е гг., 66 %), Нижнекамский (1970-е гг., 64 %). Наименее однородными оказались Печорский (1980-е гг., 44 %), Камский (2000-е гг., 46 %) и Верхневолжский (1990-е гг., 51 %). Причиной низкой асинхронности изменений в этих регионах являются как различные условия рельефа, так и существенные различия по антропогенной нагрузке на водотоки и условия формирования стока на их водосборах.

3.2. Основные факторы изменений

Наблюдаемые современные изменения климата привели как в целом к общему потеплению климата, так и изменению ряда факторов, использованных в данной работе. В табл. 3.1 приведены средние по ЕТР изменения 209 характеристик ФФС для современного климата (1980–2017 гг.) относительно предшествующего периода (1950–1979 гг.) (Таблица 3.1).

Характеристики группы $F-1$ в среднем уменьшились на 20–30 %, суммарная величина запаса воды в снежном покрове S_{sum} и средний запас воды в снеге за снежный период $S_{mean_{snow_period}}$ – на 41 и 43% соответственно. Увеличение на 4–12 % диагностировано только для дат установления снежного покрова $SP_{day_{start}}$ (смещение на более поздние сроки) и коэффициентов вариации запаса воды в снежном покрове для снежного периода $Cv_{S_{snow_period}}$, дней со снегом $Cv_{S_{snow_days}}$. Сокращение среднего за зиму запаса воды в снеге $S_{mean_{snow_period}}$

более, чем на 50 % затронуло практически весь бассейн р. Дон, Верхней Оки, правобережья Средней Оки, верхнего течения рр. Днепр и Западная Двина, рек северо-запада, ряда малых притоков Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского вдхр. А в верховьях рр. Ока, Северский Донец, Оскол, на рр. Иловля и Подгорная уменьшение величины достигает 100–128 %. При этом изменчивость запасов воды в снежном покрове $Cv_S_{snow_period}$ и $Cv_S_{snow_days}$ в бассейнах Дона, рек северо-запада и Верхней и Средней Волги, а также части рек бассейна рр. Кама и Сакмара возросла на 10–22 %.

Таблица 3.1 – Наибольшие относительные изменения метеорологических характеристик в 1980–2017 гг. по сравнению с 1950–1979 гг.

Группа F	Фактор	Среднее изменение по ЕТР, %
8	$Smean_{T0-SP}$	-95.2
11	$Smean_{SP10}$	-90.1
13	$melt_passive_{speed}$	-77.7
12	$Smean_{LAST10_SP10}$	-77.4
13	$melt_active_{TC}$	-77.3
10	$Smean_{LAST10}$	-64.2
13	$melt_active_{speed}$	-61.3
13	$melt_{TC}$	-51.7
5	$fr_depth_{21-31.04}$	-48.3
6	$Smean_{Smax-SP}$	-44.8
1	$Smean_{snow_period}$	-42.6
7	$Smean_{Smax-T0}$	-41.5
13	$melt_{speed}$	-41.1
1	$Ssum$	-41.1
1	$Smean_{snow_days}$	-35.8
10	$temp_mean_{LAST10}$	31.4
10	$temp_sum_{LAST10}$	31.4
7	$temp_sum_{Smax-T0}$	32.0
12	$temp_Cv_{LAST10-SP10}$	32.8
7	$SnowTP_{Smax-T0}$	33.3
6	$SnowTP_{Smax-SP}$	33.3
7	$frozen_temp_{Smax-T0}$	33.7
6	$frozen_temp_{Smax-SP}$	33.7
4	$snowbreak_{len}$	35.9
9	$frozen_temp_{ESC10}$	37.2
9	$Smean_{ESC10}$	43.9
4	$snowbreak_{count}$	44.6
6	$temp_Cv_{Smax-SP}$	44.7
9	TTC_{ESC10}	50.2
10	$temp_Cv_{LAST10}$	51.4
9	$SnowTP_{ESC10}$	58.0
10	TTC_{LAST10}	66.9
7	$temp_Cv_{Smax_T0}$	69.6

Подобные изменения – результат увеличения средней зимней температуры воздуха $winter_temp_{mean}$ группы $F-2$ и ее изменчивости $winter_temp_{CV}$ – в этих регионах диагностируется рост их значений на 20–40 %, а в верховьях рр. Ока, Днепр и нижнем течении р. Дон – до 50–100 %. В то же время, уменьшение на величину до 10 % отмечено в горной части рр. Урал и Уфа. При этом сумма отрицательных температур $subzero_temp_{sum}$ группы $F-3$ зимнего периода к северу и востоку от р. Волга сократилась на 7–20 %, а к западу и югу – на 20–30 %. Более существенными изменениями характеризуются показатели зимних оттепелей группы $F-4$. Так, для большей части ЕТР в сравнении с серединой XX в. увеличилось количество зимних оттепелей $snowbreak_{count}$, сопровождающихся сходом снежного покрова – на 45 % в среднем для равнины и до 50–69 % в бассейнах рек северо-запада, Верхней Волги, р. Северная Двина выше д. Абрамково и бассейна р. Дон ниже впадения р. Хопер. Продолжительность подобных оттепелей в среднем увеличилась на 36 %, на Верхней Оке и Верхнем Днепре – до 50–66 %. Эти процессы сопровождаются ростом количества осадков, выпадающих в зимний период при положительных температурах, $ThawTP$ в среднем на 14.5 %, а в бассейнах рек северо-запада, Оки, Верхнего Днепра, р. Сура, верхнего течения рр. Хопер и Медведица, а также р. Самара – до 20–32 %.

В периоды на границе зимы и весны наиболее существенным изменениям подвергся запас воды в снежном покрове: группе $F-6$ – $F-7$ сократился на 42–45 %, в группах $F-10$ и $F-12$ – на 64–77 %, в группах $F-8$ и $F-11$ – на 90–95 %, в группе $F-11$ – на 90 %. Коэффициенты вариации температуры воздуха увеличились на 70 % и 51 % соответственно в группах $F-7$ и $F-10$. Относительные изменения свыше 50 % диагностированы и для трендовых коэффициентов температуры групп $F-9$ и $F-10$ (+50 % и +67 % соответственно).

Разнонаправленные изменения выявлены и для характеристик таяния снежного покрова группы $F-13$. Так, в среднем для речных бассейнов ЕТР существеннее всего уменьшились трендовый коэффициент активного таяния (-77 %) и скорость пассивного таяния (-78 %). Отрицательная динамика характерна и для скорости активного таяния (-61 %), трендового коэффициента общего таяния (-52 %) и общей скорости таяния (-41 %). В то же время положительные изменения в условиях современного климата отмечены для абсолютного и относительного времени таяния (+16 %), абсолютного и относительного времени пассивного таяния (+20 %).

Относительные изменения характеристик факторов остальных групп в среднем по ЕТР незначительны. Однако локально их динамика может приводить к существенным последствиям. Так, например, срок достижения максимальной 10-дневной влажности почвы $swvl_day_{max_10d}$ в бассейнах Верхней Оки и Верхнего Дона, а также на реках нижнего течения р. Северский Донец сдвинулся на более ранние сроки, а в бассейнах рр. Чусовая, Уфа и Урал – на более поздние.

В части непосредственных значений влажности почвы примечательны результаты величин с индексом *_type*, поскольку они нагляднее отражают пространственную картину изменений, которые можно сопоставлять в условиях разных типов почвы. Так, в конце августа наиболее значимые изменения отмечаются в бассейнах рр. Печора, Вычегда, Вятка и Верхняя Кама (до -24 %). В конце октября слабopоложительная динамика влажности почвы диагностируется для бассейна р. Урал (до 13 %). Перед сходом снежного покрова снижается влажность почвы в бассейнах рр. Кама и Урал (до -12 %), а в бассейнах Верхней Оки и Днепра – растет до +24 %. В то же время рост наибольшей влажности почвы за период формирования условий предстоящего весеннего половодья наиболее существенен от Финского залива до р. Северная Двина (до +10 %), а ее снижение – в бассейнах рр. Вычегда, Хопер и Медведица (до -10 %).

Генерализация наблюдаемых изменений в рамках выделенных 24 подбассейнов подтверждает наиболее интенсивную динамику в центре, на западе и юге ЕТР (табл. 3.2, Таблица 3.3, Таблица 3.4).

Выводы к главе 3:

В Главе 3 представлен пространственный и временной анализ характеристик стока половодья для современного периода. Средний слой стока половодья на ЕТР сократился до 95 мм. Сравнение с картами СНИП 1985 г. указывает на существенное смещение изолиний 10–140 мм. К северу от них наблюдаются разнонаправленные изменения. 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. Позже всех на изменение климата отреагировали реки бассейнов севера ЕТР, Камы, Белой, Нижней Волги и среднего течения Урала. Таким образом, к началу современного изменения климата в 1980-е гг. перелом произошел на более чем половине водосборов.

Результаты анализа характеристик потенциальных ФФС показали, что на более чем половине ЕТР смягчение зим привело к сокращению запаса воды в снеге на 50–128 %. К началу весны оно составило 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.

Таблица 3.2 – Средняя величина изменений метеорологических характеристик по группам в рамках выделенных подбассейнов в 1980–2017 гг.
(в % относительно 1950–1979 гг.; номера регионов соответствуют Рисунок 2.2 и Приложение Б.1)

№ региона	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11	F-12	F-13	F-14	F-15	F-16	F-17
0	-7	1.4	-3.5	6.7	9.6	-4.7	-0.9	-8.8	16.1	-8.5	5.8	5.3	-30	-0.3	-0.4	0.1	-0.1
1	-7.2	-1.8	-5	12.2	1.1	15.6	18.7	-6.3	15.3	3.8	-3	1.1	0.4	-0.8	-0.4	0	-0.1
2	-10	0.5	-5.2	7	-0.9	8.6	13.5	-0.8	14.3	8.7	-3.2	1.2	-9.5	-0.4	-0.6	-0.1	0.2
3	-4.1	-1.8	-4.3	7.3	1.5	6.2	7.3	-2.2	13	-0.6	-4.3	7.2	-16.9	-0.6	-0.1	0	-0.2
4	-0.6	1.5	-3.5	2.9	3.9	2.9	8.7	-4.2	20.1	-1.3	-7.9	-4.2	-24.6	-1.6	-0.9	0	0.4
5	-5.3	-1.4	-3.4	4	5.4	-9.9	-5.9	-7.7	19.7	6.5	-2.8	6	-28	-0.6	-0.1	-0.2	0
6	-7	0.3	-2.4	5.1	6.1	6.5	7.5	-4.9	14.7	-7.4	-4.1	-3.1	-10	-0.5	-0.8	0.1	0.1
7	-7.1	-0.2	-3	1.9	7.9	3.6	10.9	-7.6	16.5	-5.7	-4.9	2.9	-28.4	-0.9	-0.8	-0.1	0.3
8	-29.4	-4	-12.6	16.4	-32.6	19.4	21.3	-8.2	15	-1.7	-18	-3	-43.7	-0.6	-0.1	-0.9	0.7
9	-35.8	-8.4	-14	16.5	-45.6	21.3	24	-17.6	-2.9	30.8	-20.7	-5	-35	-0.3	-0.7	-1.2	-0.6
10	-17.4	-4.2	-9	12.6	-16.2	12.1	27.3	-8.2	11.3	9.7	-9.2	-1	-21.9	-1	-0.1	-1.1	0.3
11	-12.9	-2.5	-7.4	11.5	-10.7	14.3	27.7	-5.1	16.4	14.6	-8.7	-1.7	-21	-0.3	-0.3	-1	0.4
12	-9.4	1.3	-6.7	13.7	-6.9	7.4	23.6	6	19.9	4.7	-4	6.3	-10.7	-0.7	-0.7	-0.5	1.4
13	-15.1	0.4	-6.8	8.4	-2.6	8.7	20.3	4.3	7.3	25.1	0.2	2.1	-7.7	0.4	-0.1	-0.3	-0.1
14	-33.5	-4.4	-13.6	20.1	-35.2	12.7	19.6	-17.6	24.3	31.3	-21.3	-13.2	-53	0.4	-1	-1.2	-1.8
15	-19.5	-3	-10.1	14.9	-23.9	9.3	32.7	-4.6	7.2	11.9	-8.1	-0.4	-26.7	0.6	-0.7	-0.9	1
16	0.1	0.8	-3.2	4.1	2.7	-0.1	-4.9	-1.9	-12.9	3.3	-5.5	0.7	-6.6	-1.3	-1.7	0.4	0.2
17	-7.9	2.1	-3.6	3.4	1	3.5	5.2	-2.3	14.7	3.6	-3.6	7.7	-1.8	-1.3	-1.7	0.3	-0.8
18	-17.3	1.3	-4.3	1.2	0.4	5.5	34.4	-1.7	9.5	4.3	-2.1	0.4	-8.6	-1.1	-0.7	0.1	-0.9
19	-6.5	1.1	-4.7	7.1	-1.2	7.8	12.3	0.6	16.6	15.5	-2.8	0.8	-2	-0.8	-1.2	0.1	-0.2
20	-34.1	-4.2	-13.3	16.3	-29.1	9.4	16.6	-10.1	22.1	12.6	-17.2	-9.3	-46.4	0.7	-0.7	-0.7	-1.3
21	-28.2	-3.8	-11.5	13.9	-8.1	5.7	18.6	-6.8	14.8	7.1	-12.6	-6.3	-36.3	0	0	-0.7	0.9
22	-28	-4.7	-14.5	14.1	-24.4	2.3	8.8	-5.5	17.4	7.6	-10.7	-4.1	-39.3	0.5	0.3	-0.4	-0.9
23	-14	5.2	-3.3	6.1	4.9	2.4	27.3	1.2	8.7	0	-3.9	-12.7	-6.2	-2	2.5	0.3	-1.5

Таблица 3.3 – Минимальные значения изменений метеорологических характеристик по группам в рамках выделенных подбассейнов в 1980–2017 гг. (в % относительно 1950–1979 гг.; номера регионов соответствуют Рисунок 2.2 и Приложение Б.1)

№ региона	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11	F-12	F-13	F-14	F-15	F-16	F-17
0	-23.7	-6.9	-8.7	-8	0.5	-26.9	-216	-109	-28.2	-55.2	-98.8	-69.4	-249	-6.4	-2.7	-3	-3.8
1	-22.6	-16.5	-12.3	-5.4	-15.3	-25.9	-27.2	-39.7	-23.6	-44.1	-64.8	-52.1	-19.4	-9.8	-1.5	-7.6	-5
2	-26.5	-15.9	-15.2	-6.8	-19	-28.2	-27.2	-65.6	-4.5	-35.1	-65.4	-44.6	-48.4	-9.6	-7.4	-6	-2.2
3	-14.8	-12.1	-12	-10.3	-6.7	-17.7	-52.1	-59.3	-21.5	-31.7	-55.3	-39.8	-150	-10.7	-0.6	-5.4	-4.2
4	-9.3	-7.9	-10.8	-19.8	-0.9	-29.5	-35.5	-69	-2.7	-23.5	-44.5	-30.7	-228	-17	-6.1	-2.7	-6.6
5	-17.6	-6.4	-8.9	-13.2	-0.3	-125	-136	-102	-17.8	-43.3	-67.8	-50.8	-176	-8.6	-0.8	-3.8	-2.6
6	-19.6	-6.8	-8	-6.2	0.6	-18.2	-19.3	-104	-7.1	-76.5	-97.6	-63.7	-60.4	-14.4	-6.8	-3.7	-3.2
7	-20.6	-6.3	-8.4	-8.5	2.8	-26.3	-28.7	-118	-2.4	-52.1	-105	-66.2	-188	-12.8	-5.8	-2.6	-3.2
8	-80.8	-38.4	-26	-4.5	-195	-113	-121	-160	-16.5	-105	-171	-127	-188	-11.5	-1.1	-17.9	-5.6
9	-83.2	-44.1	-27.9	-7.2	-239	-92.1	-107	-169	-177	-155	-222	-178	-141	-4.8	-2.4	-18.4	-8.2
10	-43.6	-26.8	-20.2	-4	-87.9	-56.2	-54.3	-154	-17.3	-96.8	-151	-116	-89.2	-7.7	-2.4	-14.9	-5.2
11	-37.5	-24.5	-19.3	-14.3	-64	-49.9	-39.5	-140	-23	-67.2	-109	-81.9	-101	-9.1	-3.7	-10.9	-3.7
12	-29.3	-20.1	-18.3	-8.2	-36	-48.5	-20.9	-54	-24.3	-44.4	-30	-27	-62.1	-11.3	-3.6	-11.5	-3.8
13	-35.9	-21.6	-19.5	-9	-19.4	-38.4	-29.4	-70.2	-28.6	-39.4	-68.4	-48.7	-44	-7.9	-8.3	-10	-3.8
14	-86.8	-41.6	-28.2	-2.4	-168	-107	-103	-228	0	-173	-207	-214	-220	-2.6	-4.7	-18.2	-19.4
15	-49.6	-32.4	-24.2	-3.6	-118	-56.3	-56.2	-139	-8	-85.2	-123.6	-98	-120	-11.5	-5.3	-12	-3.3
16	-7.4	-10.5	-12.4	-11.4	-1	-19.1	-148	-45.5	-156	-33.1	-21	-26.4	-75.8	-16.2	-12.3	-2.2	-4
17	-23.6	-11.7	-14.1	-15.1	-8.9	-18.8	-140	-54.8	-6.8	-16.4	-24.9	-19.7	-24.5	-9.6	-15	-4.4	-5
18	-40.1	-12	-14.2	-18	-11.7	-52.2	-24.7	-36	-9.1	-30.8	-52.4	-38	-33.2	-6.5	-9.7	-7.7	-10.3
19	-20.1	-15	-15.9	-9.8	-11.2	-21.3	-18.6	-32.6	-10.6	-22.6	-28.4	-23	-30.5	-11.3	-10.8	-4.4	-3.3
20	-88.2	-36.1	-27.3	-3.2	-128	-97.1	-101	-204	-6.6	-148	-248	-184	-169	-5	-2.7	-13.1	-11.6
21	-71.9	-32.6	-25.5	-7.2	-35.7	-70.7	-72.2	-151	-13.1	-103	-157	-119	-164	-11.4	-3.8	-10	-4.9
22	-79.5	-43.6	-27.2	-3.2	-76	-74	-78	-169	-5.7	-118	-137	-139	-135	-6.7	-1.1	-7.6	-14.2
23	-36.2	-9.1	-11.9	-10.4	-1.5	-91.4	-40.3	-38.3	-4.4	-55.2	-36.7	-179	-31.7	-17.6	-1.6	-2.9	-19.8

Таблица 3.4 – Наибольшие значения изменений метеорологических характеристик по группам в рамках выделенных подбассейнов в 1980–2017 гг. (в % относительно 1950–1979 гг.; номера регионов соответствуют Рисунок 2.2 и Приложение Б.1)

№ региона	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11	F-12	F-13	F-14	F-15	F-16	F-17
0	12	6.9	3.3	31.8	14.8	34.9	100	37.9	100	20.5	37.9	26.2	33.4	4.5	0.4	4.6	3.9
1	11.1	17.3	4.9	49.9	10.4	129	125	8.9	77.3	77.3	18.4	25.8	20	4.7	0.1	9.2	7.2
2	10	8.4	4.7	41.7	6	46.4	78.7	16.7	55	44.7	11.7	34.8	12.5	5.1	3.2	8.5	7.6
3	8.8	9.9	4.7	43.2	8.4	38.1	96.3	26.2	64.4	71.3	26	170	11.4	5.4	0.2	5.4	8
4	9.9	8.4	4	33.6	9.3	19.7	120	22	69.5	36	13.9	27.8	17.4	6.6	1.9	5.1	4
5	8.3	3.7	3.5	26.2	10.8	24	113	26.2	94.1	179	26.2	103	8	4.1	0.2	4.9	5.5
6	8.1	5.1	2.8	35.3	12.1	27.4	35.2	15.3	79.9	43.9	20.8	19.6	8.9	5.7	2.1	6.5	7
7	7	4.1	2.7	23.4	12.9	30.9	101	33.8	80.2	23.4	13.7	37.5	8.4	5.1	1.9	5	6.3
8	16.4	19.9	6.2	53.1	4.2	140	131	36.2	82.7	49.9	9.7	99.5	34.5	6.7	1.8	16.4	9.9
9	12.2	36.4	4.3	43.2	-2.6	209	102	28.7	50.3	147	6.8	149	42.3	4.6	0.9	15.6	12.1
10	12.1	21.8	6.1	50.8	2.8	47.2	108	20.9	49.7	66	14.9	93	32	4.1	2.3	12.3	12
11	13	19.4	7.1	56.7	3.5	68.5	87.1	25.7	97.2	89.5	8.3	73.7	26	5	0.9	13.4	17
12	12.1	14.4	6.1	51.1	2.6	30.4	154	34	100	45.5	5	114	24.1	6.6	0.5	10.5	13.5
13	9.9	11.6	5.3	47	3	39.3	81.8	34.7	61.3	138	34.3	30.3	14.6	6.1	5.3	14.4	10.2
14	17.6	34.2	4.5	51.1	-1.6	48.6	53.2	26.8	85.3	165	10.6	57.1	38.8	3.9	2	19.4	14.1
15	12.1	23.1	6	45.8	-2.3	53.7	107	19.4	62.7	136	11.6	77.2	38.8	10.8	2.8	14.3	13.3
16	9.9	9	4.3	37.4	6.4	14.7	36.8	15.6	46.1	35	15.5	73.4	17.5	7	3.5	4.9	4.5
17	12.4	11.5	4.2	45.7	6.3	27.9	199	28.6	80.3	34.2	28.6	118	20	5	5	5.1	5.1
18	10.3	9.2	2.9	41.1	5.1	58	105	16.5	49.7	31.2	27	23.2	15.5	3.2	4.2	5.1	6.4
19	10.7	9.4	5.1	41.6	3.3	33.7	103	35.2	59.7	64.6	34.9	39.7	9.5	5.9	3.7	6.1	7.3
20	16.8	31.5	4.5	47.4	-2.8	49.8	52.9	19.6	97	183	14.1	29.3	29.7	11.2	0.5	15	12.8
21	16.1	23.4	4.2	46.2	2.4	96.2	52.1	26.8	81	163	23.9	28.4	31.3	16.3	3.4	11.2	14.9
22	18.3	40.2	2.8	51.2	-7	81.7	47.3	18	76.3	223	18.5	73.8	18.9	10.1	1.9	8.6	8.3
23	10.7	16.7	0.4	42.6	9.5	52	112	23.9	47.6	70.6	16.6	28	15.5	6.5	7.5	6.7	4.9

ГЛАВА 4. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ СЛОЯ СТОКА ПОЛОВОДЬЯ С ФАКТОРАМИ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Оценка тесноты связи слоя стока половодья с формирующими его факторами – первый шаг на пути к формированию современных представлений о действующих факторах формирования слоя стока весеннего половодья. Данная глава посвящена анализу парных коэффициентов корреляции между стоком половодья и 209 характеристик потенциальных ФФС. Для генерализации результатов расчетов в большинстве случаев анализировались модули максимальных коэффициентов корреляции группы.

4.1. Связь стока половодья с характеристиками снежного покрова (группа *F-1*), зимнего периода (группа *F-2*) и зимних морозов (группа *F-3*)

Группа *F-1* содержит 17 характеристик, среди которых 6 вариантов определения максимального запаса воды в снежном покрове, использовавшихся ранее в практике прогнозов (Приложение А). Остальные характеристики группы, как правило, прежде не встречались в работах: максимальный 10-дневный, сумма, средний за периоды запас воды в снежном покрове, а также их коэффициенты вариации. Они дополнены сроками развития снежного покрова, общим числом дней от первого до последнего дня со снежным покровом и числом дней со снежным покровом без учета оттепелей, в которые происходил его сход.

В период 1980–2017 гг. характеристики снежного покрова (группа характеристик *F-1*) в пределах ЕТР описывают в среднем 25 % дисперсии слоя стока ($R = 0.48$). Наибольшие значения дисперсии до 62 % ($R = 0.76–0.79$) достигаются в бассейнах рр. Ока и Днепр, в частности, на рр. Протва, Осётр и Таруса. Отдельные повышенные значения встречаются в бассейнах р. Урал, Мезень и Печора. А в бассейнах рр. Кама, Белая, Нижняя Волга и Средний Дон характеристики снежного покрова описывают в среднем менее 9 % дисперсии ($R < 0.3$) (Приложение В.1).

В структурном отношении группа *F-1* в пределах ЕТР представлена не только максимальными запасами воды в снеге (Рисунок 4.1а). В зоне недостаточного увлажнения большей значимостью характеризуется продолжительность залегания снежного периода (в пределах группы для них достигается $R_{\max}$), а к северу от нее – сроки развития снежного покрова. В среднем их теснота связи превышает связь стока с максимальным запасом воды в снеге лишь на 0.1. На отдельных реках бассейнов Волги, Дона и Урала эта разница достигает 0.2–0.3, а максимум ее диагностирован на р. Валуй (бассейн р. Северский Донец) – 0.39.

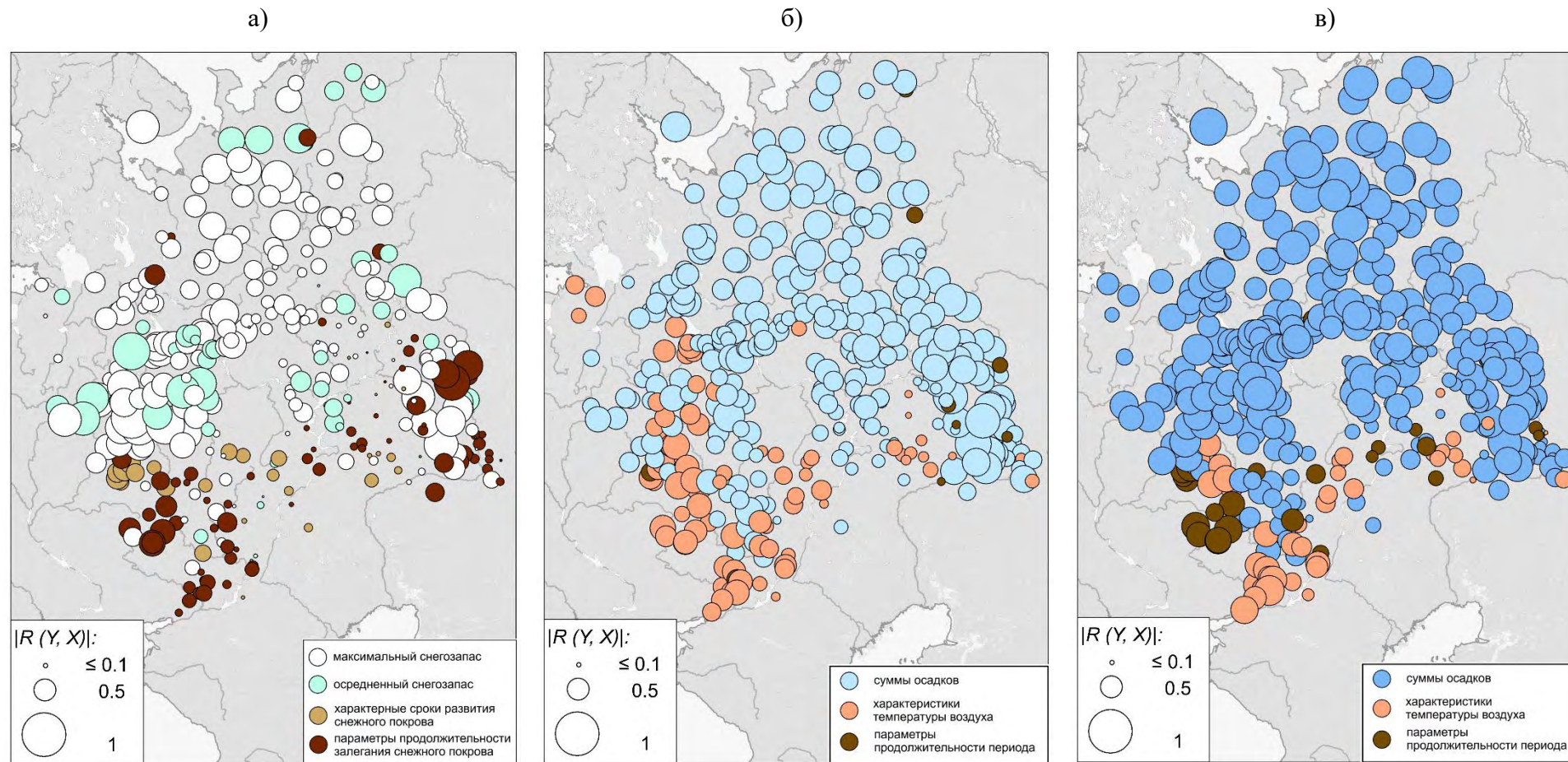


Рисунок 4.1 – Пространственное распределение максимального коэффициента корреляции $R_{\max}(Y, X)$ стока половодья с характеристиками групп снежного покрова $F-1$ (а), зимнего периода $F-2$ (б) и зимних морозов $F-3$ (в). Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока за половодье

Пространственное распределение речных водосборов, для которых максимальный коэффициент корреляции достигается для средних за период или максимальных 10-дневных запасов воды в снежном покрове, не поддается зонированию. Тем не менее, выявление факта наличия и доминирования подобной связи не позволяет в дальнейших исследованиях игнорировать такие виды осреднения.

Средние характеристики зимнего периода (группа *F-2*) содержат в себе три варианта определения интегральной температуры воздуха и четыре – для осадков. Они оцениваются для периода *winter_days* – от первого до последнего перехода температуры воздуха через 0 °С, а три – до 10-го дня после его окончания (Приложение А).

В среднем характеристики группы *F-2* описывают 24 % изменчивости слоя стока половодья, на рр. Большой Ик, Большой Авзян и Вига увеличиваясь до 63–67 % (Приложение В.1). Также высокая теснота связи характеристик группы *F-2* со слоем стока половодья отмечается в бассейне р. Урал, Белая, Чусовая и Мезень. В бассейнах рр. Сура, Белая в нижнем течении и на Нижней Волге связь ослабляется. В бассейнах рр. Дон, Северная Двина, Мезень и Печора характеристики группы *F-2* описывают большую дисперсию слоя стока половодья, чем для группы *F-1*.

Для большинства водосборов максимальный коэффициент корреляции среди характеристик группы *F-2* со стоком половодья достигается для сумм осадков (Рисунок 4.1б). В то же время, на реках северо-запада, Верхней Волге и Верхней Оке, большей части бассейна р. Дон и Сура, а также на Нижней Волге главным ФФС половодья от группы *F-2* выступают характеристики температуры воздуха. Водосборы, где преобладает роль продолжительности зимнего периода, не создают ареала.

Характеристики группы *F-3* описывают морозный период *frozen_days* – дни с отрицательной температурой воздуха в пределах *winter_days*. Дополнительно выделены периоды от начала устойчивых морозов и морозный период второй половины зимы. Как и для группы *F-2*, для него определены температура воздуха и осадки (Приложение А).

Наиболее тесно со стоком половодья связаны характеристики зимних холодов группы *F-3*. В среднем они описывают 30 % изменчивости стока (Приложение В.1). Максимальная теснота связи диагностируется на рр. Мезень, Вашка и Варгуза. Области значений коэффициента корреляции R свыше 0.7 охватывают большинство рек севера ЕТР, Верхней Волги и Камы. Слабая связь характеристик зимних морозов со стоком тяготеет к южным районам – Нижней Волге, Нижней Каме, рр. Сура, Белая и Урал.

Среди характеристик группы *F-3*, как правило, максимальные значения коэффициента корреляции со стоком достигаются для суммы осадков за зиму при отрицательной температуре *SnowTP* (Рисунок 4.1в). Менее чем для 20 % водосборов по самой южной части анализируемой

области доминирует температура воздуха и продолжительность морозного периода. Это согласуется с результатами по группе $F-2$, но характеризуется более сжатым ареалом.

Для оценки наиболее значимого приходного динамического фактора, проведен совместный анализ групп $F-1$, $F-2$ и $F-3$. От группы $F-1$ взяты коэффициенты корреляции стока за половодье с максимальным ($Smax$, $Smax_{05-31.01}$, $Smax_{05-28.02}$, $Smax_{31.01-15.02}$, $Smax_{31.01-28.02}$, $Smax_{05.01-31.03}$, $Smax_{10d}$) и средним ($Ssum$, $Smean_{snow_days}$, $Smean_{snow_period}$) запасом воды в снежном покрове. Группа $F-2$ представлена осадками ($TPsum_{01.11-SP}$, $TPsum_{01.02-SP10}$, $TPsum_{10.02-SP10}$, $TPsum_{20.02-SP10}$), а $F-3$ – только суммой твердых осадков $SnowTP$. Для каждого набора определен максимальный модуль коэффициента корреляции ($Rmax(Y, Snow)$, $Rmax(Y, TPsum)$ и $R(Y, SnowTP)$) и соответствующие разности:

$$Dif_1 = Rmax(Y, TPsum) - Rmax(Y, snow) \quad (4.1)$$

$$Dif_2 = Rmax(Y, SnowTP) - Rmax(Y, snow) \quad (4.2)$$

Установлено, что в пределах выборки в 62 % случаев главным приходным фактором выступает сумма твердых осадков, в 26 % – сумма осадков за зимний период, в 12 % – запас воды в снежном покрове (Рисунок 4.2а). Анализ Dif_1 и Dif_2 показывает, что, как правило, разность между максимальными коэффициентами корреляции для видов приходной составляющей невелика – 0.1–0.2 (Рисунок 4.2б,в). В бассейнах Верхней Оки, Верхнего Днепра и частично Верхней Волги и между 52 и 55° с.ш. с запада на восток более тесно со стоком связан запас воды в снежном покрове. Здесь и в Донском бассейне его коэффициент корреляции на 0.2–0.35 превышает аналогичный для общих сумм осадков. В южной половине Уральских гор и их предгорий, реже – в бассейнах рр. Онега, Северная Двина, Вятка и Рыбинского вдхр. большую изменчивость описывает общая сумма осадков за зиму: в среднем 35 % изменчивости слоя стока половодья при среднем коэффициенте корреляции 0.58. При этом вклад запаса воды в снежном покрове здесь резко уменьшается: в бассейнах рр. Вятка, Кама и Урал величины Dif_1 и Dif_2 достигают

0.2–0.3 и более (Рисунок 4.2б,в). Предположительно, это может быть связано с дальностью проникновения интенсивных оттепелей на ЕТР в зимний период, обеспечивающих значительное сокращение запаса воды в снеге или временный сход снежного покрова.

Оценка пространственной общности факторов групп $F-1$, $F-2$, $F-3$ и других групп может быть проведен с помощью алгоритмов кластеризации, которые позволяют выделять однородные районы. Подобное исследование будет проведено в будущем, в рамках данной работы генерализация выделена методом экспертной оценки и географо-гидрологических обобщений. В выводах представлены преобладающий тип переменной и самая распространенная характеристика. В случаях, когда доминирующий тип переменной представлен разными характеристиками с близкой по величине повторяемостью, они могут не соответствовать друг другу. Результаты анализа объединены в подбассейны (табл. 4.1, Таблица 4.1)

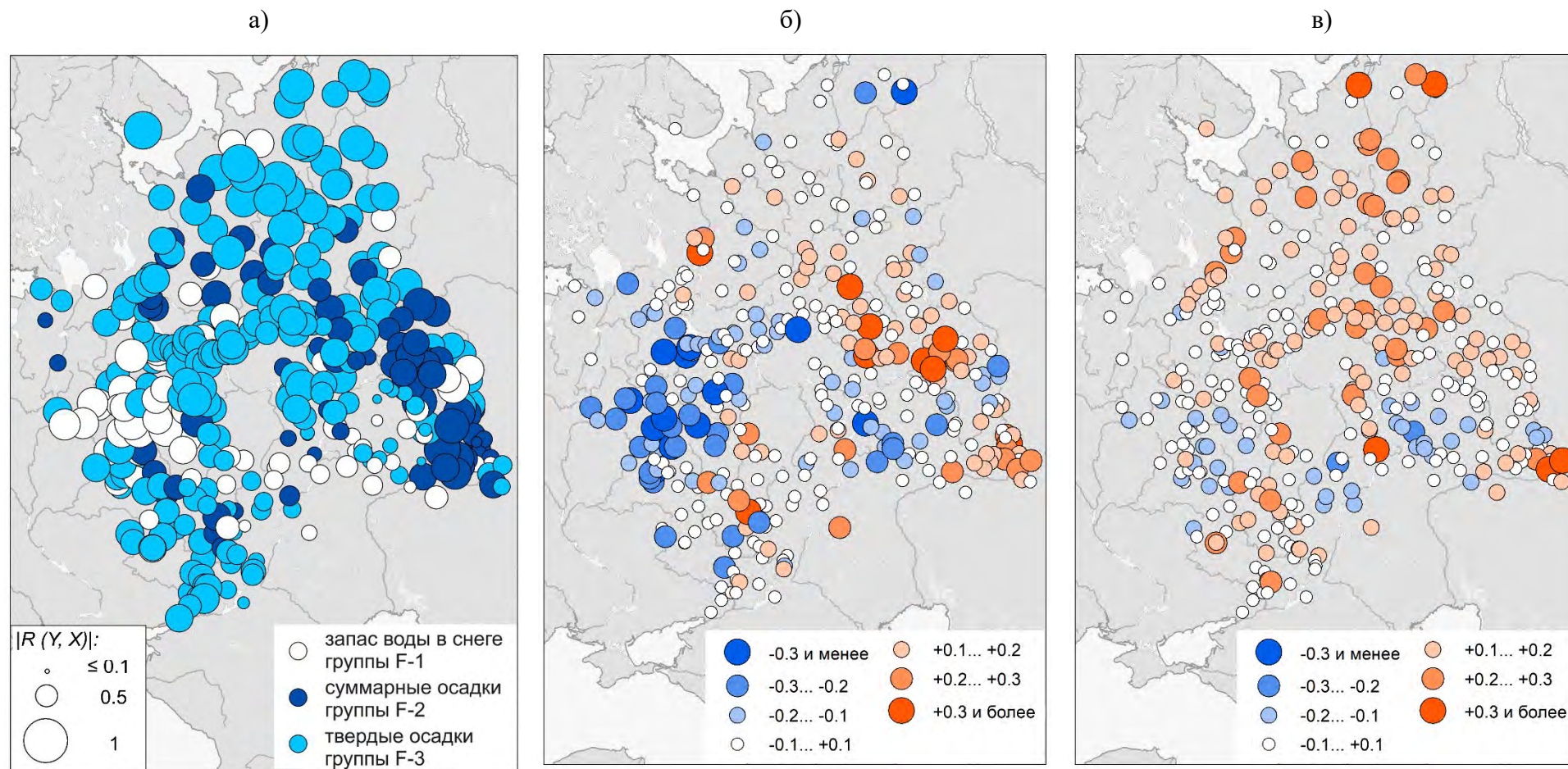


Рисунок 4.2 – Пространственное распределение доминирующей приходной составляющей из групп $F-1$, $F-2$ и $F-3$ в пределах ЕТР (а), а также параметров Dif_1 (б) и Dif_2 (в). Размер символа (а) пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока за половодье

Таблица 4.1 – Доминирующие характеристики групп *F-1*, *F-2* и *F-3* по крупным речным бассейнам (структура представления информации: доминирующий тип переменной (самая распространенная характеристика) – средний максимальный коэффициент корреляции для группы)

№ п/п	Регион	<i>F-1</i>	<i>F-2</i>	<i>F-3</i>
0	Кольский п-ов	запас воды в снежном покрове ($S_{max05.01-31.03}$) – 0.71	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.68	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.86
1	Онега	запас воды в снежном покрове ($S_{max05-28.02}$) – 0.43	общая сумма осадков ($TP_{sum10.02-SP10}$) – 0.54	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.53
2	Северная Двина выше д. Абрамково	запас воды в снежном покрове (S_{max}) – 0.47	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.55	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.55
3	Северная Двина ниже впадения р. Вычегда	запас воды в снежном покрове ($S_{max05.01-31.03}$) – 0.60	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.58	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.70
4	Вычегда	запас воды в снежном покрове ($S_{max05.01-31.03}$) – 0.54	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.54	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.66
5	Мезень	запас воды в снежном покрове ($S_{max05.01-31.03}$) – 0.65	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.63	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.77
6	Печора от истока до впадения р. Уса, включая ее	запас воды в снежном покрове (S_{max}) – 0.56	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.51	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.67
7	Печора ниже впадения р. Уса	запас воды в снежном покрове ($S_{max05.01-31.03}$) – 0.53	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.53	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.71
8	Реки северо-запада	запас воды в снежном покрове (-) – 0.42	температура воздуха (-) – 0.38	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.45
9	Днепр и Западная Двина	запас воды в снежном покрове (S_{max10d}) – 0.66	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.48	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.64
10	Верхняя Волга	запас воды в снежном покрове ($S_{max31.01-15.02}$) – 0.55	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.48	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.58
11	Бассейн Горьковского вдхр.	запас воды в снежном покрове (S_{max}) – 0.53	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.43	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.61
12	Средняя Волга	запас воды в снежном покрове (S_{max}) – 0.43	общая сумма осадков ($TP_{sum01.11-SP}$) – 0.38	сумма твердых осадков ($SnowTP$) – 0.55

Таблица 4.1 – Продолжение

№ п/п	Регион	<i>F-1</i>	<i>F-2</i>	<i>F-3</i>
13	Нижняя Волга	количество дней со снежным покровом (<i>snow_days</i>) – 0.38	общая сумма осадков (<i>TPsum</i> _{01.11-SP}) – 0.35	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.43
14	Верхняя Ока	запас воды в снежном покрове (<i>Smax</i>) – 0.61	температура воздуха (<i>winter_temp</i> _{mean}) – 0.48	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.59
15	Средняя и Нижняя Ока, Сура	запас воды в снежном покрове (<i>Smax</i> _{05.01-31.03}) – 0.52	общая сумма осадков (<i>TPsum</i> _{01.11-SP}) – 0.43	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.56
16	Кама от истока до впадения р. Чусовая	запас воды в снежном покрове (<i>Smax</i> _{05.01-31.03} , <i>Smax</i> _{10d}) – 0.53	общая сумма осадков (<i>TPsum</i> _{01.11-SP}) – 0.55	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.63
17	Кама от впадения р. Чусовая до р. Белая	запас воды в снежном покрове (<i>Smax</i> _{31.01-15.02}) – 0.40	общая сумма осадков (<i>TPsum</i> _{01.11-SP}) – 0.63	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.57
18	Белая	запас воды в снежном покрове (<i>snow_days</i>) – 0.49	общая сумма осадков (<i>TPsum</i> _{01.11-SP}) – 0.49	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.54
19	Нижняя Кама и Вятка	запас воды в снежном покрове (<i>Smax</i>) – 0.37	общая сумма осадков (<i>TPsum</i> _{01.11-SP}) – 0.51	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.52
20	Верхний Дон	количество дней со снежным покровом (<i>snow_days</i>) – 0.47	температура воздуха (<i>winter_temp</i> _{mean}) – 0.53	отрицательные температуры воздуха (<i>subzero_temp</i> _{sum}) – 0.54
21	Средний Дон	количество дней со снежным покровом (<i>snow_days</i>) – 0.35	температура воздуха (<i>winter_temp</i> _{mean}) – 0.41	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.42
22	Нижний Дон	количество дней со снежным покровом (<i>snow_days</i>) – 0.47	температура воздуха (<i>winter_temp</i> _{mean}) – 0.50	отрицательные температуры воздуха (<i>subzero_temp</i> _{sum}) – 0.58
23	Урал	количество дней со снежным покровом (<i>snow_days</i>) – 0.41	общая сумма осадков (<i>TPsum</i> _{01.11-SP}) – 0.47	сумма твердых осадков (<i>SnowTP</i>) – 0.41

4.2. Связь стока половодья с зимними оттепелями (группа *F-4*)

Группа *F-4* включает в себя 17 характеристик зимних оттепелей. Выделяемые по температуре воздуха оттепели обозначаются *thaw*, по факту схода снежного покрова – *snowbreak*. В группе представлены такие характеристики как количество оттепелей, средняя, максимальная и общая продолжительности оттепелей, температура воздуха за оттепель, суммы осадков и коэффициенты вариации (Приложение А).

Слой стока весеннего половодья наиболее тесно связан с характеристиками группы *F-4* в южной половине равнины, а наиболее слабо – в северной и северо-западной (Рисунок 4.3а, Приложение В.2). Средний коэффициент корреляции – 0.36, что соответствует 14 % изменчивости величины стока. Наибольшая величина описываемой дисперсии свыше 30 % диагностирована для рр. Сутка и Уфа ($R > 0.55$).

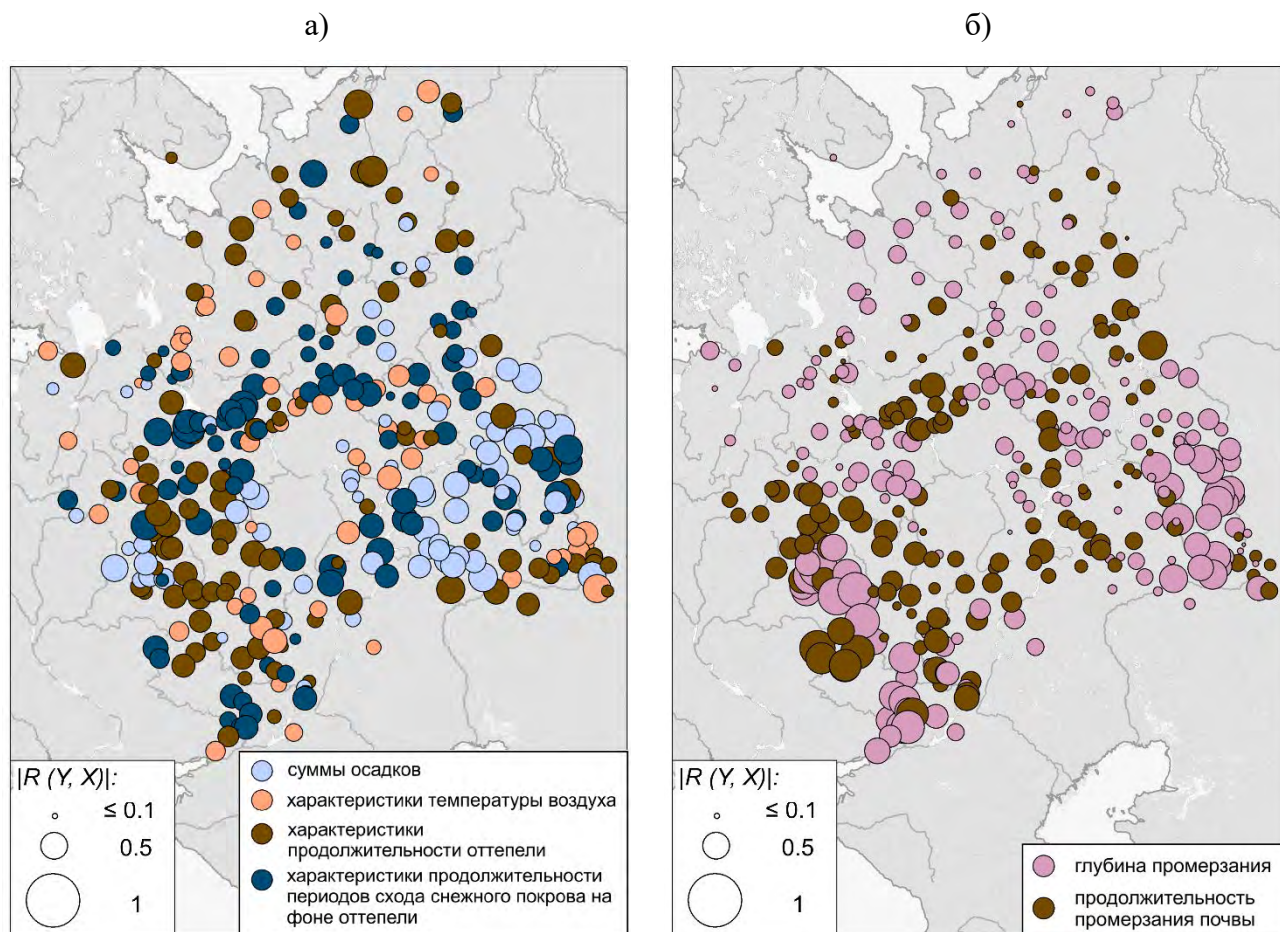


Рисунок 4.3 – Пространственное распределение факторов разных типов, относящихся к группам *F-4* (А), *F-5* (Б). Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока половодья

Наиболее значимые характеристики группы *F-4* в пространстве формируют два ареала. Первый – в бассейне Нижней Волги, рр. Кама и Белая – представлен суммами осадков (Рисунок 4.3а). Второй ареал охватывает практически всю оставшуюся территорию: здесь большую изменчивость стока среди членов группы *F-4* описывают общая, максимальная и средняя продолжительность оттепелей. Примечательно, что в данной группе не выделяется ареала для температуры воздуха, которая была распространена в работах советских исследователей. То есть если речь идет исключительно об оттепели как об одном из факторов, то интенсивность оттепели по этим результатам оказывается чуть менее значимой, нежели время, в течение которого она формировалась.

Сводные результаты анализа связи слоя стока за половодье с оттепелями (группа *F-4*) представлены в (Таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Доминирующие характеристики группы *F-4* по крупным речным бассейнам (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	Регион	F-4
0	Кольский п-ов	Продолжительность ($thaw_{len_max}$) – 0.22
1	Онега	Температура воздуха ($thaw_temp_{Cv}$) – 0.30
2	Северная Двина выше д. Абрамково	Продолжительность ($snowbreak_{Cv}$) – 0.31
3	Северная Двина ниже впадения р. Вычегда	Температура воздуха ($thaw_{count}$) – 0.35
4	Вычегда	Продолжительность ($ThawTP$) – 0.30
5	Мезень	Продолжительность ($snowbreak_{Cv}, thaw_{len_mean}$) – 0.33
6	Печора от истока до впадения р. Уса, включая ее	Количество оттепелей ($thaw_{count}$) – 0.34
7	Печора ниже впадения р. Уса	Продолжительность ($thaw_{len_mean}$) – 0.38
8	Реки северо-запада	Температура воздуха ($thaw_temp_{mean_per_thaw}$) – 0.33
9	Днепр и Западная Двина	Продолжительность (-) – 0.37
10	Верхняя Волга	Количество оттепелей ($snowbreak_{count}$) – 0.33
11	Бассейн Горьковского вдхр.	Продолжительность ($snowbreak_{Cv}$) – 0.34
12	Средняя Волга	Продолжительность ($snowbreak_{len_max}$) – 0.33
13	Нижняя Волга	Жидкие осадки ($ThawTP_{per_thaw}$) – 0.39
14	Верхняя Ока	Продолжительность ($thaw_days$) – 0.38
15	Средняя и Нижняя Ока, Сура	Продолжительность ($snowbreak_{count}$) – 0.39
16	Кама от истока до впадения р. Чусовая	Продолжительность ($snowbreak_{len_max}$) – 0.34
17	Кама от впадения р. Чусовая до р. Белая	Жидкие осадки ($ThawTP$) – 0.39
18	Белая	Жидкие осадки ($ThawTP$) – 0.42
19	Нижняя Кама и Вятка	Температура воздуха ($thaw_temp_{Cv}$) – 0.36
20	Верхний Дон	Продолжительность ($thaw_days$) – 0.39
21	Средний Дон	Продолжительность ($thaw_days$) – 0.32
22	Нижний Дон	Количество оттепелей ($snowbreak_{count}$) – 0.38
23	Урал	Температура воздуха ($thaw_{count}, thaw_temp_{mean_per_thaw}$) – 0.37

4.3. Связь стока за половодье с промерзанием почвы (группа *F-5*)

Промерзание почвы представлено 7 характеристиками: количеством дней с промерзшей почвой, максимальной, средней за весь период и интервалы глубиной промерзания (Приложение А).

Промерзание почвы *F-5* в среднем описывает 12 % дисперсии слоя стока половодья ($R = 0.32$, Приложение В.2). Повышение этих значений в среднем до 16 % характерно для Верхней Оки, рек правобережной части бассейна Дона, верхнего течения р. Белая и левобережья р. Урал, а на рр. Зуша и Сосна они достигают 45–52 % изменчивости ($R = 0.67–0.72$). На остальной части

ЕТР в большинстве случаев связь с промерзанием почвы слабая ($R < 0.3$). Таким образом, высокая значимость промерзания почвы как фактора для центральной и южной частей ЕТР в рамках статистического подхода подтверждается частично.

Среди характеристик группы $F-5$, не выделяется главной или создающей ареал (Рисунок 4.3б). Тесно связаны со стоком половодья и средние за последнюю декаду месяца, и максимальные значения глубины, и продолжительность периода с промерзшей почвой. Последняя выступает как ФФС с $R_{\max}$ от группы практически во всех речных водосборах, но больше всего – в бассейнах Верхней Оки и Верхней Камы, левобережного Дона, верхнего Днестра, малых притоков Горьковского вдхр., Нижней Волги, а также рр. Вычегда и Печора.

Сводные результаты анализа связи слоя стока за половодье с промерзанием почвы (группа $F-5$) представлены в (Таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Доминирующие характеристики группы $F-5$ по крупным речным бассейнам (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	Регион	$F-5$
0	Кольский п-ов	Глубина промерзания ($fr_depth_{\max}$) – 0.12
1	Онега	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-31.03}$) – 0.24
2	Северная Двина выше д. Абрамково	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.24
3	Северная Двина ниже впадения р. Вычегда	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-31.03}$) – 0.29
4	Вычегда	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.26
5	Мезень	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-31.03}$) – 0.25
6	Печора от истока до впадения р. Уса, включая ее	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.25
7	Печора ниже впадения р. Уса	Глубина промерзания (fr_depth_{days}) – 0.20
8	Реки северо-запада	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-28.02}$) – 0.23
9	Днепр и Западная Двина	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.31
10	Верхняя Волга	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-28.02}$) – 0.23
11	Бассейн Горьковского вдхр.	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.32
12	Средняя Волга	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-28.02}$) – 0.27
13	Нижняя Волга	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.27
14	Верхняя Ока	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.48
15	Средняя и Нижняя Ока, Сура	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.30
16	Кама от истока до впадения р. Чусовая	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.28
17	Кама от впадения р. Чусовая до р. Белая	Глубина промерзания (-) – 0.29
18	Белая	Глубина промерзания и продолжительность ($fr_depth_{\max}$) – 0.34
19	Нижняя Кама и Вятка	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-30.04}$) – 0.30
20	Верхний Дон	Глубина промерзания ($fr_depth_{21-31.03}$) – 0.53
21	Средний Дон	Продолжительность (fr_depth_{days}) – 0.34
22	Нижний Дон	Глубина промерзания (fr_depth_{days}) – 0.56
23	Урал	Глубина промерзания ($fr_depth_{\max}$) – 0.31

4.4. Связь стока половодья с условиями конца зимы – начала весны (группы *F-6*, *F-7*, *F-8*, *F-9*, *F-10*, *F-11* и *F-12*)

Условия конца зимы – начала весны в работе представлены семью группами: период от максимального запаса воды в снежном покрове до его схода (группа *F-6*), период от максимального запаса воды в снежном покрове до перехода температуры воздуха через 0°C (группа *F-7*), период от перехода температуры воздуха через 0°C до схода снежного покрова (группа *F-8*), 10 дней после схода снежного покрова (группа *F-9*), последние 10 дней зимы (группа *F-10*), первые 10 дней весны (группа *F-11*) и объединение последних двух групп – группа *F-12*. В них входят продолжительность периодов, температуры воздуха (средняя, сумма, суммы отрицательных и суммы положительных, амплитуда, трендовый коэффициент, коэффициент вариации и среднеквадратическое отклонение), суммы атмосферных осадков (общие, твердые и жидкие) и запас воды в снежном покрове.

Средний максимальный коэффициент корреляции для характеристик, оцениваемых от даты накопления максимального запаса воды в снежном покрове до его схода (группа *F-6*), составляет 0.40 (Рисунок 4.5а, Приложение В.3): они описывают около 17 % изменчивости водного стока половодья. Наибольшие значения дисперсии до 52 % ($R_{\max}$ до 0.72) достигаются для рек бассейнов Верхней Волги, Верхней Оки, а также верховий рр. Белая и Чусовая. Низкая теснота связи со стоком характерна для бассейнов рр. Унжа, Ветлуга, Юг, Урал, Вычегда и притоков Рыбинского вдхр.

Средний максимальный коэффициент корреляции для характеристик, оцениваемых от даты накопления максимального запаса воды в снежном покрове до устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в сторону повышения (группа *F-7*), составляет 0.39 (Рисунок 4.5б, Приложение В.3). Они описывают около 16 % изменчивости стока за период половодья во времени. Наибольшие значения ($R_{\max}$ до 0.69) достигаются для Верхней Оки, а также верховий рр. Белая и Урал. Низкая теснота связи со стоком характерна для тех же регионов, что и с группой *F-6*.

Средний максимальный коэффициент корреляции для характеристик, оцениваемых от устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C в сторону повышения до схода снежного покрова (группа *F-8*), составляет 0.32 (Рисунок 4.5в, Приложение В.3). Они описывают около 11 % изменчивости стока половодья во времени. Наибольшие значения ($R_{\max}$ до 0.63) достигаются для бассейнов рр. Сакмара и Вишера (приток Камы) и Онега. Но в большинстве случаев связь факторов группы со стоком слабая.

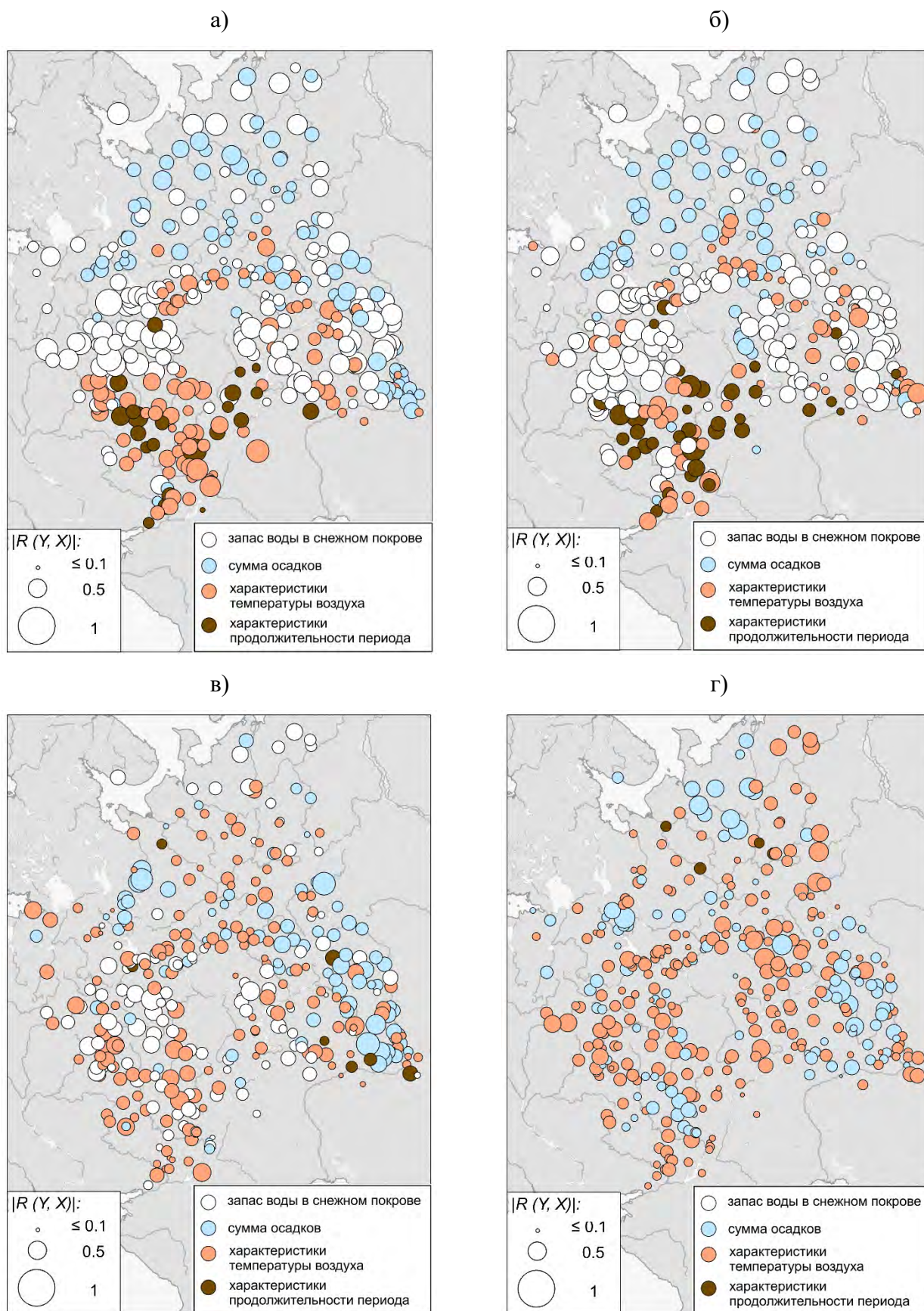


Рисунок 4.4 – Пространственное распределение факторов разных типов групп $F-6$ (а), $F-7$ (б), $F-8$ (в), $F-9$ (г). Размер символа пропорционален коэффициенту корреляции со слоем стока половодья

Средний максимальный коэффициент корреляции для характеристик, оцениваемых в течение 10 дней после схода снежного покрова (группа $F-9$), составляет 0.29 (Рисунок 4.5г, Приложение В.3). Они описывают около 9.5 % изменчивости стока половодья во времени. Наибольшие значения ($R_{\max}$ до 0.59) достигаются для бассейнов рр. Мезень, Печора и Вятка в верхнем течении. Но в большинстве случаев связь факторов группы со стоком слабая, как и для группы $F-8$.

Средний максимальный коэффициент корреляции для характеристик, оцениваемых в течение последних 10 дней зимы (группа $F-10$), составляет 0.35 (Рисунок 4.5а, Приложение В.3). Они описывают около 13 % изменчивости водного стока половодья во времени. Наибольшие значения ($R_{\max}$ до 0.63) достигаются для бассейнов Верхней Оки и Верхнего Дона, рр. Сакмара, Кострома и Сухона. Пониженные значения тесноты связи характерны для рек восточного и южного секторов ЕТР и р. Вятка.

Средний максимальный коэффициент корреляции для характеристик, оцениваемых в течение первых 10 дней весны (группа $F-11$), составляет 0.32 (Рисунок 4.5б, Приложение В.3). Они описывают около 11 % изменчивости водного стока половодья во времени. Наибольшие значения ($R_{\max}$ до 0.62) достигаются для бассейнов, рр. Вишера, Десна, Осётр и Сакмара. В то же время, для большей части территории ЕТР связь с членами группы – слабая.

Средний максимальный коэффициент корреляции для характеристик, оцениваемых в течение последних 10 дней зимы и первых 10 дней весны (группа $F-12$), составляет 0.35 (Рисунок 4.5в, Приложение В.3). Они описывают около 13 % изменчивости водного стока половодья во времени. Наибольшие значения ($R_{\max}$ до 0.64) достигаются для бассейнов рек Северного края, Верхней и Средней Оки, а также р. Сакмара. Для центральной и южной частей ЕТР связь с членами группы – слабая.

В целом для формирования стока половодья наиболее значимыми оказываются условия периода от максимального снегонакопления до устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C и далее до схода снежного покрова (Рисунок 4.6). Характеристики конца зимы – начала весны оказывают наибольшее влияние на сток половодья в бассейнах Верхней Оки, Верхнего Дона, Верхнего Днестра, рр. Белая и Сакмара.

Значимая связь стока рек севера ЕТР установлена с факторами периода от максимального снегонакопления до схода снежного покрова (группа $F-6$) или перехода температуры воздуха через 0 °C (группа $F-7$), а также периода перехода от зимы к весне (группа $F-12$). Низкая теснота связи с факторами из групп $F-6$ – $F-12$ отмечается для бассейнов Дона, Нижней Волги, большей части бассейнов рр. Кама и Урал. Данные выводы применимы исключительно при рассмотрении дискретного влияния характеристик групп.

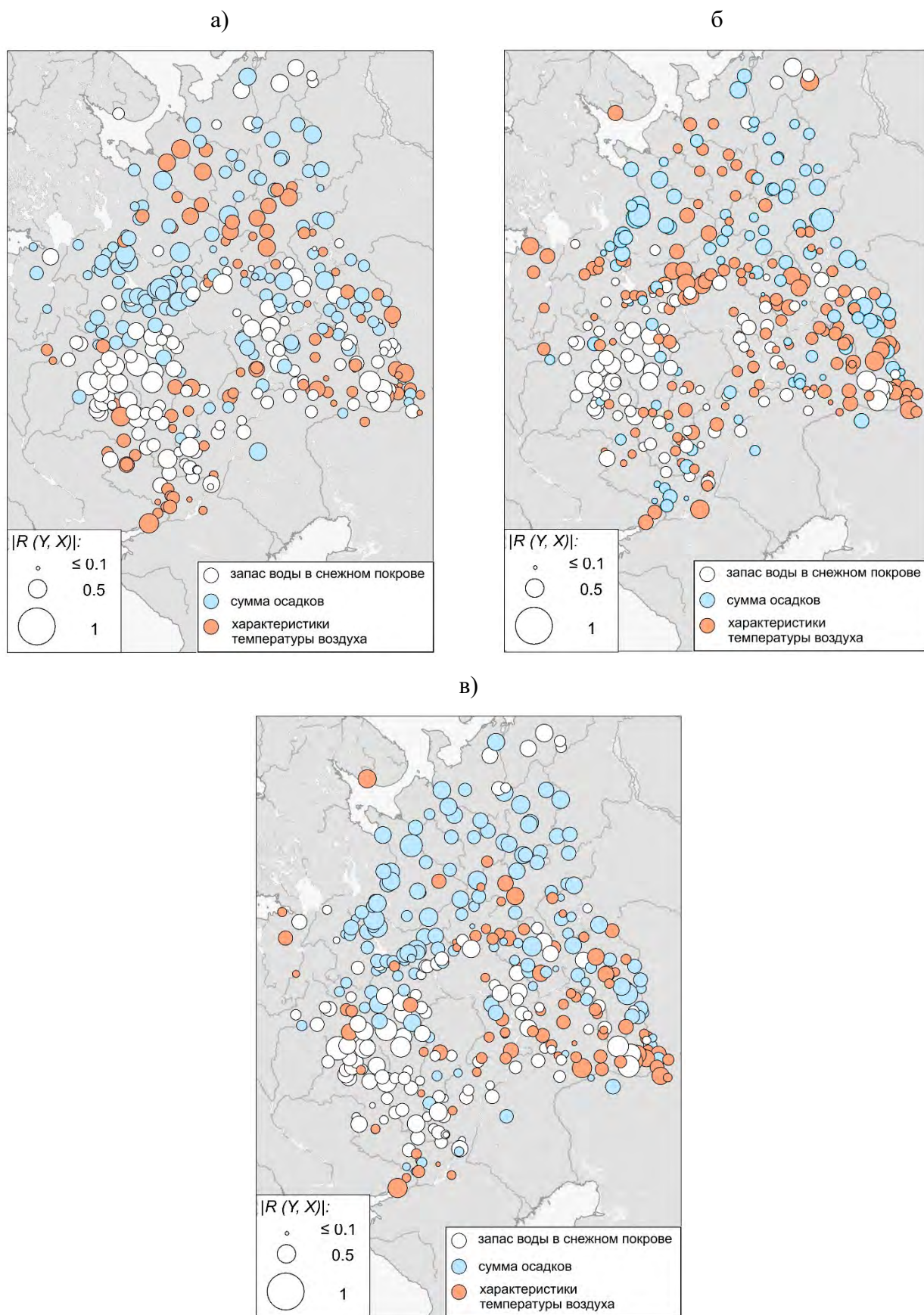


Рисунок 4.5 – Пространственное распределение факторов разных типов групп $F-10$ (а), $F-11$ (б) и $F-12$ (в). Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока половодья

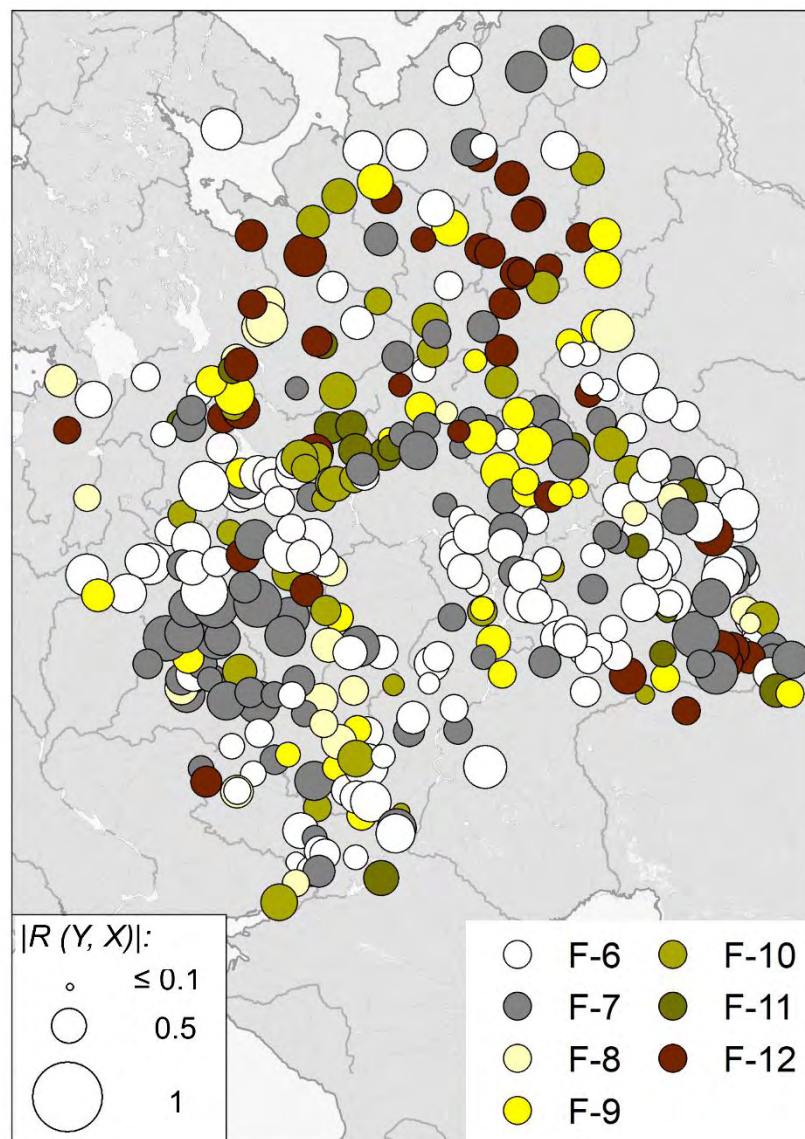


Рисунок 4.6 – Взаиморасположение доминирующих групп периода окончания зимы – начала весны (для групп $F-6$ – $F-12$). Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока половодья

Группы $F-6$ – $F-12$ содержат в себе четыре типа факторов, оцениваемых разными подходами: запас воды в снеге, суммы осадков, температура воздуха и продолжительность периода. Анализ характеристик, характеризующихся максимальной теснотой связи из группы, позволяет говорить о наличии ареалов доминирования разных типов. Так, для периода от максимального снегонакопления до схода снежного покрова (группа $F-6$) в центральной части ЕТР между 52 и 59° с.ш. диагностируется область существенной зависимости от запаса воды в снежном покрове (Рисунок 4.5а). К северу от нее более тесно связаны со стоком суммы осадков, к югу – температуры воздуха и продолжительность периода. Также, подвержены большому влиянию температурных показателей реки от Горьковского водохранилища до верховий р. Вятка

и далее к нижнему течению р. Белая и Среднему Уралу.

Схожим пространственным распределением характеризуются группа *F-7*, однако здесь область главенства снежного покрова простирается на юг до 51° с.ш. и существенно сокращается подверженность температурным показателям (Рисунок 4.5б). Гораздо большую значимость показатели температуры воздуха приобретают в периоды активного таяния снежного покрова (группа *F-8*), первые 10 дней после его схода (группа *F-9*) и в первые 10 дней весны (группа *F-11*). В них температура воздуха как наиболее выдающийся фактор представлена практически по всей ЕТР (Рисунок 4.4в, г, Рисунок 4.5б). При этом водосборы с высокой значимостью запаса воды в снеге представлены в пределах всей равнины в группе *F-9*, а в группах *F-8* и *F-11* они концентрируются к югу от 57° с.ш. Суммы осадков в группах *F-8* и *F-11* тяготеют к северному и восточному секторам ЕТР. Пространственное распределение характеристик разных типов групп *F-10* и *F-12* схоже с распределением для группы *F-6* (Рисунок 4.5а, в). К северу от 55° с.ш. максимальной теснотой связи из группы характеризуются суммы осадков, к югу – снежный покров.

Сводные результаты анализа связи слоя стока за половодье с характеристиками групп *F-6 – F-12* представлены в (Таблица 4.4 – Таблица 4.9).

Таблица 4.4 – Доминирующие характеристики групп $F-6$ – $F-12$ по речным бассейнам № 0–3 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	0	1	2	3
Регион	<i>Кольский п-ов</i>	<i>Онега</i>	<i>Северная Двина выше д. Абрамково</i>	<i>Северная Двина ниже впадения р. Вычегда</i>
$F-6$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-S0}$) – 0.60	общие осадки ($TPsum_{Smax-S0}$) – 0.41	общие осадки ($TPsum_{Smax-S0}$) – 0.31	общие осадки ($TPsum_{Smax-S0}$) – 0.44
$F-7$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-T0}$) – 0.51	общие осадки ($TPsum_{Smax-T0}$) – 0.41	температура воздуха ($thaw_temp_{Smax-T0}$, $ThawTP_{Smax-T0}$) – 0.33	общие осадки ($TPsum_{Smax-T0}$) – 0.41
$F-8$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{T0-SP}$) – 0.41	твердые осадки ($SnowTP_{T0-SP}$) – 0.44	температура воздуха ($frozen_temp_{T0-SP}$, $range_temp_{T0-SP}$, $SnowTP_{T0-SP}$) – 0.27	температура воздуха ($frozen_temp_{T0-SP}$) – 0.27
$F-9$	общие осадки ($TPsum_{ESC10}$) – 0.31	температура воздуха (-) – 0.24	общие осадки, твердые осадки, температура ($TPsum_{ESC10}$, $SnowTP_{ESC10}$, $temp_Cv_{ESC10}$) – 0.28	температура воздуха ($temp_std_{ESC10}$) – 0.27
$F-10$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10}$) – 0.32	общие осадки, жидкие осадки ($TPsum_{LAST10}$, $ThawTP_{LAST10}$) – 0.33	температура воздуха (TTC_{LAST10}) – 0.34	температура воздуха ($temp_std_{LAST10}$) – 0.42
$F-11$	температура воздуха (TTC_{SP10}) – 0.41	твердые осадки ($SnowTP_{SP10}$) – 0.48	температура воздуха ($temp_Cv_{SP10}$) – 0.32	общие осадки, жидкие осадки, температура воздуха ($TPsum_{SP10}$, $ThawTP_{SP10}$, $frozen_temp_{SP10}$) – 0.36
$F-12$	температура воздуха ($temp_std_{LAST10-SP10}$) – 0.49	жидкие осадки ($ThawTP_{LAST10-SP10}$) – 0.45	общие осадки ($TPsum_{LAST10-SP10}$) – 0.36	общие осадки ($TPsum_{LAST10-SP10}$) – 0.39

Таблица 4.5 – Доминирующие характеристики групп $F-6$ – $F-12$ по речным бассейнам № 4–7 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	4	5	6	7
Регион	<i>Вычегда</i>	<i>Мезень</i>	<i>Печора до впадения р. Уса, включая ее</i>	<i>Печора ниже впадения р. Уса</i>
$F-6$	общие осадки ($TPsum_{Smax-S0}$) – 0.31	общие осадки ($TPsum_{Smax-S0}$) – 0.48	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-S0}$) – 0.41	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-S0}$) – 0.45
$F-7$	общие осадки ($TPsum_{Smax-T0}$) – 0.38	общие осадки ($TPsum_{Smax-T0}$) – 0.41	общие осадки ($TPsum_{Smax-T0}$) – 0.40	общие осадки, твердые осадки ($TPsum_{Smax-T0}$, $SnowTP_{Smax-T0}$) – 0.46
$F-8$	температура воздуха ($temp_std_{T0-SP}$) – 0.28	температура воздуха (TTC_{T0-SP}) – 0.29	запас воды в снежном покрове ($Smean_{T0-SP}$) – 0.29	запас воды в снежном покрове ($Smean_{T0-SP}$) – 0.34
$F-9$	температура воздуха ($Smean_{ESC10}$) – 0.27	общие осадки ($TPsum_{ESC10}$) – 0.27	температура воздуха ($temp_Cv_{ESC10}$) – 0.39	температура воздуха (TTC_{ESC10} , $ThawTP_{ESC10}$) – 0.37
$F-10$	температура воздуха ($TPsum_{LAST10}$) – 0.39	общие осадки ($TPsum_{LAST10}$) – 0.33	общие осадки ($TPsum_{LAST10}$) – 0.36	общие осадки ($TPsum_{LAST10}$) – 0.40
$F-11$	жидкие осадки ($ThawTP_{SP10}$) – 0.32	температура воздуха ($temp_mean_{SP10}$) – 0.31	запас воды в снежном покрове, общие осадки, жидкие осадки ($Smean_{SP10}$, $TPsum_{SP10}$, $ThawTP_{SP10}$) – 0.36	жидкие осадки ($ThawTP_{SP10}$) – 0.34
$F-12$	общие осадки ($TPsum_{LAST10-SP10}$) – 0.41	общие осадки ($TPsum_{LAST10-SP10}$) – 0.42	общие осадки ($TPsum_{LAST10-SP10}$) – 0.40	запас воды в снежном покрове, общие осадки ($Smean_{LAST10-SP10}$, $TPsum_{LAST10-SP10}$) – 0.43

Таблица 4.6 – Доминирующие характеристики групп $F-6$ – $F-12$ по речным бассейнам № 8–11 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	8	9	10	11
Регион	Реки северо–запада	Днепр и Западная Двина	Верхняя Волга	Бассейн Горьковского вдр.
$F-6$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.34$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.48$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.40$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.37$
$F-7$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.32$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.40$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.38$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.35$
$F-8$	температура воздуха $(frozen_temp_{T0-SP}) - 0.37$	температура воздуха $(Smean_{T0-SP}) - 0.35$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{T0-SP}) - 0.28$	температура воздуха $(Smean_{T0-SP}) - 0.29$
$F-9$	температура воздуха, общие осадки $(temp_C_{VESC10}, TPsum_{ESC10}) - 0.26$	температура воздуха $(frozen_temp_{ESC10}) - 0.37$	температура воздуха $(TPsum_{ESC10}) - 0.30$	температура воздуха $(TTC_{ESC10}) - 0.24$
$F-10$	общие осадки, жидкие осадки $(TPsum_{LAST10}, ThawTP_{LAST10}) - 0.31$	запас воды в снежном покрове, температура воздуха $(Smean_{LAST10}, temp_std_{LAST10}) - 0.32$	жидкие осадки $(ThawTP_{LAST10}) - 0.37$	общие осадки $(TPsum_{LAST10}) - 0.38$
$F-11$	температура воздуха $(frozen_temp_{SP10}) - 0.35$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{SP10}) - 0.31$	температура воздуха $(Smean_{SP10}) - 0.29$	температура воздуха $(temp_C_{VSP10}) - 0.33$
$F-12$	температура воздуха $(range_temp_{LAST10-SP10}, Smean_{LAST10-SP10}) - 0.30$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{LAST10-SP10}) - 0.32$	общие осадки $(TPsum_{LAST10-SP10}) - 0.35$	общие осадки $(TPsum_{LAST10-SP10}) - 0.34$

Таблица 4.7 – Доминирующие характеристики групп $F-6$ – $F-12$ по речным бассейнам № 12–15 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	12	13	14	15
Регион	<i>Средняя Волга</i>	<i>Нижняя Волга</i>	<i>Верхняя Ока</i>	<i>Средняя и Нижняя Ока</i>
$F-6$	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{Smax-S0}$) – 0.29	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-S0}$) – 0.41	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-S0}$) – 0.46	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-S0}$) – 0.45
$F-7$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-T0}$) – 0.40	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-T0}$) – 0.36	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-T0}$) – 0.51	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-T0}$) – 0.43
$F-8$	температура воздуха (-) – 0.31	запас воды в снежном покрове ($Smean_{T0-SP}$) – 0.30	температура воздуха ($temp_std_{T0-SP}$) – 0.37	запас воды в снежном покрове ($Smean_{T0-SP}$) – 0.37
$F-9$	температура воздуха (-) – 0.34	температура воздуха ($Smean_{ESC10}$, $temp_Cv_{ESC10}$) – 0.26	температура воздуха ($Smean_{ESC10}$) – 0.28	температура воздуха ($temp_std_{ESC10}$) – 0.31
$F-10$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10}$) – 0.36	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10}$) – 0.34	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10}$) – 0.43	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10}$) – 0.38
$F-11$	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{SP10}$, $range_temp_{SP10}$) – 0.33	температура воздуха ($Smean_{SP10}$) – 0.27	запас воды в снежном покрове ($Smean_{SP10}$) – 0.35	запас воды в снежном покрове ($Smean_{SP10}$) – 0.32
$F-12$	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{LAST10-SP10}$) – 0.34	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{LAST10-SP10}$) – 0.32	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10-SP10}$) – 0.42	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{LAST10-SP10}$) – 0.36

Таблица 4.8 – Доминирующие характеристики групп $F-6$ – $F-12$ по речным бассейнам № 16–19 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	16	17	18	19
Регион	Кама выше впадения р. Чусовая	Кама от р. Чусовая до р. Белая	Белая	Нижняя Кама и Вятка
$F-6$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.39$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.43$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.45$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-S0}) - 0.35$
$F-7$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.35$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.32$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.39$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{Smax-T0}) - 0.36$
$F-8$	твердые осадки $(SnowTP_{T0-SP}) - 0.31$	общие осадки $(TPsum_{T0-SP}) - 0.37$	температура воздуха $(SnowTP_{T0-SP}, TPsum_{T0-SP}) - 0.35$	температура воздуха $(temp_std_{T0-SP}, TPsum_{T0-SP}) - 0.32$
$F-9$	запас воды в снежном покрове, температура воздуха $(Smean_{ESC10}) - 0.27$	общие осадки $(TPsum_{ESC10}) - 0.30$	запас воды в снежном покрове, общие осадки $(Smean_{ESC10}, TPsum_{ESC10}) - 0.32$	температура воздуха $(Smean_{ESC10}) - 0.34$
$F-10$	общие осадки, температура воздуха $(TPsum_{LAST10}) - 0.29$	общие осадки, жидкие осадки $(TPsum_{LAST10}, ThawTP_{LAST10}) - 0.36$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{LAST10}) - 0.31$	запас воды в снежном покрове $(Smean_{LAST10}) - 0.32$
$F-11$	твердые осадки, температура воздуха $(SnowTP_{SP10}) - 0.31$	запас воды в снежном покрове, жидкие осадки, температура воздуха $(Smean_{SP10}, ThawTP_{SP10}) - 0.35$	температура воздуха $(SnowTP_{SP10}, temp_std_{SP10}) - 0.35$	температура воздуха $(temp_Cv_{SP10}) - 0.31$
$F-12$	общие осадки $(TPsum_{LAST10-SP10}) - 0.0$	общие осадки, температура воздуха $(TPsum_{LAST10-SP10}, TTC_{LAST10-SP10}) - 0.40$	температура воздуха $(TPsum_{LAST10-SP10}) - 0.33$	общие осадки, температура воздуха $(TPsum_{LAST10-SP10}, TTC_{LAST10-SP10}) - 0.34$

Таблица 4.9 – Доминирующие характеристики групп $F-6 - F-12$ по речным бассейнам № 20–23 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	20	21	22	23
Регион	Верхний Дон	Средний Дон	Нижний Дон	Урал
$F-6$	продолжительность ($len_{Smax-S0}$) – 0.41	температура воздуха ($TTC_{Smax-S0}$) – 0.38	температура воздуха ($TTC_{Smax-S0}$) – 0.38	жидкие осадки ($ThawTP_{Smax-S0}$) – 0.37
$F-7$	продолжительность ($len_{Smax-T0}$) – 0.45	продолжительность ($len_{Smax-T0}$) – 0.38	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-T0}$) – 0.37	запас воды в снежном покрове ($Smean_{Smax-T0}$) – 0.35
$F-8$	температура воздуха ($Smean_{T0-SP}$) – 0.32	температура воздуха ($Smean_{T0-SP}$) – 0.32	температура воздуха ($temp_Cv_{T0-SP}$) – 0.27	температура воздуха ($TPsum_{T0-SP}$) – 0.33
$F-9$	температура воздуха (TTC_{ESC10}) – 0.27	температура воздуха ($temp_Cv_{ESC10}$) – 0.28	температура воздуха ($Smean_{ESC10}$, $temp_Cv_{ESC10}$) – 0.27	температура воздуха ($Smean_{ESC10}$, $frozen_temp_{ESC10}$) – 0.25
$F-10$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10}$) – 0.41	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10}$) – 0.31	температура воздуха (TTC_{LAST10}) – 0.35	температура воздуха ($Smean_{LAST10}$) – 0.33
$F-11$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{SP10}$) – 0.29	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{SP10}$) – 0.29	жидкие осадки, температура воздуха ($ThawTP_{SP10}$) – 0.26	температура воздуха ($Smean_{SP10}$, $ThawTP_{SP10}$) – 0.36
$F-12$	запас воды в снежном покрове ($Smean_{LAST10-SP10}$) – 0.37	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{LAST10-SP10}$) – 0.30	запас воды в снежном покрове, температура воздуха ($Smean_{LAST10-SP10}$) – 0.28	температура воздуха ($ThawTP_{LAST10-SP10}$) – 0.37

4.5. Связь стока половодья с таянием снежного покрова (группа $F-13$)

Таяние снежного покрова представлено 12 характеристиками группы $F-13$. Они описывают средние условия ($melt$), пассивное ($melt_passive$) и активное ($melt_active$) таяние. Под пассивным таянием понимается сокращение снежного покрова в период от максимального запаса воды в снежном покрове до перехода среднесуточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а под активным таянием – последующий период до схода снежного покрова. Они выражены абсолютным и относительным (в % от количества дней со снежным покровом) временем таяния, скоростью таяния в мм в день и трендовым коэффициентом.

Таяние снежного покрова как фактор характеризуется средним максимальным коэффициентом корреляции 0.36, что соответствует описанию 14 % дисперсии стока (Приложение В.5). Наибольшие значения ($R_{\max}$ до 0.66) достигаются на Верхней Оке и Верхней Волге, Верхнем Днестре и Верхней Дону. Низкая теснота связи со стоком характерна для практически всей восточной половины ЕТР, а также для рек северо-запада.

Активное таяние в роли более значимого фактора распространено в пределах Нижней Волги и рр. Кама и Урал, пассивное – в бассейне р. Дон, а общее – на Верхней Волге, Верхней Оке, левобережных притоках Горьковского вдхр. и р. Вятка (Рисунок 4.7а). На остальной территории распределение преобладающих типов таяния близко к случайному. Активное таяние снежного покрова, как правило, более значимо в областях интенсивных карстовых процессов, обеспечивающих при определенных условиях перехват значимой доли талого стока. Положение ареала пассивного таяния определено областью распространения частых неинтенсивных оттепелей в период до устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C , что обеспечивает сход существенной доли снежного покрова еще до начала весны.

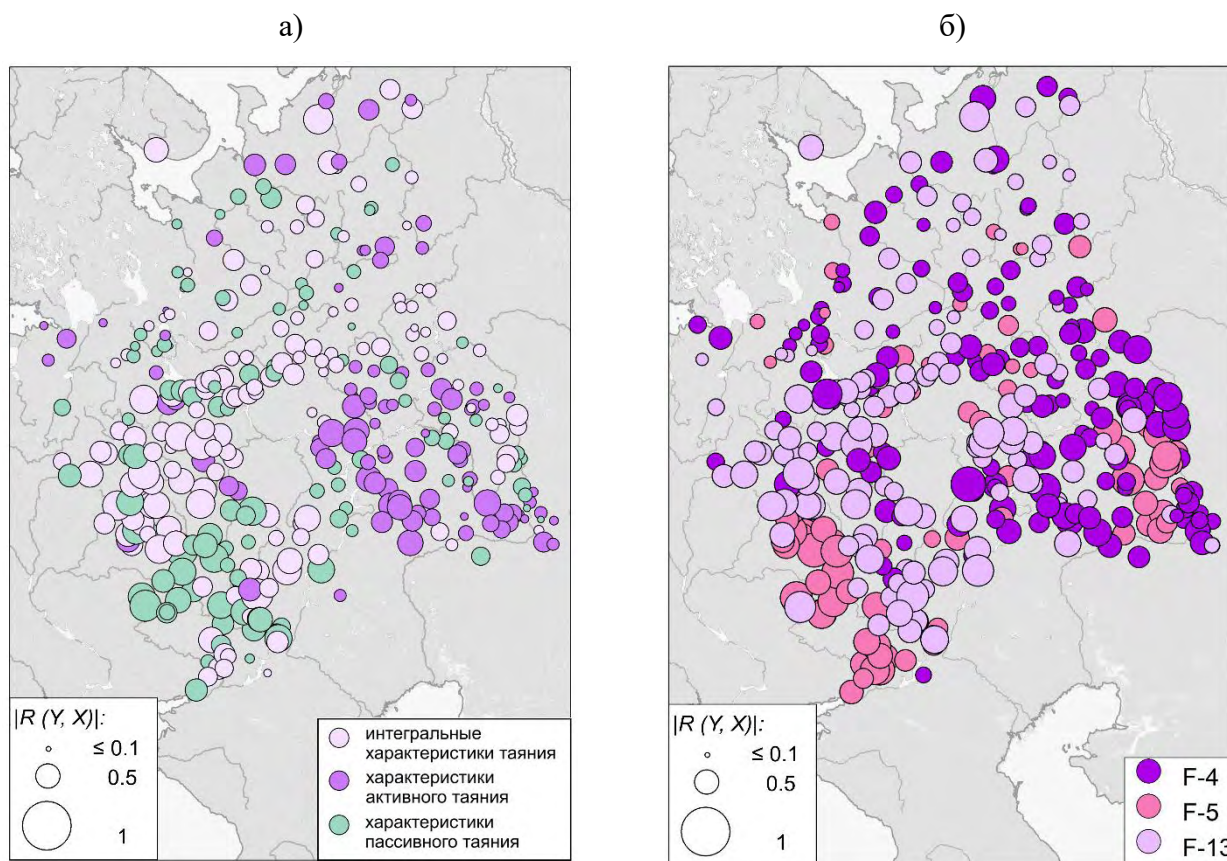


Рисунок 4.7 – Пространственное распределение доминирующих типов таяния группы $F-13$ (а) и сопоставление их с характеристиками зимних оттепелей группы $F-4$ и промерзанием почвы группы $F-5$ (б). Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока половодья

Вклад характеристик таяния снежного покрова в дисперсию слоя стока выше в бассейнах Верхней Волги, Верхней и Средней Оки, рр. Днепр, Дон и Мезень (Рисунок 4.7б), тогда как характеристики зимних оттепелей формируют большую долю дисперсии стока в восточном и северном секторах ЕТР – в бассейнах рек Северного Края, рр. Вятка, Кама и Урал. В правобережной части бассейна Дона, на реках южной части Урала и его предгорий, а также в бассейне р. Вятка (Рисунок 4.7б) по-прежнему доминирующим остается промерзание почвы.

Показательно, что к северу от бассейна Волги связь с факторами из группы *F-13* практически исчезает, что вновь обращает внимание на подверженность данной части ЕТР в современных климатических условиях положительным температурным аномалиям в течение зимнего периода. Результаты корреляционного анализа группы *F-13* представлены в (Таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Доминирующие характеристики группы *F-13* по речным бассейнам № 0–23 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	Регион	<i>F-13</i>
0	Кольский п-ов	Средние показатели ($melt_{TC}$) – 0.51
1	Онега	Пассивное таяние ($melt_{time}$, $melt_{passiveTC}$) – 0.21
2	Северная Двина выше д. Абрамково	Средние показатели ($melt_{TC}$) – 0.25
3	Северная Двина ниже впадения р. Вычегда	Средние показатели ($melt_{speed}$) – 0.34
4	Вычегда	Активное таяние ($melt_{activeTC}$) – 0.27
5	Мезень	Средние показатели ($melt_{time}$, $melt_{activeTC}$, $melt_{passiveTC}$) – 0.37
6	Печора от истока до впадения р. Уса, включая ее	Средние показатели ($melt_{speed}$, $melt_{active_{speed}}$, $melt_{time}$) – 0.30
7	Печора ниже впадения р. Уса	Средние показатели ($melt_{speed}$) – 0.35
8	Реки северо-запада	Активное таяние ($melt_{active_{speed}}$) – 0.26
9	Днепр и Западная Двина	Средние показатели ($melt_{speed}$) – 0.45
10	Верхняя Волга	Средние показатели ($melt_{passiveTC}$, $melt_{time}$) – 0.31
11	Бассейн Горьковского вдхр.	Средние показатели ($melt_{speed}$) – 0.38
12	Средняя Волга	Средние показатели ($melt_{speed}$, $melt_{TC}$) – 0.39
13	Нижняя Волга	Активное таяние ($melt_{active_{speed}}$) – 0.38
14	Верхняя Ока	Средние показатели ($melt_{TC}$) – 0.49
15	Средняя и Нижняя Ока, Сура	Средние показатели ($melt_{speed}$) – 0.44
16	Кама от истока до впадения р. Чусовая	Средние показатели ($melt_{TC}$) – 0.25
17	Кама от впадения р. Чусовая до р. Белая	Активное таяние ($melt_{speed}$) – 0.29
18	Белая	Активное таяние ($melt_{TC}$) – 0.29
19	Нижняя Кама и Вятка	Активное таяние ($melt_{active_{speed}}$) – 0.29
20	Верхний Дон	Активное таяние ($melt_{passiveTC}$) – 0.52
21	Средний Дон	Средние показатели, пассивное таяние ($melt_{passiveTC}$) – 0.43
22	Нижний Дон	Пассивное таяние ($melt_{passiveTC}$) – 0.43
23	Урал	Активное таяние ($melt_{active_{time}}$) – 0.29

4.6. Связь стока половодья с влажностью почвы (группы *F-14*, *F-15*, *F-16* и *F-17*)

Влажность почвы как ФФС представлена четырьмя группами: летней (группа *F-14*), осенней (группа *F-15*), конца зимы (группа *F-16*) и экстремумов от предшествующего лета до начала половодья (группа *F-17*). В каждой из них влажность почвы представлена абсолютным показателем, линейным (индекс *_lin*) и классом сухости (индекс *_type*).

Характеристики групп влажности почвы *F-14*, *F-15*, *F-16* и *F-17* описывают в среднем 11 %, 13 %, 18 % и 20 % дисперсии слоя стока половодья во времени (Приложение В.6). Средние максимальные коэффициенты корреляции $R_{\max}$ составляют, соответственно, 0.32, 0.34, 0.41 и 0.44 повышаясь в отдельных случаях до 0.68–0.73.

Значимость летней влажности *F-14* почвы повышена относительно средних показателей в бассейнах р. Волга выше Рыбинского вдхр., левобережной части средней и нижней Камы, а также р. Цна. Осенняя или предзимняя влажность почвы группы *F-15* и влажность почвы перед окончанием зимы группы *F-16* играет главную стокоформирующую роль в бассейнах рр. Урал, Белая и в правобережной части Нижней Волги. В то же время, экстремумы влажности почвы оказывают более значимое влияние на сток половодья в бассейнах Верхней Волги, Верхней Оки и Верхнего Днепра.

Ареалы преобладания характеристик различных типов практически не поддаются выделению (Рисунок 4.8а-г). Исключение составляют характеристики группы *F-14*, как правило, представленные на реках Северного края влажностью конца июня (рр. Печора и Мезень) и июля (рр. Северная Двина, Кама). Также ареал формирует влажность почвы последней декады февраля (группа *F-16*): она локализована между рр. Волга, Белая и Урал.

Применение натурных и расчетных данных о влажности почвы перед установлением снежного покрова в XX в. было продиктовано трудоемкостью измерений и ограниченностью вычислительных ресурсов. В то же время низкая плотность наблюдательной сети и низкая дискретность измерений даже в теплое время года на современном этапе накладывает ограничения на изучение ФФС половодья. Данные реанализа ERA5 позволяют определить доминирующие группы влажности почвы для речных бассейнов ЕТР. Ими для большей части анализируемой территории стали группы *F-17* и *F-16* (Рисунок 4.9а). Характеристики группы экстремумов влажности почвы *F-17* описывают большую дисперсию стока за половодье на Верхней Волги и Верхней Оки, рр. Днепр, Северная Двина, Ветлуга, Кама, Вятка, а также притоки Среднего Дона. В то же время, группа *F-16* присутствует практически повсеместно.

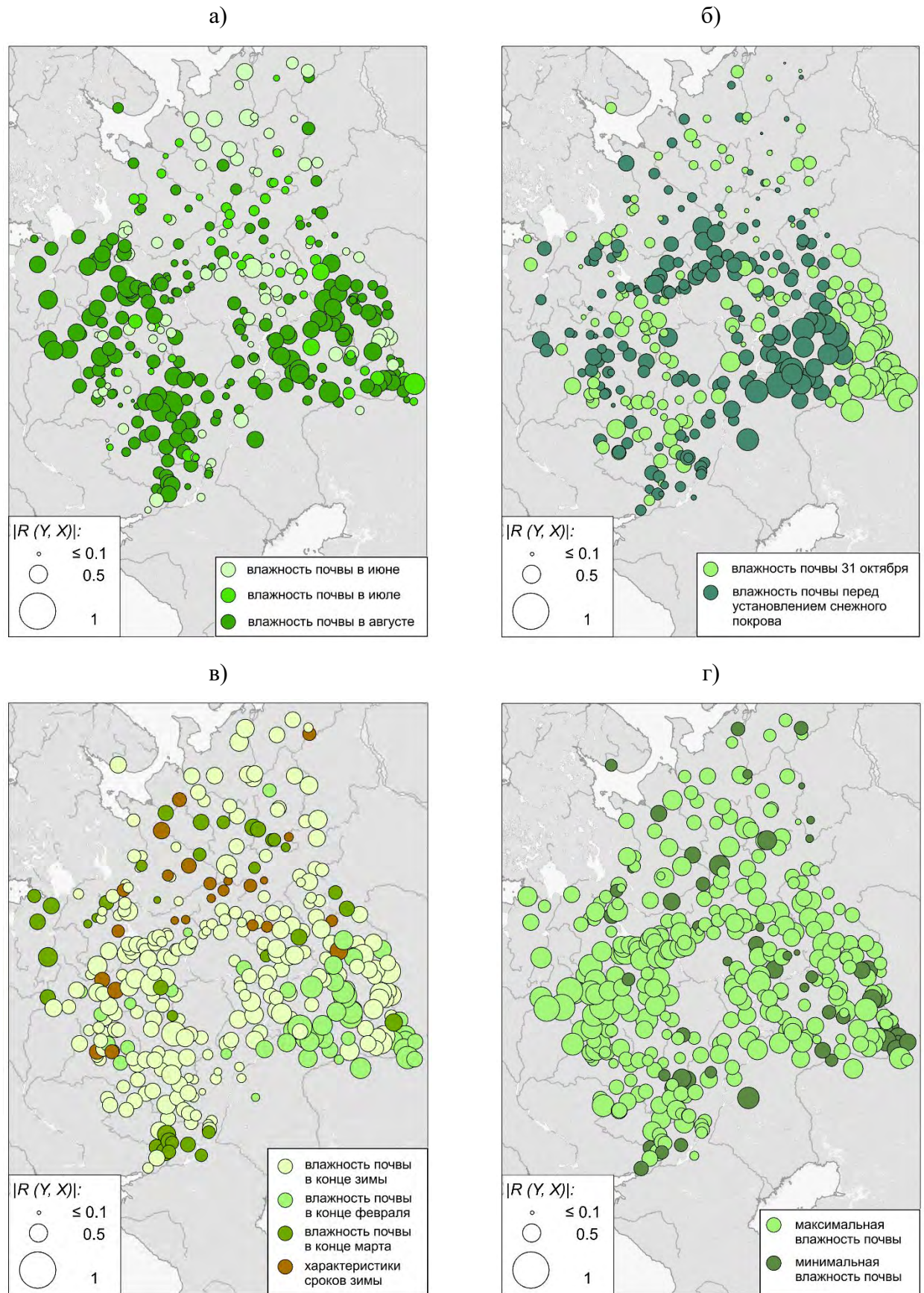


Рисунок 4.8 – Пространственное распределение факторов разных типов группы $F-14$ (а), $F-15$ (б), $F-16$ (в) и $F-17$ (г). Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока за половодье

В пределах рр. Урал, Кама, Вятка, Нижняя Волга и малых притоках Горьковского вдхр. локализован ареал факторов влажности почвы, оцениваемых до установления снежного покрова *F*-15. Он же сохраняется при сравнении двух групп: *F*-15 и *F*-16 (Рисунок 4.9б). Подобное взаиморасположение групп по наибольшей тесноте связи со стоком определяется типом и механическим составом почв, уровнем грунтовых вод и характером миграции влаги в почве. Сводные результаты анализа связи слоя стока за половодье с влажностью почвы групп *F*-14 – *F*-17 представлены в (Таблица 4.11 – Таблица 4.14).

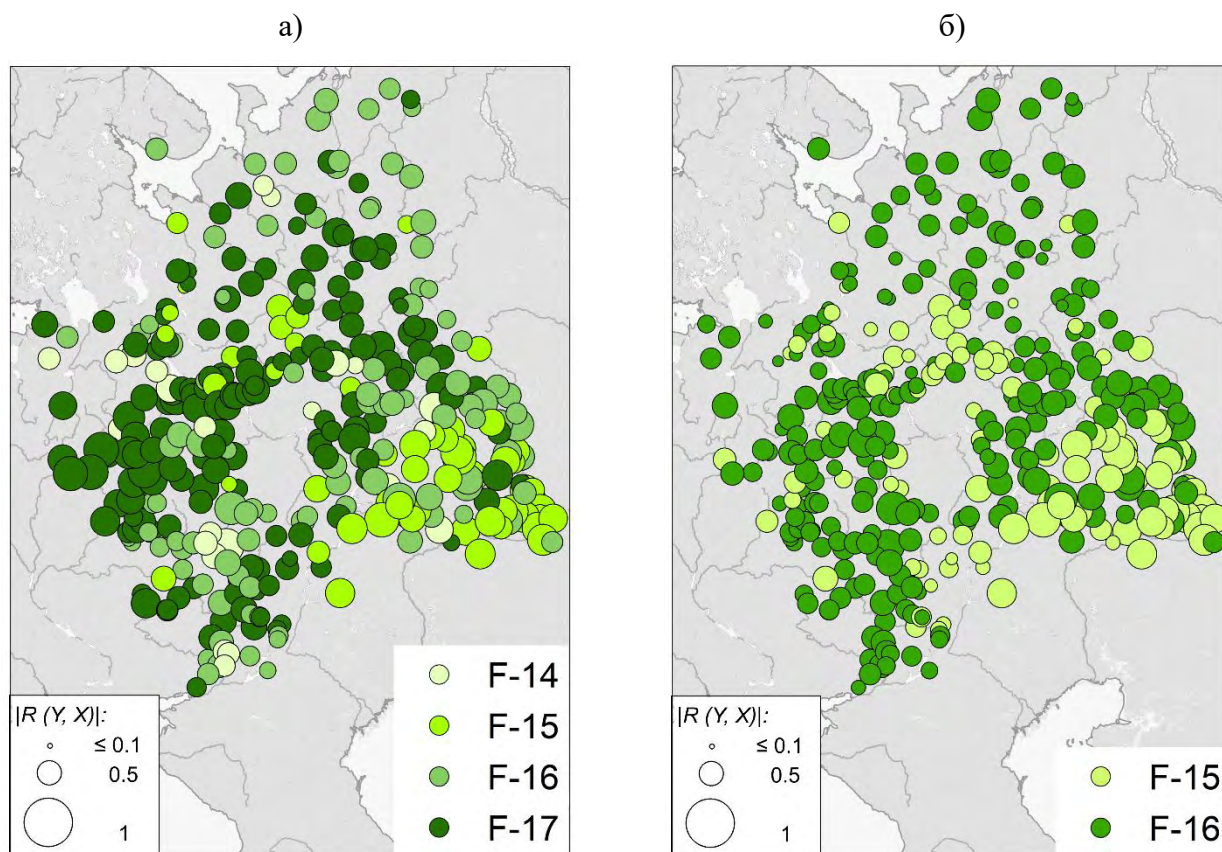


Рисунок 4.9 – Взаиморасположение доминирующих групп влажности почвы среди *F*-14 – *F*-17

(а) и *F*-15 – *F*-16 (б). Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции

со слоем стока половодья

Таблица 4.11 – Доминирующие характеристики групп *F-14 – F-17* по речным бассейнам № 0–5 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	0	1	2	3	4	5
Регион	<i>Кольский п-ов</i>	<i>Онега</i>	<i>Северная Двина выше д. Абрамково</i>	<i>Северная Двина ниже впадения р. Вычегда</i>	<i>Вычегда</i>	<i>Мезень</i>
<i>F-14</i>	влажность почвы в августе (<i>swvl_lin</i> _{21-31.08}) – 0.30	влажность почвы в июле (<i>swvl_type</i> _{21-31.07}) – 0.27	влажность почвы в июле и августе (<i>swvl</i> _{21-31.07} , <i>swvl_lin</i> _{21-31.08}) – 0.26	влажность почвы в июле (<i>swvl_type</i> _{21-31.07}) – 0.24	влажность почвы в июле (<i>swvl</i> _{21-31.07}) – 0.26	влажность почвы в июне (<i>swvl</i> _{21-30.06}) – 0.40
<i>F-15</i>	влажность почвы в конце октября (<i>swvl</i> _{31.10}) – 0.31	влажность почвы в конце октября (<i>swvl</i> _{31.10}) – 0.28	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова (<i>swvl_type</i> _{10d_before_sd_start}) – 0.36	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова (<i>swvl_type</i> _{10d_before_sd_start}) – 0.23	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова (<i>swvl</i> _{10d_before_sd_start} , <i>swvl_lin</i> _{31.10}) – 0.18	влажность почвы в конце октября (<i>swvl</i> _{31.10}) – 0.26
<i>F-16</i>	влажность почвы после окончания зимы (<i>swvl</i> _{10d_after_sd_end}) – 0.46	влажность почвы до и после окончания зимы (<i>swvl</i> _{10d_after_sd_end}) – 0.31	сроки начала зимы (<i>winter_start</i>) – 0.29	сроки начала зимы (<i>winter_end</i>) – 0.37	влажность почвы конца марта (<i>swvl</i> _{21-31.03}) – 0.36	влажность почвы после окончания зимы (<i>swvl</i> _{10d_after_sd_end}) – 0.40
<i>F-17</i>	максимальная влажность почвы (<i>swvl</i> _{max_10d}) – 0.34	максимальная влажность почвы (<i>swvl</i> _{max_10d}) – 0.36	максимальная и минимальная влажность почвы (<i>swvl</i> _{max_10d} , <i>swvl_type</i> _{min_10d}) – 0.43	максимальная влажность почвы (<i>swvl</i> _{max_10d}) – 0.45	максимальная влажность почвы (<i>swvl</i> _{max_10d}) – 0.48	максимальная влажность почвы (<i>swvl</i> _{max_10d}) – 0.40

Таблица 4.12 – Доминирующие характеристики групп *F-14 – F-17* по речным бассейнам № 6–11 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	6	7	8	9	10	11
Регион	<i>Печора до впадения р. Уса, включая ее</i>	<i>Печора ниже впадения р. Уса</i>	<i>Реки северо–запада</i>	<i>Днепр и Западная Двина</i>	<i>Верхняя Волга</i>	<i>Бассейн Горьковского водхр.</i>
<i>F-14</i>	влажность почвы в июне ($swvl_{21-30.06}$) – 0.31	влажность почвы в июне ($swvl_type_{21-30.06}$) – 0.29	влажность почвы в августе ($swvl_type_{21-31.08}$) – 0.39	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$) – 0.48	влажность почвы в августе ($swvl_type_{21-31.08}$) – 0.40	влажность почвы в августе ($swvl_type_{21-31.08}$) – 0.24
<i>F-15</i>	влажность почвы в конце октября ($swvl_{31.10}$) – 0.20	влажность почвы в конце октября ($swvl_{31.10}$) – 0.18	влажность почвы в конце октября ($swvl_type_{31.10}$) – 0.31	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) – 0.37	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) – 0.25	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$, $swvl_type_{10d_before_sd_start}$) – 0.30
<i>F-16</i>	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.42	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.45	влажность почвы конца марта ($swvl_{21-31.03}$) – 0.41	влажность почвы до и после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$, $swvl_{10d_BW_end}$) – 0.44	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.37	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.34
<i>F-17</i>	максимальная влажность почвы и сроки наступления минимальной влажности ($swvl_{max_10d}$) – 0.28	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.37	сроки наступления максимальной влажности почвы ($swvl_day_{max_10d}$) – 0.47	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.68	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.46	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.48

Таблица 4.13 – Доминирующие характеристики групп *F-14 – F-17* по речным бассейнам № 12–17 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	12	13	14	15	16	17
Регион	<i>Средняя Волга</i>	<i>Нижняя Волга</i>	<i>Верхняя Ока</i>	<i>Средняя и Нижняя Ока</i>	<i>Кама выше впадения р. Чусовая</i>	<i>Кама от р. Чусовая до р. Белая</i>
<i>F-14</i>	влажность почвы в июне и августе ($swvl_lin_{21-30.06}$, $swvl_lin_{21-31.08}$) – 0.31	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$) – 0.35	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$) – 0.28	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$) – 0.32	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$, $swvl_lin_{21-31.08}$, $swvl_type_{21-31.08}$) – 0.21	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$) – 0.41
<i>F-15</i>	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_type_{10d_before_sd_start}$) – 0.37	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) – 0.42	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_type_{10d_before_sd_start}$) – 0.29	влажность почвы в конце октября ($swvl_{31.10}$) – 0.34	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) – 0.24	влажность почвы в конце октября ($swvl_{31.10}$) – 0.39
<i>F-16</i>	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_type_{10d_after_sd_end}$) – 0.34	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.45	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.39	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.46	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_after_sd_end}$) – 0.37	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.41
<i>F-17</i>	максимальная влажность почвы ($swvl_{max\ 10d}$) – 0.34	максимальная влажность почвы ($swvl_{max\ 10d}$) – 0.45	максимальная влажность почвы ($swvl_{max\ 10d}$) – 0.50	максимальная влажность почвы ($swvl_{max\ 10d}$) – 0.44	максимальная влажность почвы ($swvl_{max\ 10d}$) – 0.41	максимальная влажность почвы ($swvl_{max\ 10d}$) – 0.47

Таблица 4.14 – Доминирующие характеристики групп *F-14 – F-17* по речным бассейнам № 18–23 (обозначения аналогичны Таблица 4.1)

№ п/п	18	19	20	21	22	23
Регион	Белая	Нижняя Кама и Вятка	Верхний Дон	Средний Дон	Нижний Дон	Урал
<i>F-14</i>	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$) – 0.37	влажность почвы в июне ($swvl_{lin_{21-31.06}}$) – 0.30	влажность почвы в августе ($swvl_{21-31.08}$) – 0.30	влажность почвы в августе ($swvl_{type_{21-31.08}}$) – 0.32	влажность почвы в августе ($swvl_{type_{21-31.08}}$) – 0.32	влажность почвы в августе ($swvl_{lin_{21-31.08}}$) – 0.34
<i>F-15</i>	влажность почвы в конце октября ($swvl_{31.10}$) – 0.49	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) – 0.34	влажность почвы в конце октября ($swvl_{type_{31.10}}$) – 0.28	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) – 0.31	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) – 0.32	влажность почвы в конце октября ($swvl_{31.10}$) – 0.54
<i>F-16</i>	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{21-28.02}$) – 0.52	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.42	влажность почвы после окончания зимы ($swvl_{10d_AW_end}$) – 0.42	влажность почвы до и после окончания зимы ($swvl_{10d_BW_end}$, $swvl_{lin_{10d_after_sd_end}}$) – 0.36	влажность почвы конца марта и до окончания зимы ($swvl_{10d_BW_end}$, $swvl_{21-31.03}$) – 0.41	влажность почвы конца февраля ($swvl_{21-28.02}$) – 0.48
<i>F-17</i>	максимальная влажность почвы и сроки ее наступления ($swvl_{max_10d}$, $swvl_{day_{max_10d}}$) – 0.42	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.43	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.39	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.41	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.44	максимальная влажность почвы ($swvl_{max_10d}$) – 0.46

4.7. Некоторые выводы по факторам формирования стока половодья

При объединении всех результатов пространственная картина фактора, описывающего наибольшую долю дисперсию слоя стока воды за половодье, получается достаточно пестрой как в целом по ЕТР (Рисунок 4.10), так и при делении по речным бассейнам (Рисунок 4.10, Таблица 4.16). По результатам парного регрессионного анализа чаще всего доминирующий фактор представлен характеристиками суровости зимы $F-3$. Он присутствует практически во всех речных бассейнах за исключением рр. Белая и Урал, где на первый план выходит влажность почвы. В верховьях р. Ока главенствуют факторы снежного покрова $F-1$, а в южной половине Уральских гор – средние характеристики зимы $F-2$ (Рисунок 4.10а). При типизации факторов по физическому смыслу в области Нижнего Дона выделяется ареал преобладания температуры воздуха как ФФС, на Верхнем Дону и Верхней Оке – промерзания почвы, а в восточной части бассейна Дона и на Нижней Волге – скорости таяния снежного покрова (Рисунок 4.10б).

Средний коэффициент корреляции слоя стока половодья с главным ФФС на ЕТР составляет 0.62 (от 0.37 с максимальной 10-дневной влажностью почвы $swvl_{\max_10d}$ для р. Иловля у д. Боровки до 0.86 с суммой осадков при отрицательных температурах $SnowTP$ для р. Мезень у д. Малонисогорская). В среднем им описывается 39 % дисперсии стока (Рисунок 4.10в).

Наиболее ярко различия в факторообусловленности слоя стока половодья проявляются при делении выборки на 24 подбассейна (Приложение Б) и 17 групп. Так, существенный перевес значимости характеристик запаса воды в снежном покрове и зимнего периода (группы $F-1 - F-3$) наблюдается в среднем и нижнем течении р. Северная Двина, рр. Вычегда, Мезень и Печора, а в средней полосе – на рр. Днепр, Западная Двина. Здесь наиболее тесно связанная со стоком характеристика описывает в среднем более 40 % изменчивости стока за половодье. Схожая ситуация складывается для рек бассейнов Верхней Волги и Горьковского вдхр., Верхней Оки и р. Кама от истока до впадения р. Белая. На остальные факторы, как правило, приходится 10–20 % изменчивости стока. В бассейнах рр. Вычегда, Днепр и Западная Двина, Верхняя Ока, Белая и Урал дополнительно возрастает вклад характеристик влажности почвы: в среднем здесь он превышает 20 %, в отдельных случаях достигая 53 % (р. Днепр – г. Дорогобуж). Наиболее равномерно факторообусловленным можно назвать реки северо-запада, Средней Волги и Среднего Дона.

Для бассейнов также установлены характеристики факторов с наиболее тесной связью от группы со слоем стока за половодье. Ниже приведены те из них, что встречаются для бассейнов более чем в 50 % случаев:

1) Онега – $SnowTP$ (100 %), $fr_depth_{21-31.03}$, $swvl_{\max_10d}$, и $ThawTP_{LAST10-SP10}$ (по 80 %), $SnowTP_{SP10}$, $SnowTP_{T0-SP}$, $thaw_temp_{Cv}$, $TPsum_{Smax-T0}$ (по 60 %);

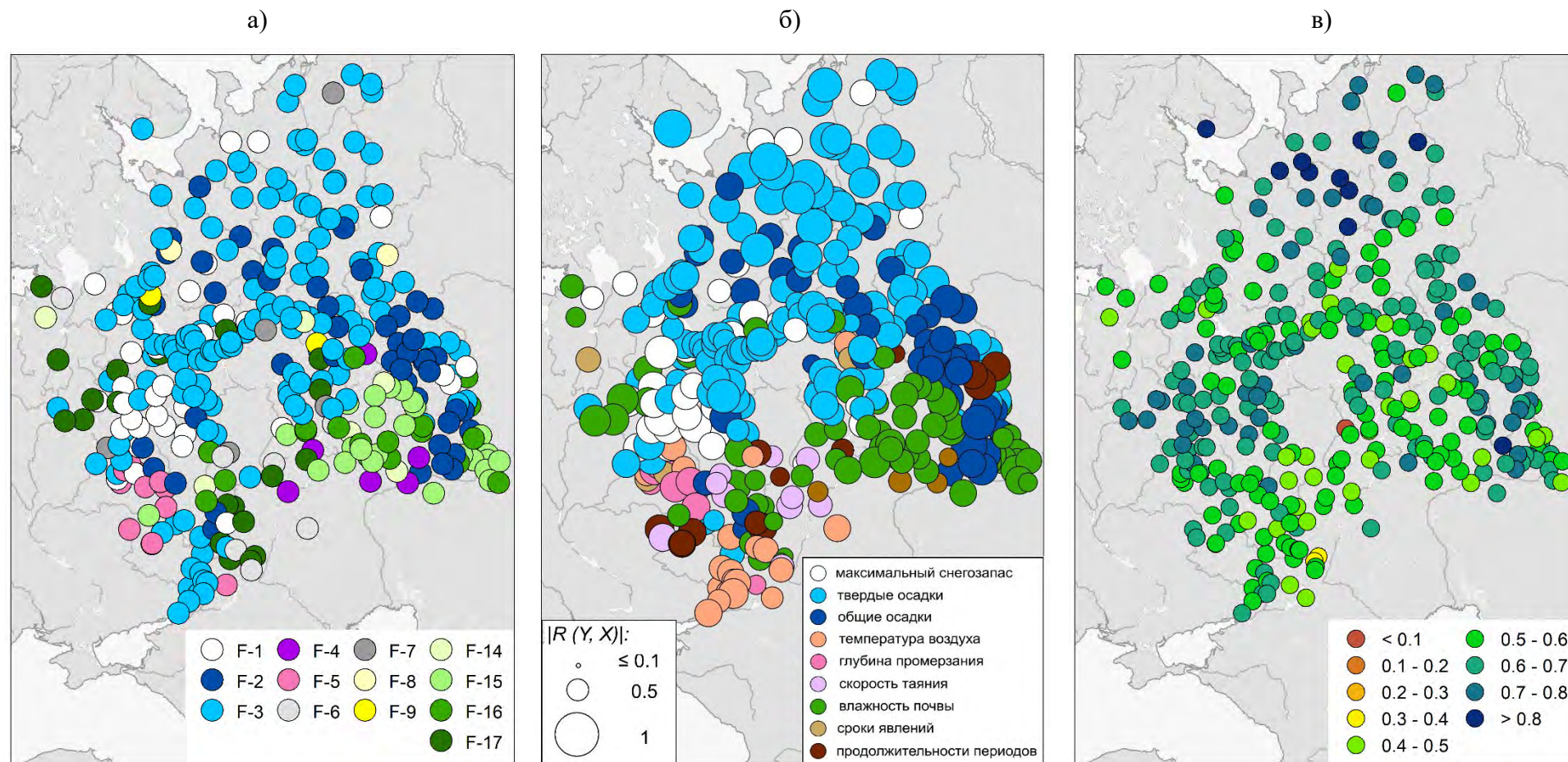


Рисунок 4.10 – Пространственное распределение доминирующих групп (а), соответствующих им типов факторов (б) и их максимальных коэффициентов корреляции (в). Размер символа на (б) пропорционален модулю коэффициента корреляции со слоем стока половодья

Таблица 4.15 – Средний максимальный коэффициент корреляции слоя стока за половодье с группами факторов по речным бассейнам

РЕГИОН	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8	F-9	F-10	F-11	F-12	F-13	F-14	F-15	F-16	F-17
Кольский п-ов	0.71	0.68	0.86	0.22	0.12	0.6	0.51	0.41	0.31	0.32	0.41	0.49	0.51	0.3	0.31	0.46	0.34
р.Онега	0.43	0.54	0.53	0.3	0.24	0.41	0.41	0.44	0.24	0.33	0.48	0.45	0.21	0.27	0.28	0.31	0.36
р. Северная Двина выше д. Абрамково	0.47	0.55	0.55	0.31	0.24	0.31	0.33	0.27	0.28	0.34	0.32	0.36	0.25	0.26	0.36	0.29	0.43
р. Северная Двина ниже впадения р. Вычегда	0.6	0.58	0.7	0.35	0.29	0.44	0.41	0.27	0.27	0.42	0.36	0.39	0.34	0.24	0.23	0.37	0.45
р. Вычегда	0.54	0.54	0.66	0.3	0.26	0.31	0.38	0.28	0.27	0.39	0.32	0.41	0.27	0.26	0.18	0.36	0.48
р. Мезень	0.65	0.63	0.77	0.33	0.25	0.48	0.41	0.29	0.46	0.33	0.31	0.42	0.37	0.4	0.26	0.4	0.4
р. Печора до впадения р. Уса (включая ее)	0.56	0.51	0.67	0.34	0.25	0.41	0.4	0.29	0.39	0.36	0.36	0.4	0.3	0.31	0.2	0.42	0.28
р. Печора ниже впадения р. Уса	0.53	0.53	0.71	0.38	0.2	0.45	0.46	0.34	0.37	0.4	0.34	0.43	0.35	0.29	0.18	0.45	0.37
Реки Северо-Запада	0.42	0.38	0.45	0.33	0.23	0.34	0.32	0.37	0.26	0.31	0.35	0.3	0.26	0.39	0.31	0.41	0.47
рр. Днепр и Западная Двина	0.66	0.48	0.64	0.37	0.31	0.48	0.4	0.35	0.37	0.32	0.31	0.32	0.45	0.48	0.37	0.44	0.68
Верхняя Волга	0.55	0.48	0.58	0.33	0.23	0.4	0.38	0.28	0.3	0.37	0.29	0.35	0.31	0.4	0.25	0.37	0.46
Бассейн Горьковского вдхр.	0.53	0.43	0.61	0.34	0.32	0.37	0.35	0.29	0.24	0.38	0.33	0.34	0.38	0.24	0.3	0.34	0.48
Средняя Волга	0.43	0.38	0.55	0.33	0.27	0.29	0.4	0.31	0.34	0.36	0.33	0.34	0.39	0.31	0.37	0.34	0.34
Нижняя Волга	0.38	0.35	0.43	0.39	0.27	0.41	0.36	0.3	0.26	0.34	0.27	0.32	0.38	0.35	0.42	0.45	0.45
Верхняя Ока	0.61	0.48	0.59	0.38	0.48	0.46	0.51	0.37	0.28	0.43	0.35	0.42	0.49	0.28	0.29	0.39	0.5
Средняя и Нижняя Ока	0.52	0.43	0.56	0.39	0.3	0.45	0.43	0.37	0.31	0.38	0.32	0.36	0.44	0.32	0.34	0.46	0.44

Таблица 4.15 – Продолжение

РЕГИОН	<i>F-1</i>	<i>F-2</i>	<i>F-3</i>	<i>F-4</i>	<i>F-5</i>	<i>F-6</i>	<i>F-7</i>	<i>F-8</i>	<i>F-9</i>	<i>F-10</i>	<i>F-11</i>	<i>F-12</i>	<i>F-13</i>	<i>F-14</i>	<i>F-15</i>	<i>F-16</i>	<i>F-17</i>
р. Кама выше впадения р. Чусовая	0.53	0.55	0.63	0.34	0.28	0.39	0.35	0.31	0.27	0.29	0.31	0.3	0.25	0.21	0.24	0.37	0.41
р. Кама от р. Чусовая до р. Белая	0.4	0.63	0.57	0.39	0.29	0.43	0.32	0.37	0.3	0.36	0.35	0.4	0.29	0.41	0.39	0.41	0.47
р. Белая	0.49	0.49	0.54	0.42	0.34	0.45	0.39	0.35	0.32	0.31	0.35	0.33	0.29	0.37	0.49	0.52	0.42
Нижняя Кама и р. Вятка	0.37	0.51	0.52	0.36	0.3	0.35	0.36	0.32	0.34	0.32	0.31	0.34	0.29	0.3	0.34	0.42	0.43
Верхний Дон	0.47	0.51	0.54	0.39	0.53	0.41	0.45	0.32	0.27	0.41	0.29	0.37	0.52	0.3	0.28	0.42	0.39
Средний Дон	0.35	0.41	0.42	0.32	0.34	0.38	0.38	0.32	0.28	0.31	0.29	0.3	0.43	0.32	0.31	0.36	0.41
Нижний Дон	0.47	0.5	0.58	0.38	0.56	0.38	0.37	0.27	0.27	0.35	0.26	0.28	0.43	0.32	0.32	0.41	0.44
р. Урал	0.41	0.47	0.41	0.37	0.31	0.37	0.35	0.33	0.25	0.33	0.36	0.37	0.29	0.34	0.54	0.48	0.46



Рисунок 4.11 – Вклад наиболее тесно связанных характеристик разных групп в формирование слоя стока весеннего половодья (по вертикали – R^2 , по горизонтали – номер группы).

Синим показано среднее значение R^2 , серым – максимальное для региона

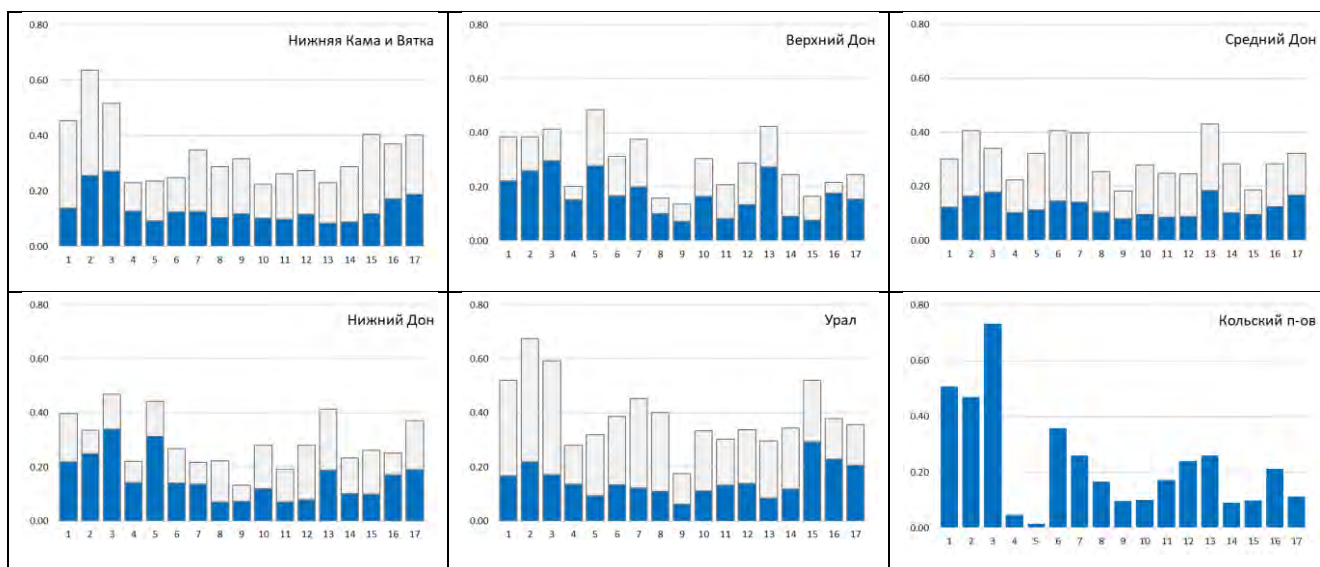


Рисунок 4.10 – Продолжение

2) Северная Двина выше д. Абрамково – *SnowTP* и *TPsum*_{01.11-SP} (по 100 %), *svwl_type*_{10d_before_sd_start} (88 %), *TPsum*_{LAST10-SP10} (75 %), *fr_depth*_{days} и *Smax* (по 63 %), *snowbreak*_{Cv}, *TPsum*_{Smax-S0} и *winter_start* (по 50 %);

3) Северная Двина ниже впадения Вычегды – *SnowTP* (100 %), *svwl*_{max_10d}, *TPsum*_{LAST10-SP10} и *TPsum*_{01.11-SP} (по 75 %), *TPsum*_{Smax-T0} (63 %), *Smax*_{05.01-31.03}, *temp_std*_{LAST10} и *winter_end* (по 50 %);

4) Вычегда – *SnowTP* и *TPsum*_{01.11-SP} (по 100 %), *Smax*_{05.01-31.03} (92 %), *TPsum*_{LAST10-SP10} и *TPsum*_{Smax-S0} (по 67 %), *fr_depth*_{days} (58 %), *svwl_day*_{max_10d}, *ThawTP*_{SP10} и *svwl*_{21-31.07} (по 50 %);

5) Мезень – *SnowTP* и *TPsum*_{LAST10-SP10} (по 100 %), *svwl*_{21-30.06} и *svwl*_{31.10} (по 86 %), *svwl_day*_{max_10d}, *Smax*_{05.01-31.03} и *TPsum*_{ESC10} (по 71 %), *fr_depth*_{21-31.03}, *TPsum*_{LAST10}, *TPsum*_{Smax-S0}, *TPsum*_{Smax-T0} и *TPsum*_{01.11-SP} (по 57 %);

6) Печора до впадения Усы (включая ее) – *SnowTP* (100 %), *Smean*_{Smax-S0}, *Smean*_{Smax-T0} и *TPsum*_{01.11-SP} (по 75 %), *fr_depth*_{days}, *Smax*, *svwl*_{10d_AW_end} и *svwl*_{31.10} (по 63 %), *Smean*_{T0-SP}, *TPsum*_{LAST10-SP10}, *TPsum*_{LAST10} и *svwl*_{21-30.06} (по 50 %);

7) Печора ниже впадения Усы – *SnowTP* (100 %), *TPsum*_{01.11-SP} (89 %), *svwl*_{max_10d} (67 %), *Smean*_{T0-SP}, *ThawTP*_{SP10}, *TPsum*_{LAST10} (56 %);

8) реки северо-запада – *Smean*_{T0-SP} (100 %), *Smean*_{Smax-T0}, *SnowTP* и *svwl*_{21-31.03} (по 80 %), *melt_active*_{speed} и *svwl_type*_{21-31.08} (по 60 %);

9) Днепр и Западная Двина – *fr_depth*_{days}, *svwl*_{max_10d}, *Smean*_{Smax-S0} и *SnowTP* (по 100%), *Smean*_{LAST10-SP10}, *Smean*_{Smax-T0} и *TPsum*_{01.11-SP} (по 80 %), *meltspeed*, *Smean*_{SP10}, *svwl*_{10d_before_sd_start}, *Smax*_{10d} и *svwl*_{21-31.08} (по 60 %);

10) Верхняя Волга – *SnowTP* (100 %), *svwl*_{max_10d} (75 %), *Smean*_{Smax-S0}, *TPsum*_{01.11-SP} и *svwl_type*_{21-31.08} (по 54 %);

- 11) бассейн Горьковского вдхр. – *SnowTP* (96 %), *svwl_{max_10d}* и *TPsum_{01.11-SP}* (по 91 %), *Smean_{Smax-T0}* и *TPsum_{LAST10}* (по 74 %), *fr_depth_{days}* (70 %), *Smean_{Smax-T0}* и *TPsum_{LAST10-SP10}* (по 57 %), *melt_{speed}* и *svwl_type_{21-31.08}* (по 52 %);
- 12) Средняя Волга – *SnowTP* и *svwl_{max_10d}* (по 100 %), *Smax* и *TPsum_{01.11-SP}* (по 80 %), *fr_depth_{21-28.02}*, *Smean_{Smax-T0}*, *Smean_{LAST10-SP10}* и *Smean_{LAST10}* (по 60 %);
- 13) Нижняя Волга – *svwl_{max_10d}* (82 %), *fr_depth_{days}* и *Smean_{Smax-S0}* (по 61 %), *SnowTP* (58 %), *Smean_{Smax-T0}*, *Smean_{LAST10}* и *svwl_{21-31.08}* (по 52 %)
- 14) Верхняя Ока – *Smean_{LAST10}* и *Smean_{Smax-T0}* (по 86 %), *svwl_{max_10d}* и *Smean_{SP10}* (по 82 %), *Smean_{LAST10-SP10}* (77 %), *fr_depth_{days}*, *SnowTP* и *winter_temp_{mean}* (по 64 %), *Smean_{Smax-S0}* и *svwl_{10d_AW_end}* (по 55 %), *temp_std_{T0-SP}* (50 %);
- 15) Средняя и Нижняя Ока – *SnowTP* и *svwl_{max_10d}* (79 %), *Smean_{T0-SP}* (63 %), *fr_depth_{days}*, *Smean_{LAST10-SP10}* и *Smean_{Smax-T0}* (54 %), *Smean_{Smax-S0}* и *Smean_{SP10}* (по 50 %);
- 16) Кама выше впадения Чусовой – *SnowTP* и *TPsum_{01.11-SP}* (по 100 %), *svwl_{max_10d}* и *melt_{TC}* (по 90 %), *fr_depth_{days}* (80 %), *Smean_{Smax-S0}* (70 %), *Smean_{ESC10}*, *Smean_{Smax-T0}* и *svwl_{10d_after_sd_end}* (по 50 %);
- 17) Кама от впадения Чусовой до Белой – *SnowTP* (100 %), *svwl_{max_10d}* (83 %), *Smean_{Smax-T0}*, *ThawTP_{Smax-S0}* и *TPsum_{T0-SP}* (по 67 %), *svwl_{10d_AW_end}*, *ThawTP*, *TPsum_{ESC10}* и *TPsum_{01.11-SP}* (по 50 %),
- 18) Белая – *SnowTP* (96 %), *TPsum_{01.11-SP}* (75 %), *Smean_{Smax-T0}* (68 %), *Smean_{Smax-S0}* и *svwl_{max_10d}* (64 %), *svwl_{31.10}* (57 %);
- 19) Нижняя Кама и Вятка – *SnowTP* (89 %), *TPsum_{01.11-SP}* (85 %), *svwl_{max_10d}* (63 %);
- 20) Верхний Дон – *Smean_{LAST10-SP10}* (100 %), *svwl_{max_10d}* (90 %), *Smean_{LAST10}* и *winter_temp_{mean}* (по 80 %), *snow_days* (70 %), *fr_depth_{21-31.03}* (60 %), *len_{Smax-T0}*, *len_{Smax-S0}*, *Smean_{SP10}*, *thaw_{days}* и *svwl_type_{31.10}* (по 50 %);
- 21) Средний Дон – *svwl_{max_10d}* (68 %), *Smean_{LAST10-SP10}* (64 %), *Smean_{LAST10}* (61 %), *fr_depth_{days}* (57 %), *TTC_{Smax-S0}* (54 %), *SnowTP* и *winter_temp_{mean}* (по 50 %);
- 22) Нижний Дон – *winter_temp_{mean}* (86 %), *svwl_{max_10d}* и *snow_days* (по 79 %), *subzero_temp_{sum}* (64 %), *melt_passive_{TC}* (50 %);
- 23) Урал – *SnowTP* и *TPsum_{01.11-SP}* (по 69 %), *svwl_{31.10}* (59 %).

Кольский п-ов не приведен в выборке, поскольку представлен только одной рекой.

Повторяемость факторов в роли ведущего от группы отлична даже для соседних водосборов. Это вновь указывает на необходимость анализа гораздо большего числа факторов, чем в классических представлениях.

Дополнительно проведено сопоставление классического набора предикторов: максимальный запас воды в снежном покрове, максимальная глубина промерзания и влажность

почвы перед установлением снежного покрова. В условиях современного климата его результат на основе статистического подхода позволяет лишь частично подтвердить гипотезу о главенстве снежного покрова среди ФФС половодья (Рисунок 4.12). В бассейнах Нижней Волги, Нижней Камы, рр. Белая, Хопер и Урал в верхнем течении из трех факторов доминирует влажность почвы, а в бассейне Дона – промерзание почвы.

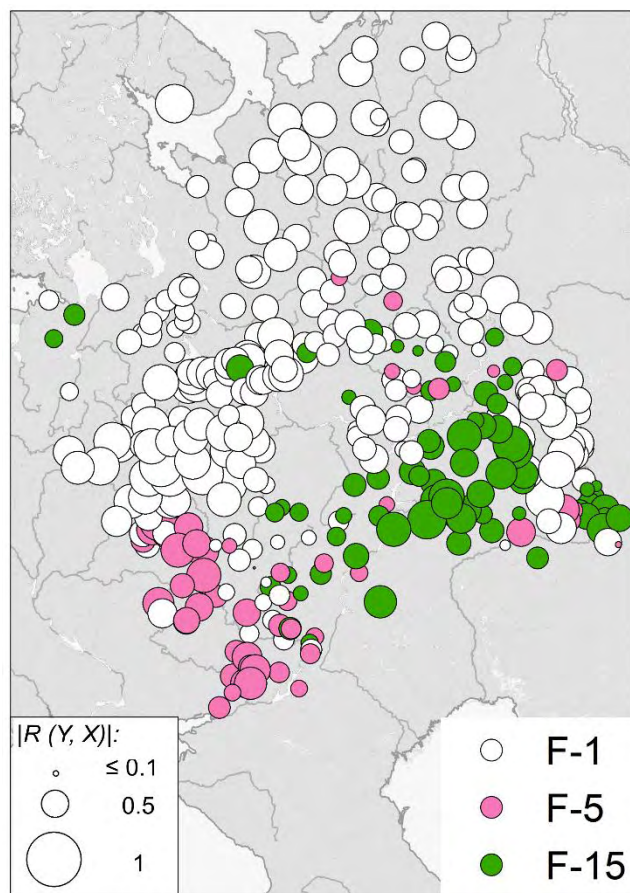


Рисунок 4.12 – Пространственное распределение главного из трех классических факторов: максимального запаса воды в снежном покрове ($F-1$), максимальной глубина промерзания ($F-5$) и влажности почвы ($F-15$) перед установлением снежного покрова. Размер символа пропорционален модулю коэффициенту корреляции со слоем стока половодья

Выводы к главе 4

Корреляционный анализ позволяет в первом приближении оценить наличие статистических связей слоя стока половодья с потенциальными факторами его формирования, подтвердить или опровергнуть уже существующие представления о них. Так, наибольшую долю дисперсии слоя стока половодья описывают характеристики зимних морозов $F-3$ (в среднем 55%). Характеристики снежного покрова $F-1$, которые в классической теории выступают главенствующими, на современном этапе описывают в среднем лишь четверть наблюдаемой дисперсии (Таблица 4.15). Наравне с максимальными характеристиками в средней

полосе ЕТР в ряде случаев значимыми оказались максимальный 10-дневный и средний за снежный период запасы воды в снежном покрове. Среди других характеристик в южном секторе выступают сроки формирования и продолжительность залегания снежного покрова. В целом, области к югу от 55° с.ш. присуща высокая значимость температурных показателей по сравнению с осадками (группы *F-2*, *F-3*, *F-6*) (Таблица 4.15).

Различные методы оценки влияния оттепелей показывают, что их интенсивность, выраженная температурой воздуха, описывает меньшую изменчивость стока половодья, нежели их продолжительность и сумма осадков за период оттепели. Последние выступают индикатором происходящих изменений характеристик снежного покрова.

Среди характеристик перехода от зимы к весне наиболее значимыми в целом для рек ЕТР оказались группы *F-6* (период от максимального снегонакопления до схода снежного покрова) и *F-7* (период от максимального снегонакопления до устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C), описывающие 17 % и 16 % дисперсии стока половодья, соответственно (Таблица 4.15). Также высокими показателями (13 % дисперсии) характеризуются члены группы *F-10* (последние 10 дней зимы) и *F-12* (последние 10 дней зимы и первые 10 дней весны). В эти периоды значимую роль в центральном и южном секторах ЕТР, как правило, играют температура воздуха и сохраняющийся запас воды в снеге, в северном – суммы осадков. Также ярко выражен ареал главенства характеристик продолжительности периода в группе *F-7*, как интегрального показателя условий таяния оставшегося снега.

Сопоставление групп характеристик оттепелей *F-4*, промерзания почвы *F-5* и таяния снежного покрова *F-13* указывает на большую тесноту связи стока половодья с глубиной промерзания в правобережной части Дона и на Белой, со скоростью таяния – в средней части равнины и до Камы, а восточнее – с оттепелями.

Влажность почвы перед установлением снежного покрова на современном этапе не выступает значимым фактором формирования стока в пределах всей ЕТР. Гораздо большее влияние оказывают максимальная влажность почвы и сроки ее наступления (группа *F-17*) и характеристики группы *F-16*, оцениваемые к окончанию зимы: они описывают 18–20 % изменчивости стока против 13 % для группы *F-15* (Таблица 4.15). Скорее всего, это связано с существенными изменениями влажности почвы за зимний период, происходящими в условиях нестационарности климата.

В результате корреляционного анализа установлено, что единый главный ФФС половодья на ЕТР отсутствует. Выделяется минимум 5 ареалов доминирования: запаса воды в снеге – в верховьях Волги, глубины промерзания – в верховьях Оки и Дона, скорости таяния снежного покрова – для Дона и Нижней Волги, влажности почвы – для рр. Урал и Белая, суммы осадков – для остальной территории. При этом на долю главного фактора приходится менее 40 %

дисперсии слоя стока половодья, тогда как в классической литературе говорится о 60 % и более.

Деление выборки по бассейновому принципу наглядно показывает различную факторообусловленность рек ЕТР и актуальность всестороннего анализа ФФС каждой из анализируемых рек. Перечень действующих факторов и их вклада в изменчивость стока половодья варьирует даже в пределах одного среднего или крупного водосбора.

Неоднородность главенства факторов установлена и для классического состава предикторов: максимальных запасов воды в снеге и глубины промерзания, а также влажности почвы.

ГЛАВА 5. МНОЖЕСТВЕННЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ СТОКА ПОЛОВОДЬЯ

Наиболее распространенные представления о ведущих ФФС в рамках воднобалансового подхода, как это указывалось выше, говорят о главенстве максимального запаса воды в снежном покрове перед началом снеготаяния. Косвенные характеристики потерь стока (глубина промерзания и влажность почвы) имеют разную значимость в пределах ЕТР. Так, в бассейнах Днепра и Верхней Волги постулируется тесная связь стока с глубиной промерзания и влажностью почвы. К северу и востоку от этой территории возрастает роль влажности почвы, а в лесной зоне – и подстилки. Для ряда водосборов этой части ЕТР глубина промерзания практически не учитывается, так как подразумевается ее ежегодное достижение и превышение значения 60 см, означающего прочное цементирование почвы. К югу, в бассейне Дона ведущую роль в потерях занимает глубина промерзания почвы, что обуславливается структурой толщи почвогрунтов и низким положением уровня грунтовых вод [Руководство..., 1989].

В то же время, результаты корреляционного анализа показывают, что текущая пространственная картина связей весеннего стока с ФФС гораздо сложнее и разнообразнее. Но при этом ни один из анализируемых потенциальных факторов не описывает в достаточной степени межгодовую изменчивость стока половодья, поэтому требуется использование мультифакторного подхода. В этой связи применен множественный регрессионный подход. Ниже представлены результаты анализа ФФС на основе построения и анализа двух- и трехпараметрических уравнений, выбора и оценки лучших статистических и квазиводнобалансовых уравнений для описания слоя стока воды за весеннее половодье.

5.1. Анализ двухпараметрических уравнений на примере крупных рек

С учетом накладываемых ограничений, описанных в главе 2, для каждого гидрологического поста по данным ERA5 получено свыше 15 000 двухпараметрических уравнений. Кумулятивная функция распределения соответствующих им показателей тесноты связи (множественный коэффициент корреляции MR – корреляция исходной величины и результата множественной линейной регрессии) близка к нормальному (Рисунок 5.1). Как правило, в первых 500–1000 уравнений, ранжированных по MR и $RMSE$, значение MR снижается более чем на 0,2. По этой причине, а также в силу ограниченности вычислительных ресурсов к анализу трехпараметрических уравнений отбирались лишь первые 200.

Оценка эффективности статистического подхода в сравнении с воднобалансовым показана уже на этом этапе. На примере 34 гидростанций в пределах 9 крупных рек ЕТР выбраны по три уравнения: лучшее статистическое по MR и $RMSE$ (далее – E_best , Таблица 5.1),

зависимость стока от запаса воды в снежном покрове и влажности почвы (далее – $Y=f(S, W)$) и зависимость от запаса воды в снежном покрове и глубины промерзания почвы (далее – $Y=f(S, L)$). Второй и третий типы уравнений выбраны как опорные в классическом подходе.

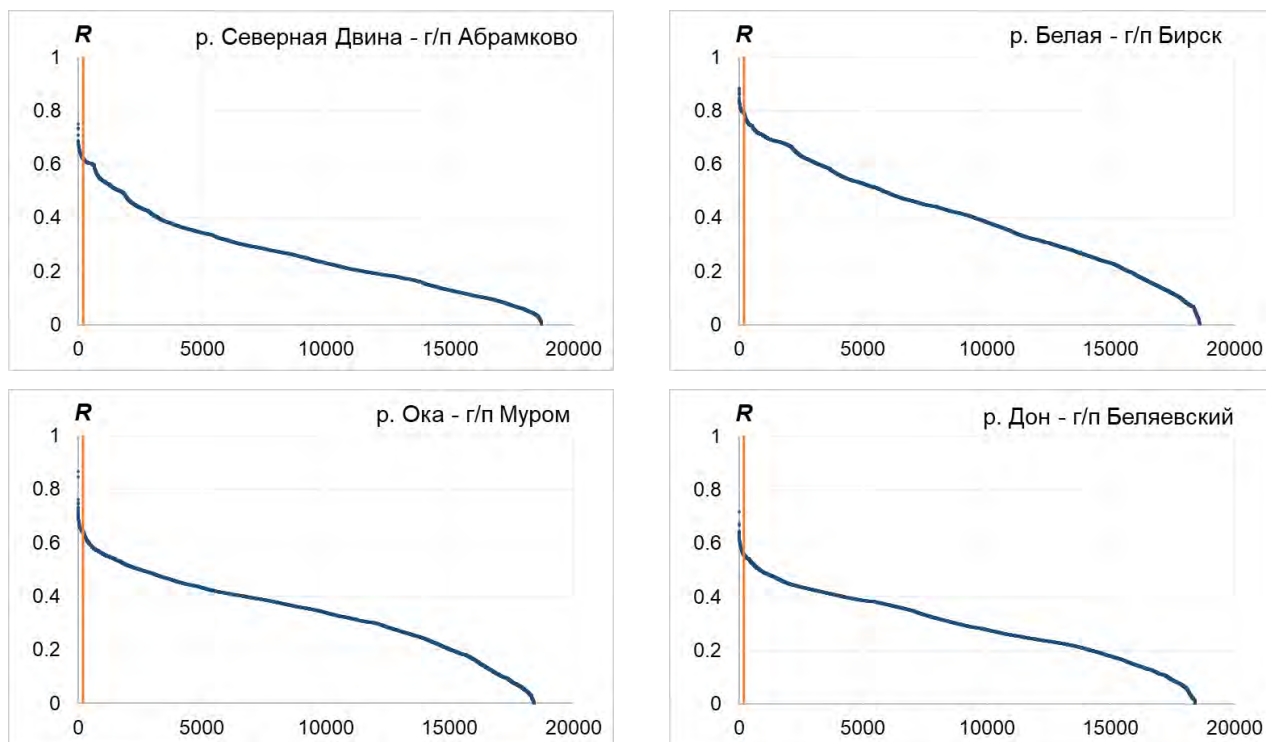


Рисунок 5.1 – Распределение коэффициентов корреляции двухпараметрических уравнений (по горизонтали – порядковый номер уравнений, оранжевая прямая – лучшие 200 уравнений)

В большинстве случаев приходная составляющая в уравнениях вида E_{best} представлена суммой общих и твердых осадков за зимний период, а для р. Днепр – максимальными запасами воды в снежном покрове. Второстепенную роль играет влажность почвы конца зимы – начала весны, предшествующих августа и осенних месяцев.

Подобное сочетание факторов характерно не для всех рек. Так, для р. Ока у д. Костомарово и г. Белев и р. Дон у г. Лиски приходную составляющую дополняет глубина промерзания почвы. Большой вклад в дисперсию у скорости таяния, включая пассивное таяние, утсановлен для р. Дон у г. Задонск и хут. Беляевский, а оттепелей – для р. Мезень у д. Большая Пысса и р. Печора у с. Усть-Цильма. В уравнении вида E_{best} для р. Урал у пос. Березовский роль приходной составляющей играет средняя сумма жидких осадков в период оттепели. На р. Онега у д. Надпорожский погост, р. Северная Двина, р. Печора на участке Троицко-Печорск – Усть-Щугор, р. Ока у д. Вендерово и р. Днепр у г. Смоленск лучшие уравнения данного вида включают в себя две приходные составляющие.

Результаты построения уравнений позволяют подтвердить классические утверждения о постоянстве ФФС сверху вниз по течению только для р. Северная Двина и участков рр. Ока,

Белая и Днепр. В остальных случаях при использовании статистического подхода в уравнениях вида E_{best} один из ФФС уравнения может меняться на схожий в рамках группы или же вне ее.

Таблица 5.1 – Двухпараметрические равнения вида E_{best}

Река – Пост	Зависимость	MR	RMSE
Урал – Верхнеуральск	$y = f(TPsum_{01.02-SP10}, swvl_{10d_AW_end})$	0.70	19.2
Урал – Кизильское	$y = f(TPsum_{10.02-SP10}, swvl_{21-28.02})$	0.72	15.8
Урал – Березовский	$y = f(ThawTP_{per_thaw}, swvl_{31.10})$	0.75	16.0
Онега – Надпорожский Погост	$y = f(SnowTP, TPsum_{01.02-SP10})$	0.68	24.1
Онега – Череповская	$y = f(TPsum_{20.02-SP10}, swvl_{10d_before_sd_end})$	0.71	23.1
Онега – Порог	$y = f(SnowTP, ThawTP_{LAST10-SP10})$	0.70	17.8
Северная Двина – Абрамково	$y = f(SnowTP, TPsum_{01.02-SP10})$	0.75	23.2
Северная Двина – Усть-Пинега	$y = f(SnowTP, TPsum_{01.02-SP10})$	0.81	19.3
Мезень – Макариб	$y = f(SnowTP, TP_sum_{Smax-S0})$	0.89	20.1
Мезень – Большая Пысса	$y = f(SnowTP, ThawTP_{Smax-T0})$	0.89	20.3
Мезень – Малонисогорская	$y = f(SnowTP, temp_std_{Smax-S0})$	0.89	19.0
Печора – Якша	$y = f(SnowTP, swvl_{10d_before_sd_end})$	0.69	36.5
Печора – Троицко-Печерск	$y = f(SnowTP, TPsum_{20.02-SP10})$	0.74	35.8
Печора – Усть-Щугор	$y = f(SnowTP, SnowTP_{LAST10-SP10})$	0.72	36.0
Печора – Усть-Цильма	$y = f(thaw_{mean_len}, SnowTP)$	0.78	26.9
Печора – Оксино	$y = f(SnowTP, swvl_type_{10d_after_sd_end})$	0.84	25.1
Ока – Вендерево	$y = f(TPsum_{20.02-SP10}, Smean_{Smax-T0})$	0.68	14.7
Ока – Костомарово	$y = f(SnowTP, fr_depth_{mean})$	0.73	15.0
Ока – Белев	$y = f(SnowTP, fr_depth_{mean})$	0.74	14.8
Ока – Калуга	$y = f(SnowTP, swvl_{10d_before_sd_start})$	0.78	15.8
Ока – Половское	$y = f(SnowTP, swvl_type_{10d_before_sd_start})$	0.82	15.6
Ока – Муром	$y = f(SnowTP, swvl_type_{10d_before_sd_start})$	0.87	12.4
Белая – Шупша	$y = f(SnowTP, swvl_type_{10d_before_sd_start})$	0.81	30.1
Белая – Арский Камень	$y = f(TPsum_{01.02-SP10}, Smean_{sesc-Send})$	0.85	28.0
Белая – Стерлитамак	$y = f(SnowTP, swvl_type_{10d_AW_end})$	0.83	26.5
Белая – Уфа	$y = f(TPsum_{01.11-SP}, swvl_{21-31.08})$	0.88	21.0
Белая – Бирск	$y = f(TPsum_{01.11-SP}, swvl_{21-31.08})$	0.86	18.3
Дон – Задонск	$y = f(TPsum_{20.02-SP10}, melt_{time\ \%})$	0.75	12.8
Дон – Лиски	$y = f(TPsum_{01.11-SP}, fr_depth_{21-31.03})$	0.70	14.8
Дон – Казанская	$y = f(swvl_{21-31.03}, SP_day_{start})$	0.69	12.3
Дон – Беляевский	$y = f(melt_passive_{TC}, swvl_type_{31.10})$	0.72	10.3
Днепр – Болшево	$y = f(Smax_{10d}, swvl_{10d_BW_end})$	0.80	35.9
Днепр – Дорогобуж	$y = f(Smax_{10d}, swvl_{10d_BW_end})$	0.82	26.5
Днепр – Смоленск	$y = f(TPsum_{01.11-SP}, Smax_{05-28.02})$	0.82	18.9

Теснота связи MR для E_{best} в среднем составляет 0.78, что на 0.14 превышает соответствующий показатель квазиводнобалансовых уравнений вида $Y = f(S, W)$. Наибольшая разность достигается для р. Онега у д. Череповская и с. Надпорожский погост (0.32 и 0.26, соответственно), р. Печора у д. Усть-Цильма (0.32) и для р. Ока у г. Белёв и д. Костомарово (0.24 и 0.22, соответственно). Наименьшие отличия наблюдаются для рр. Урал, Днепр и Белая.

В сравнении с уравнениями вида $Y = f(S, L)$ средняя по всем водосборам теснота связи MR для уравнений вида E_best выше на 0.2. Наибольших значений различия достигают для рр. Урал (до 0.59), Онега (до 0.39) и Печора (до 0.37).

Сопоставление уравнений вида $Y = f(S, W)$ и $Y = f(S, L)$ для рек севера ЕТР показывает несостоятельность утверждений о низкой значимости глубины промерзания почвы как ФФС в современных условиях. В то же время не для всех створов в Донском бассейне допустимо говорить о малой значимости влажности почвы: так, для г. Лиски и Казанская полученные уравнения показывают близкие результаты по MR и $RMSE$ (17.4 и 15 мм против 18 и 14.9 мм соответственно). При этом сверху вниз по течению р. Дон теснота связи уравнений вида $Y = f(S, L)$ уменьшается, а вида $Y = f(S, W)$ – растет. Относительно классических представлений [Руководство..., 1989] подтверждается лишь доминирующая роль влажности почвы над глубиной промерзания для р. Урал (Рисунок 5.2).

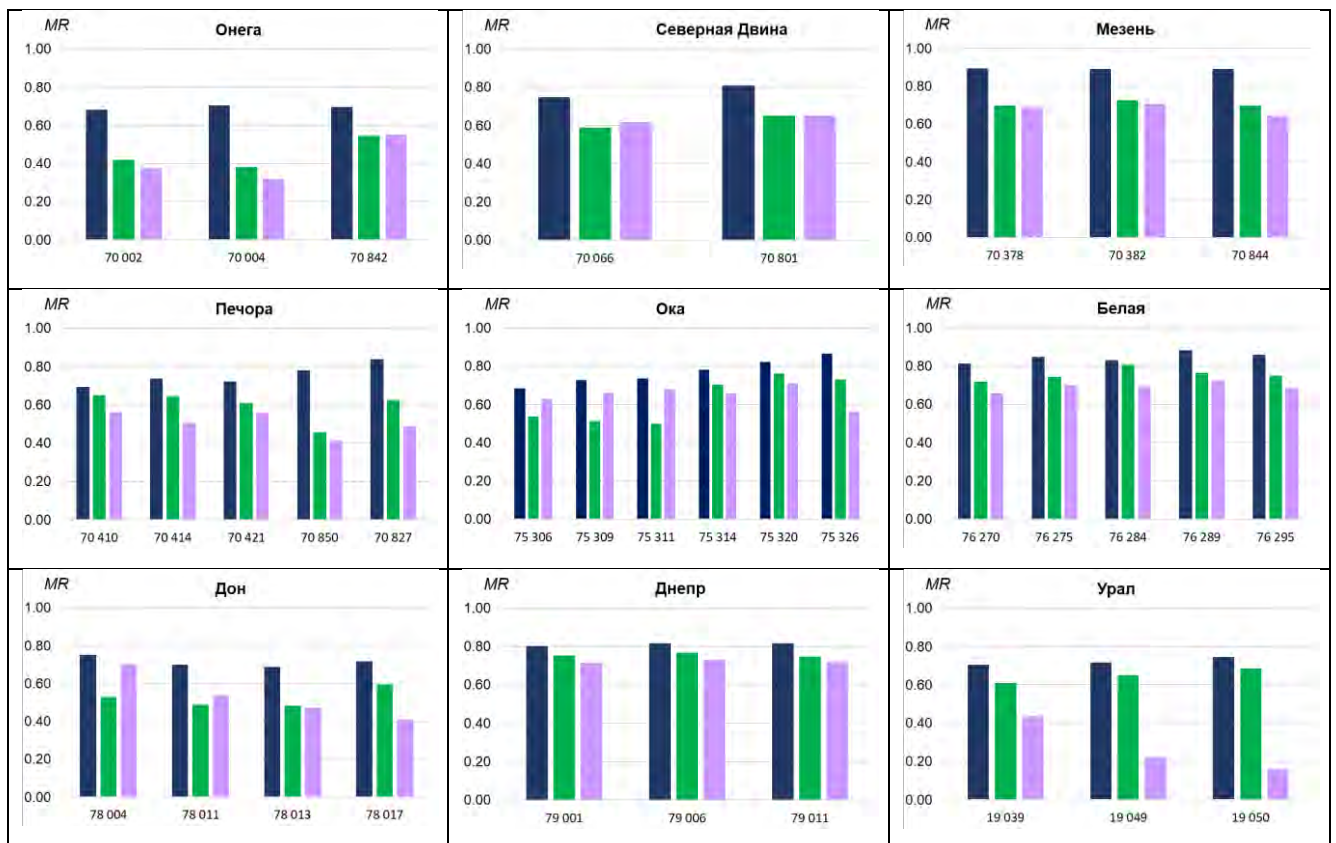


Рисунок 5.2 – Сопоставление тесноты связи MR для двухпараметрических уравнений вида E_best (синий), вида $Y = f(S, W)$ (зеленый) и $Y = f(S, L)$ (сиреневый).

По оси Ох – индексы гидрологических постов

Анализ двухпараметрических уравнений показывает, что используемые на протяжении 70 лет уравнения вида $Y = f(S, W)$ и $Y = f(S, L)$ физически обоснованы, но не могут рассматриваться как исключительно надежные и универсальные. Регрессионный анализ показал, что в пределах ЕТР для крупных рек не существует универсальной зависимости для описания

слоя стока половодья. Таким образом, для получения современных территориально общих методик прогнозирования необходимо провести мультифакторное районирование. Оно позволит учесть региональные и локальные особенности состава влияющих на процесс формирования стока половодья факторов, тем самым, повысив качество выпускаемых прогнозов.

В рамках проведенного по данным реанализа ERA5 анализа показано, что суммы общих и твердых осадков, классы сухости почвы и характеристики оттепелей описывают значимую часть дисперсии стока половодья. Наравне с максимальными значениями в отдельных районах встречается и средняя за зиму глубина промерзания почвы. Кроме того, выявлено непостоянство состава ФФС сверху вниз по течению, что в классической гидрологии допускалось лишь для полизональных рек. При этом динамика вклада запаса воды в снеге или влажности почвы в дисперсию слоя стока воды в половодье от верховьев рек к низовьям в зависимости от природных и ландшафтных особенностей водосбора, направления течения и множества других факторов может характеризоваться разной направленностью.

5.2. Пространственный анализ факторов формирования весеннего половодья крупных регионов ЕТР на основе трехпараметрических уравнений

Продолжительность анализируемых рядов в 38 лет допускает включение в уравнения третьего фактора без снижения устойчивости решения [Борщ и др., 2018]. С точки зрения статистического подхода это также позволяет оценить факторы формирования стока весеннего половодья, образующие наиболее устойчивые и достоверные зависимости. Ниже представлены результаты анализа для трех ФФС. Для удобства представления результатов они обобщены по группам и физическому смыслу.

5.2.1. Главный фактор формирования стока

Первым по значимости фактором формирования стока половодья ФФС-1 назначалась характеристика, присутствующая в двух- и трехпараметрических уравнениях и описывающая наибольшую долю дисперсии слоя стока половодья.

В пределах ЕТР ФФС-1 выступают 100 характеристик, относящихся к всем 17 группам (Рисунок 5.3). Наиболее распространены характеристики групп *F-3*, *F-2* и *F-1* (110, 61 и 38 водосборов, соответственно). Группы *F-4*, *F-5*, *F-10*, *F-13* – *F-16* представлены ФФС-1 в 10–20 водосборов каждая. Наиболее редко в роли ФФС-1 выступают характеристики групп *F-8* и *F-9* (3 и 2 водосбора, соответственно).

В среднем первый фактор описывает 32 % дисперсии стока половодья, в отдельных случаях – до 73 %. Наиболее тесно связаны со стоком половодья главные факторы рек севера ЕТР, Верхней Оки, Верхней Камы и левобережья Урала (Рисунок 5.4).

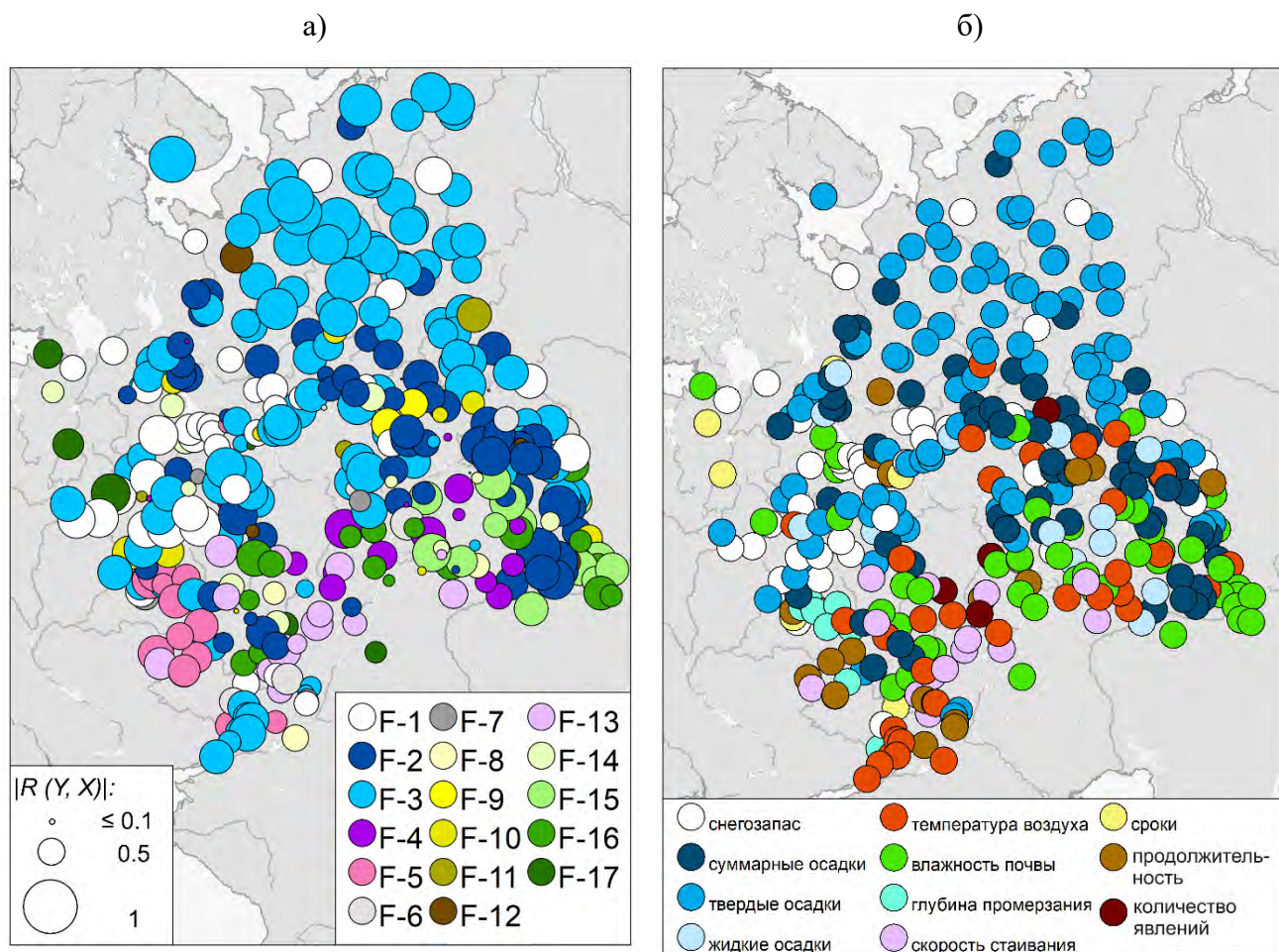


Рисунок 5.3 – Пространственное распределение первого фактора ФФС-1 по трехпараметрическим уравнениям по группам (а) и по физическому смыслу характеристики (б).

Размер символа пропорционален модулю коэффициента корреляции $R(Y, X)$

Пространственное распределение ФФС-1 согласуется с выводами главы 4: на ЕТР отсутствует единый главный ФФС ни для все выборки, ни для средних по площади водосборов рек. Чаще всего ФФС-1 представлен характеристиками зимних морозов группы $F-3$. Для 87 % водосборов – это сумма осадков при отрицательной температуре воздуха $SnowTP$ со средним значением парного коэффициента корреляции со стоком 0.66. Он присутствует в бассейнах рр. Печора, Мезень, Вычегда и Вага, Кама в верховьях, Унжа и Клязьма. На реках Нижнего Дона, рр. Сосна, Зуша, Большой Кинель и в верховьях р. Хопер гораздо большую дисперсию стока описывают другие члены группы $F-3$ – суммы отрицательных температур $subzero_temp_{mean}$ и $subzero_temp_{sum}$, а на рр. Цон – количество дней с отрицательной температурой для устойчивого зимнего периода $frozen_days_{uzp}$. Для этих рек доля дисперсии стока, описываемая первым фактором, снижается примерно на треть – до 25 %.

Общие характеристики зимы группы $F-2$ выступают первым фактором в уравнениях бассейнов рр. Онега, Сухона, Вятка, Белая, Урал и на ряде малых и средних рек между 58 и

62° с.ш. Для 59 % водосборов группа представлен суммой осадков от 1 ноября до схода снежного покрова $TPsum_{01.11-SP}$ (рр. Урал, Белая и Вятка). Встречающиеся на позиции первого фактора суммы осадков от разных дат февраля до 10-го дня после схода снежного покрова ($TPsum_{01.02-SP10}$, $TPsum_{10.02-SP10}$, $TPsum_{20.02-SP10}$) не формируют обширных ареалов. Их парные коэффициенты корреляции со стоком половодья R превышают 0.56. Характеристики температуры воздуха в роли ФФС-1, как и в случае с группой $F-3$, распространены на юге: рр. Кардаил (средняя за зиму температура воздуха $winter_temp_{mean}$), Бузулук (левый приток Волги) и Терешка (коэффициент вариации зимней температуры воздуха $winter_temp_{CV}$).

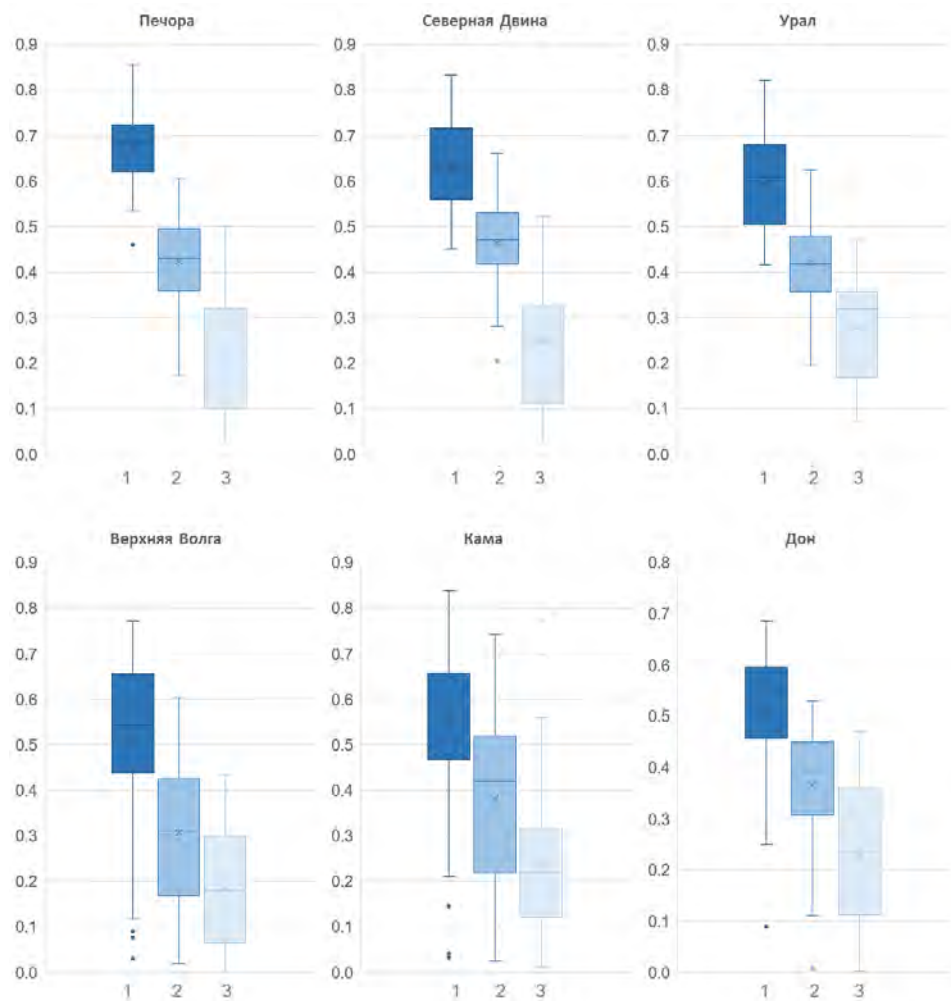


Рисунок 5.4 – Диаграммы типа «ящик с усами», показывающие тесноту связи факторов (значения парных коэффициентов корреляции R_i) формирования со слоем стока за половодье (1 – ФФС-1, 2 – ФФС-2, 3 – ФФС-3) в пределах речных бассейнов ЕТР. Для построения диаграмм учтены все гидропосты обозначенных речных бассейнов

В бассейнах Днепра, ряда левых притоков Верхней Оки и Волги в бассейнах Рыбинского и Горьковского водохранилищ, рр. Тосна и Паша, а также отдельных рек горной части Южного Урала главный фактор представлен характеристиками снежного покрова группы $F-1$ (Рисунок 5.3,

Рисунок 5.5). Их средний коэффициент парной корреляции со стоком половодья составляет 0.57, но распространенность мала – лишь 11 % всей выборки. В отличие от предыдущих групп, в ней нет доминирующей характеристики, хотя чаще других встречаются максимальный запас воды в снеге с конца января по конец февраля $S_{max_{31.01-28.02}}$ (18 % случаев среди водосборов, где $F-1$ – главный фактор), с начала января по конец марта $S_{max_{05.01-31.03}}$ и за зиму S_{max} (по 13 % случаев из группы). Нестандартные характеристики запаса воды в снежном покрове ФФС-1 выступают, как правило, для азовых и малых рек. Так, для рр. Печегда, Которосль, Великая, Пёза и Тосна более надежное уравнение обеспечивается привлечением средней величины влагозапаса за снежный период ($S_{mean_{snow_days}}$, $S_{mean_{snow_period}}$), на рр. Молога, Межа, Нея (приток Волги) и Уржумка – суммой суточных запасов воды в снежном покрове (S_{sum}), а на рр. Чикшина, Северка и Чусовая – максимальным 10-дневным запасом ($S_{max_{10d}}$). На рр. Кубена, Куса, Кумылга и Панышинка ФФС-1 в противовес классических представлений выступает продолжительность снежного периода $snow_days$, а для рр. Кема, Крона и Дон у ст-цы Казанская наиболее устойчивую позицию в уравнениях имеют сроки установления снежного покрова и его схода (SP_day_{start} , SP_day_{end}).

Подобное взаиморасположение групп $F-1$, $F-2$ и $F-3$ на позиции ФФС-1, вероятно, связано с устойчивостью зим и режимом оттепелей. Северо-западный сектор ЕТР сильно подвержен зимней адвекции теплого воздуха из Атлантики. Формируемые им оттепели приводят не только к установлению положительных температур воздуха, но и оседанию снежного покрова, водоотдаче в почвогрунты и, в некоторых случаях, до полного схода снежного покрова. По этой причине, как правило, именно запас воды в снеге в феврале для данного района отвечает за приходную составляющую в период весеннего половодья. На севере и северо-востоке ЕТР адвекции тепла происходят реже. Развивающиеся на их фоне оттепели менее интенсивны и, как правило, не приводят к водоотдаче из снежного покрова. В то же время, отмечается перехват снега лесом и частичная отдача его на этапе таяния. Предположительно, эти особенности зимы определяют большую значимость сумм осадков при отрицательных температурах над формируемым ими запасом воды в снежном покрове. Переходной областью является ареал распространения характеристик $F-2$ по ЕТР. Предположительно, это область характеризуется отсутствием значительной водоотдачи в период оттепелей: осадки периода оттепели пополняют приходную составляющую водного баланса половодья. Следует отметить, что в модели Корня – Бельчикова для прогноза половодья на реках Северного края использовалась именно накопленная за зиму сумма осадков.

Доминирующая роль зимних оттепелей (группа $F-4$) по трехпараметрическим уравнениям диагностирована для 19 рек, в основном, бассейнов Нижней Волги, рр. Сура, Кама и Урал (Рисунок 5.3, Рисунок 5.5). Всего в роли ФФС-1 она представлена 8 характеристиками, 3 из

которых встречаются чаще других. Так, для рек центра и севера ЕТР (рр. Индоманка, Межа, Искона, Бужа и Малый Черемшан) ФФС-1 представлен коэффициентом вариации жидких осадков в период оттепелей ($ThawTP_{Cv}$). К востоку от р. Мокша и до р. Волга (рр. Уса – приток Волги), Атмисс, Сура, Уза и Белая Холуница) наиболее значимым является количество и продолжительность оттепелей ($snowbreak_{len}$, $snowbreak_{count}$ и $snowbreak_{len_max}$), а на левом берегу р. Волга (рр. Салмыш, Черная, Ик, Дымка и Сок) – сумма осадков или положительных температур за оттепель ($ThawTP_{per_thaw}$, $thaw_temp_{mean_per_thaw}$). Средний показатель тесноты связи R со стоком половодья для них составляет 0.34.

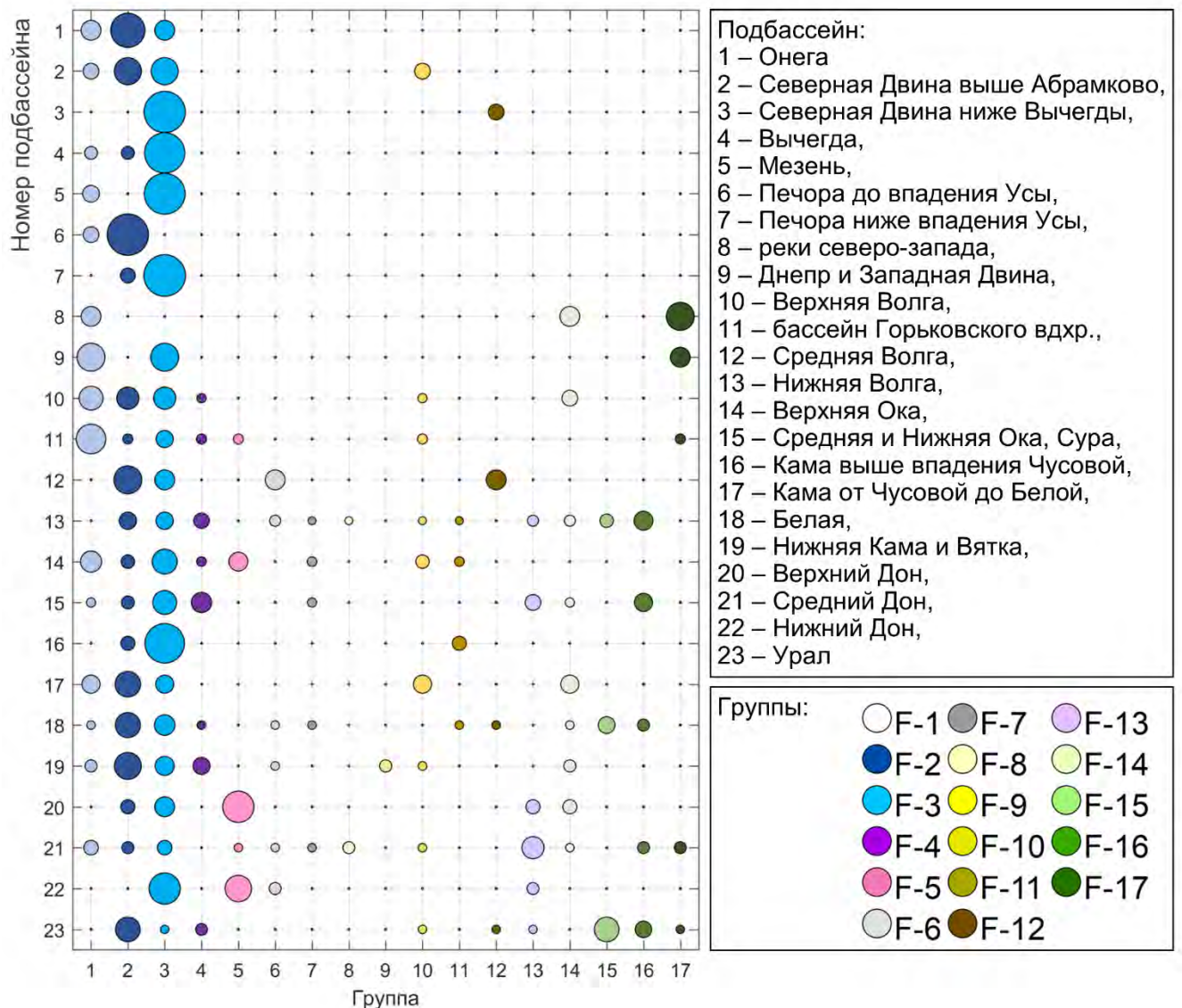


Рисунок 5.5 – Частота появления групп $F-1$ – $F-17$ (по горизонтали) в роли ФФС-1 в уравнениях вида E_best для подбассейнов в пределах ЕТР. Размер символа пропорционален количеству случаев появления характеристики в пределах подбассейна

Область, где характеристики промерзания почвы описывают наибольшую долю дисперсии слоя стока половодья, локализована в степях и по югу лесостепной зоны между

рр. Дон, Северский Донец и Ока (Рисунок 5.3, Рисунок 5.5). Здесь распространены мощные (до 8 м) толщи песчаных и супесчаных типичных черноземов. Исключение составляет аazonальная р. Касть в бассейне Верхней Волги. Из 16 рек, где она выступает ФФС-1, для рр. Касть, Девица, Чир, Северский Донец, Оскол и Валуй значимо количество дней с промерзшей почвой, для рр. Ока у г. Белев, Зуша, Дон у г. Задонск, Сосна и Тихая Сосна – средняя за этот период глубина промерзания. Средняя величина вклада промерзания почвы как фактора в дисперсию слоя стока половодья в данном случае составляет 31 %, что сопоставимо с величинами для запаса воды в снежном покрове. Подобный результат может быть, как следствием особенностей моделирования глубины промерзания почвы в реанализе ERA5, так и следствием изменения климата. Полученные выводы не противоречат, но дополняют выводы В.Д. Комарова и Л.К. Вершининой о значимом влиянии глубины промерзания на этой территории.

Характеристики конца зимы – начала весны (группы $F-6$ – $F-12$), выступают в роли ФФС-1 гораздо реже (Рисунок 5.3, Рисунок 5.5). Они не поддаются районированию и чаще характеристиками последних 10 дней зимы ($F-10$, 3 % водосборов) и периода от максимального снегонакопления до схода снежного покрова ($F-6$, 2 % водосборов). Главенствующая характеристика отсутствует: в уравнения входят как средние запасы воды в снеге за период ($S_{meanS_{max-S0}}$, $S_{mean_{last\ 10d}}$), осадки ($TP_{sumS_{max-S0}}$, $ThawTP_{S_{max-S0}}$, $SnowTP_{last\ 10d}$, $ThawTP_{last\ 10d}$) и температурные характеристики ($TTC_{S_{max-S0}}$, $temp_{Cv_{last\ 10d}}$, $temp_{std_{last\ 10d}}$, $TTC_{last\ 10d}$). Случаи их появления в уравнениях вида E_{best} относятся к аazonальным и зональным водосборам и распространены от р. Емца до р. Есауловский Аксай и от р. Жиздра до р. Уфа.

С запада на восток от р. Нежеголь до р. Чаган и с юга на север от р. Дон у хут. Беляевский до р. Проня первый фактор для 4 % водосборов представлен группой $F-13$ – характеристиками таяния снежного покрова (Рисунок 5.3, Рисунок 5.5). В полученной выборке представлены как аazonальные реки (рр. Чаган, Вад, Тешнярь, Кутулук, Дон у хут. Беляевский, Хопер у хут. Барминский, Аткара), так и средние (рр. Проня, Большой Караман, Бузулук (приток р. Дон), Медведица (приток р. Дон), Терса, Нежеголь, Матыра). При этом доля описываемой дисперсии стока половодья в среднем составляет 25 %. Практически в половине случаев в роли ФФС-1 выступает скорость таяния $melt_{speed}$. Также встречаются характеристики скорости пассивного ($melt_{passiveTC}$, $melt_{passive_{time\ \%}}$) и активного ($melt_{active_{speed}}$, $melt_{active_{time}}$) таяния, и их интегральные значения ($melt_{time}$, $melt_{TC}$).

Причины формирования области доминирования таяния снежного покрова как фактора заключается в особенностях гидрологического режима почв. Сравнительно глубокое залегание грунтовых вод, высокие фильтрационные свойства и непромывной режим обеспечивают значительную подземную емкость водосборов. Затяжные весны приводят к низким скоростям водоотдачи из снежного покрова, приводя к практически полному поглощению талых вод

почвогрунтами в силу наличия в них «мертвого» гидрологического горизонта с очень низкой влажностью. Кроме того, эта зона практически полностью совпадает с зоной отсутствия стока из почвы [Национальный Атлас..., 2011], тогда как в зоне распространения глубины промерзания (группа *F-5*) в роли ФФС присутствует связь почвенных, подземных и поверхностных вод.

К востоку от р. Дон и до Уральских гор, также на реках северо-западной части ЕТР (15 % водосборов) влажность почвы образует сразу два ареала, где ее характеристики описывают наибольшую долю дисперсии слоя стока половодья (Рисунок 5.3, Рисунок 5.5). Южная граница области проходит по зоне отсутствия стока воды из почвы [Национальный Атлас..., 2011]. Средний коэффициент парной корреляции их со стоком – 0.33 для *F-14*, 0.62 для *F-15*, 0.49 для *F-16* и 0.50 для *F-17*, что сопоставимо с теснотой связи стока с характеристиками снежного покрова.

Наиболее распространены характеристики группы *F-16* (влажность почв к окончанию зимы) и *F-15* (влажность почв начала зимы): они первостепенны для 5 % водосборов каждые. Взаиморасположение областей преобладания групп *F-16* и *F-15*, вероятнее всего, обусловлено зоной усиления зимней адвекции с Атлантики. Подобный результат несколько отличается от представлений классической гидрологии, где подразумевается незначительность изменений влажности почвы в течение зимы.

Общая пространственная картина первых ФФС довольно пестрая как по группам (Рисунок 5.5), так и по физическому смыслу (Рисунок 5.6). По физическому смыслу к северу от 52–54° с.ш. в этой роли преобладает приходящая составляющая: запас воды в снежном покрове, твердые и общие осадки (Рисунок 5.3б). Запас воды в снеге тяготеет к западной части региона, а осадки – к центральной и восточной. К югу от этой границы существенно возрастает вклад в дисперсию у влажности почвы и температуры воздуха, а в юго-западном секторе ЕТР формируются ареалы преобладания значимости глубины промерзания и скорости таяния. Факторы, относящиеся к срокам, продолжительности и количеству явлений не образуют отдельной области и могут быть отнесены к азональным ФФС-1 (Рисунок 5.3б).

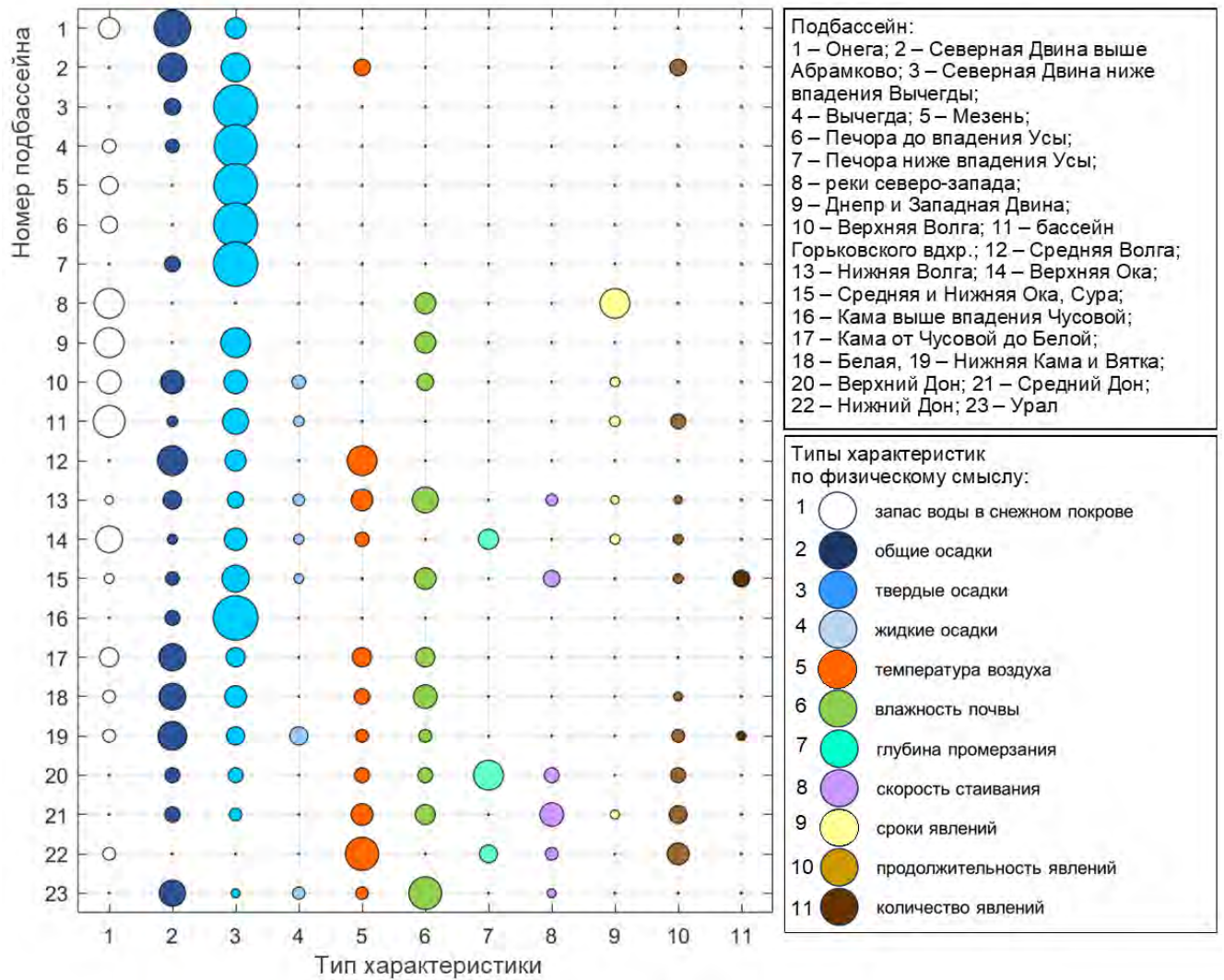


Рисунок 5.6 – Частота появления переменных различных типов в роли ФФС-1 в уравнениях вида E_{best} для подбассейнов в пределах ЕТР. Размер символа пропорционален количеству случаев появления характеристики в пределах подбассейна

5.2.2. Второстепенный фактор формирования стока

Второй по значимости фактор формирования стока половодья ФФС-2 определялся по следующим критериям:

- характеризуется менее тесной связью со стоком половодья в сравнении с ФФС-1;
- имеет высокую повторяемость в двух- и трехпараметрических уравнениях;
- образует двух- и трехпараметрические уравнения с участием ФФС-1 с высокими значениями MR и $RMSE$.

Второй фактор формирования стока ФФС-2 характеризуется более пестрой пространственной картиной по сравнению с ФФС-1 (Рисунок 5.7).

Наиболее часто встречаются характеристики групп $F-16$, $F-2$ (по 13% водосборов) и $F-4$ (10 % водосборов). Группы $F-6$, $F-13$ – $F-15$ и $F-17$ в качестве ФФС-2 выступают для 6–9 %

водосборов каждая. Общие характеристики зимы $F-2$, оттепелей $F-4$, окончания зимы и начала весны $F-6$, $F-7$, $F-12$, влажности почвы в конце зимы $F-16$ и ее экстремумов $F-17$ в роли ФФС-2 сравнительно равномерно представлены по всей ЕТР. Южнее 59° с.ш. сравнительно равномерно распределены характеристики влажности почвы перед началом зимы $F-15$, а южнее 56° с.ш. – характеристики первых 10 весенних дней $F-11$. Таяние снежного покрова в роли ФФС-2 локализовано между 50 и 59° с.ш., но тяготеет к западной и юго-западной частям ЕТР. Второстепенную роль в бассейнах рр. Волга у г. Старица и в среднем течении, Кама и Ловать играет летнее увлажнение почвы ($F-14$). Пространственное распределение характеристик снежного покрова $F-1$, суровости зимы $F-3$, окончания зимы и начала весны $F-8$ – $F-10$, $F-12$ близко к случайному (Рисунок 5.7а, Рисунок 5.8).

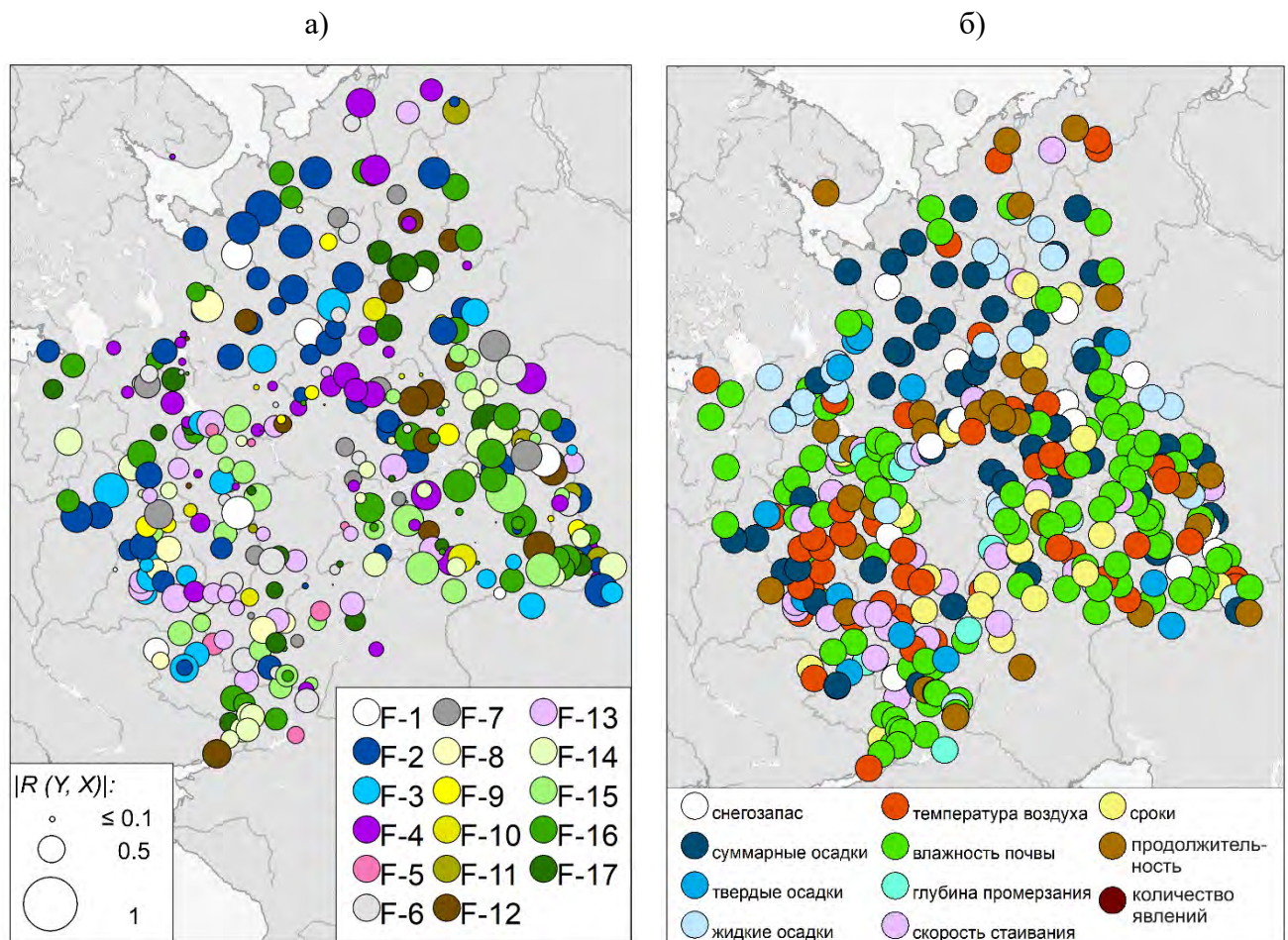


Рисунок 5.7 – Пространственное распределение второго фактора ФФС-2

по трехпараметрическим уравнениям по группам (а) и по физическому смыслу характеристики (б). Размер символа на (а) пропорционален модулю коэффициента корреляции $R(Y, X)$

Средний коэффициент корреляции ФФС-2, определенного по трехпараметрическим уравнениям, со стоком составляет 0.37, в отдельных случаях увеличиваясь до 0.6 и более. Как и в случае с ФФС-1, наиболее тесная связь отмечается в восточной половине ЕТР и на реках

западного кластера (р. Днепр и верховья Оки, Рисунок 5.7).

При кластеризации их по физическому смыслу установлено, что влажность почвы и жидкие осадки в роли ФФС-2 встречаются в 2–2.2 раза чаще по отношению к аналогичному показателю у ФФС-1, в 1.4–1.8 раза – для температуры воздуха, таяния снежного покрова и продолжительности явлений, а для сроков формирования явлений – в 3 раза (Рисунок 5.8).

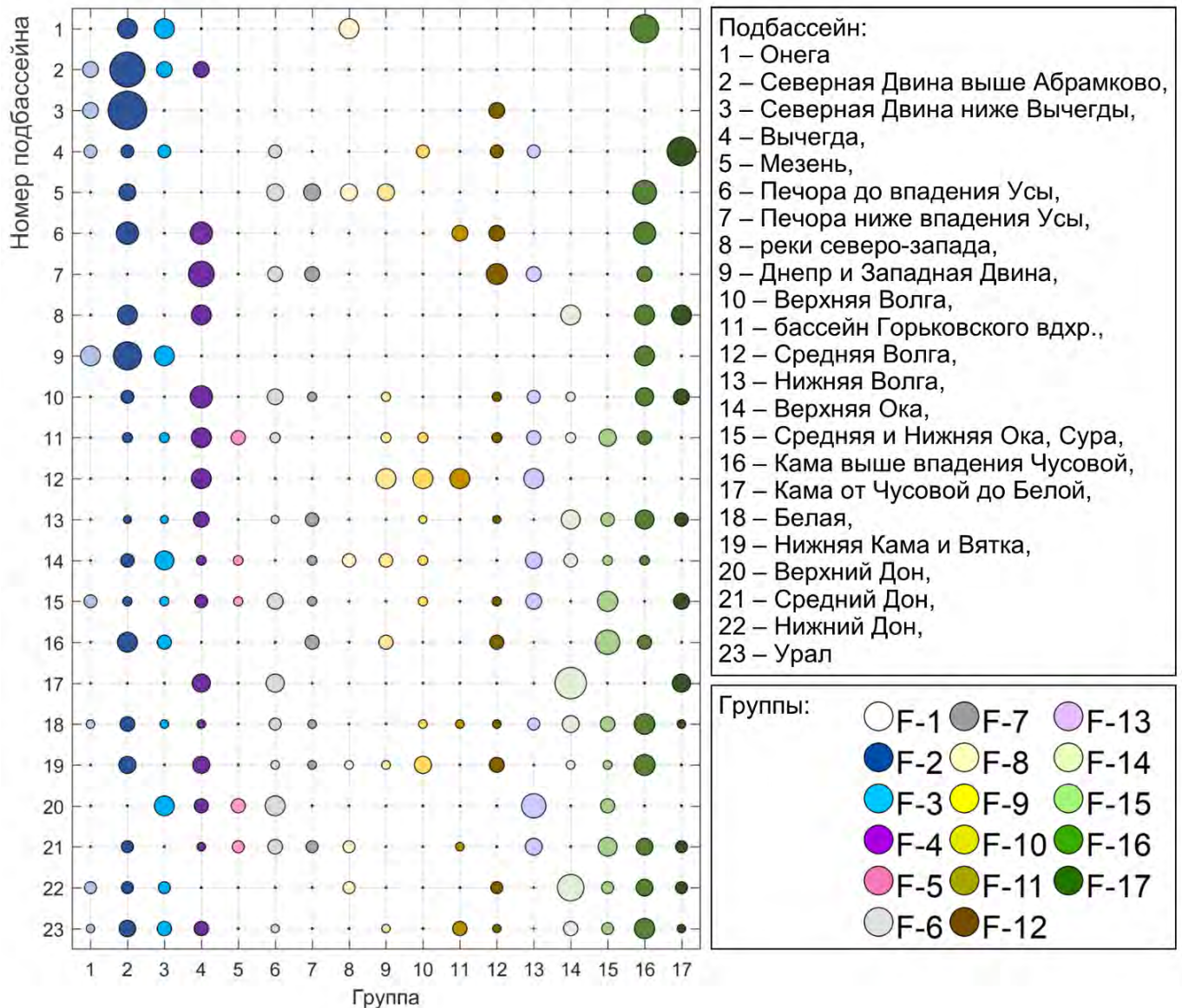


Рисунок 5.8 – Частота появления групп $F-1$ – $F-17$ (по горизонтали) в роли ФФС-2 в уравнениях вида E_{best} для подбассейнов в пределах. Размер символа пропорционален количеству случаев появления характеристики в пределах подбассейна

Влажность почвы в роли ФФС-2 относительно ФФС-1 больше распространена на западе: в бассейнах рек северо-запада и Верхней Волги. В левобережье Волги и Камы появляется ареал факторов сроков развития гидрометеорологических явлений, а к западу от него – обширная область значимости таяния снежного покрова как фактора. Одновременно с этим ареал

температуры воздуха как ФФС-2 смещается к северу. Примечательно, что случаев значимости глубины промерзания всего 7 (рр. Печегда, Сунжа, Ока у д. Костомарово, Сура у с. Сурское, Дон у г. Лиски, Аткара и Есауловский Аксай), что существенно не отличается от ФФС-1.

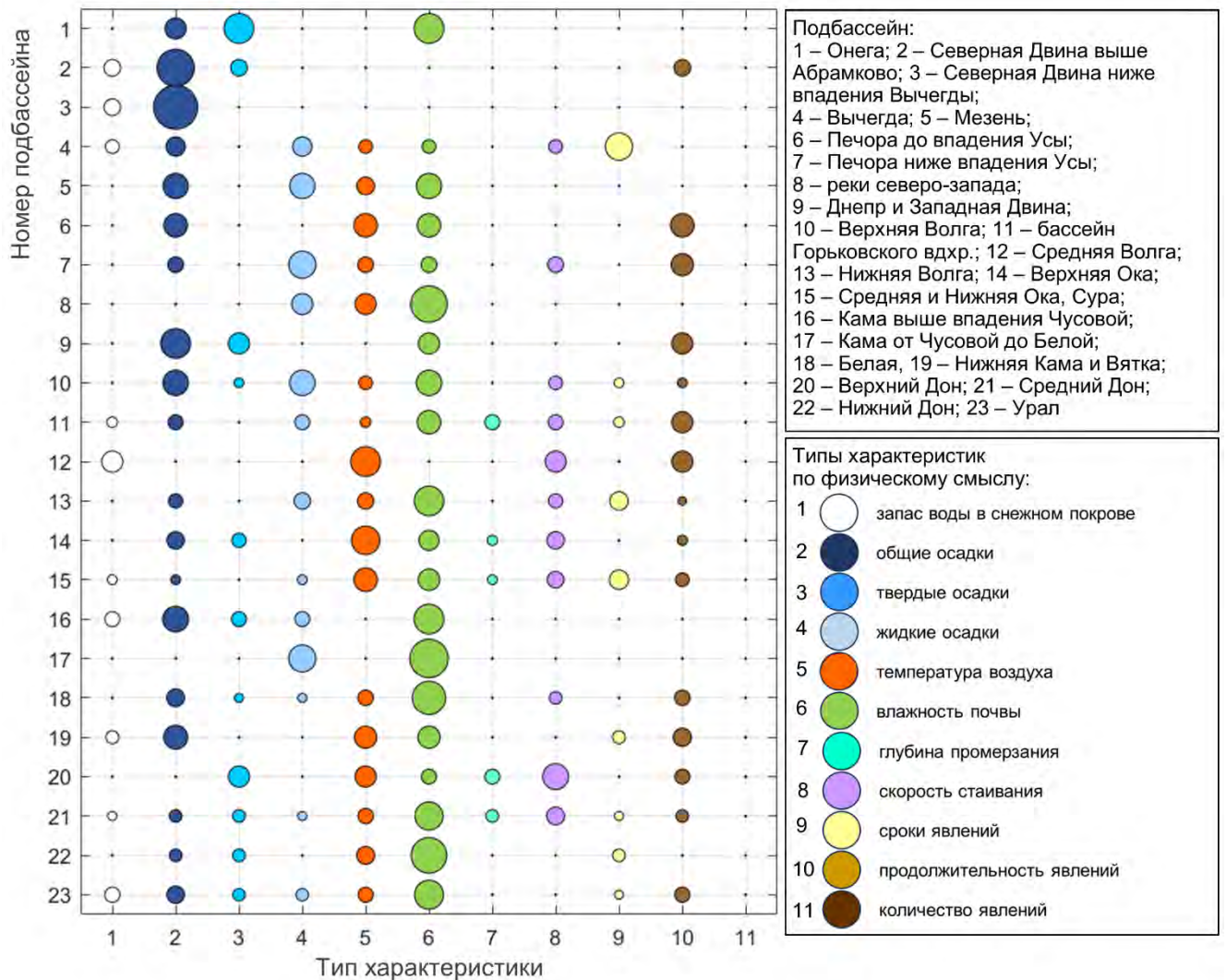


Рисунок 5.9 – Частота появления разных по физическому смыслу типов характеристик в роли ФФС-2 в уравнениях вида E_{best} для подбассейнов в пределах ЕТР. Размер символа пропорционален количеству случаев появления характеристики в пределах подбассейна

5.2.3. Третий по значимости фактор формирования стока

Третьим по значимости назначался фактор формирования стока половодья ФФС-3, входящий в уравнение E_{best} с ФФС-1 и ФФС-2 и характеризующийся высокой повторяемостью в первых 50 трехпараметрических уравнениях.

ФФС-3 характеризуется максимально пестрым пространственным распределением (Рисунок 5.10а). Наиболее часто он представлен температурой воздуха (30 % водосборов) и влажностью почвы (26 % водосборов) (Рисунок 5.10б, Рисунок 5.12). Среди групп чаще других встречаются оттепели $F-4$ и влажность почвы в конце зимы $F-16$ (по 15 % водосборов), группы

окончания зимы – начала весны $F-6 - F-12$ (суммарно 37 %). Он обеспечивает в среднем 5 % дисперсии стока половодья ($R = 0.22$), в отдельных случаях в бассейне рр. Белая и Мулянка повышаясь до 50 %.

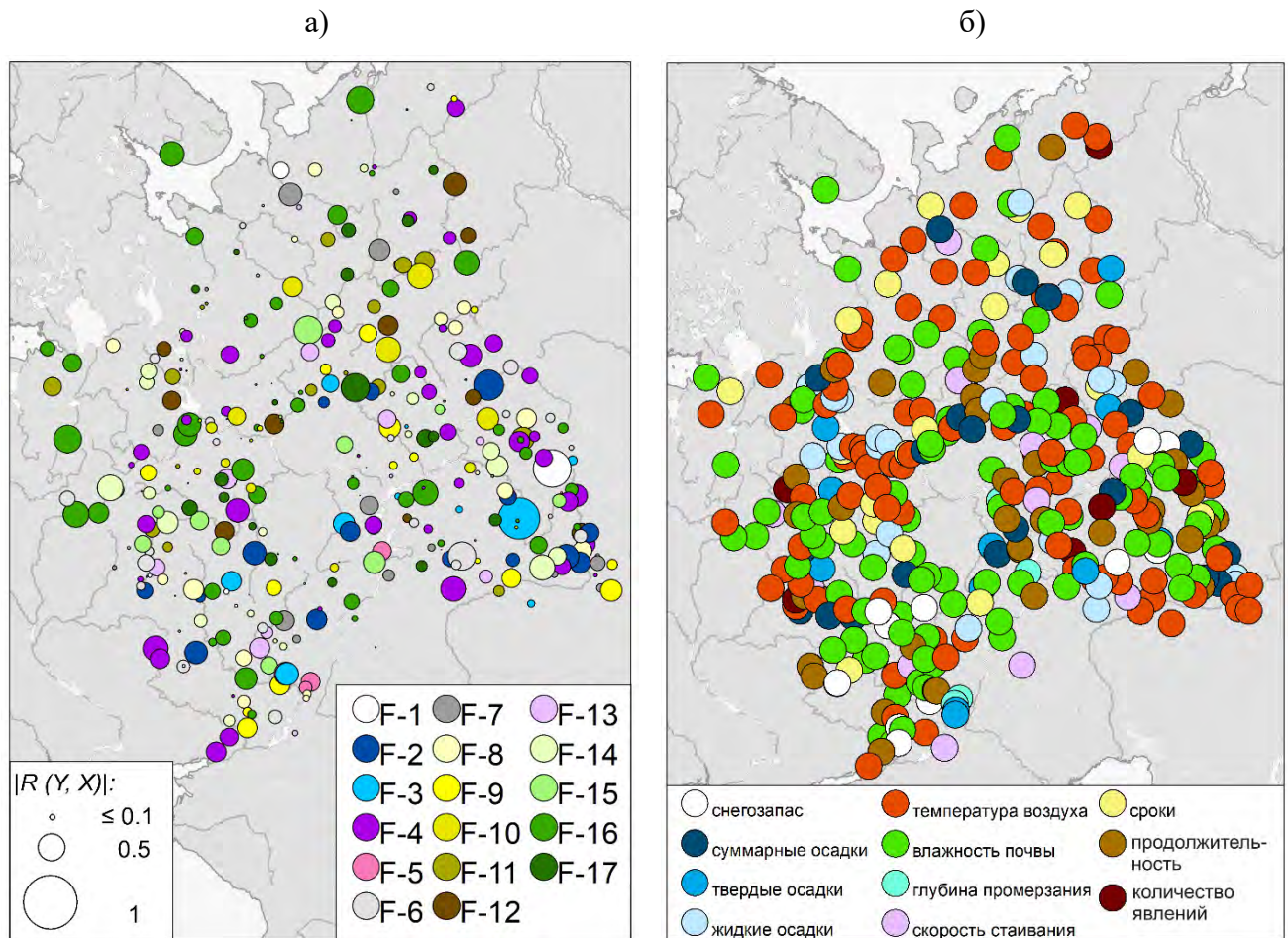


Рисунок 5.10 – Пространственное распределение третьего фактора ФФС-3 по трехпараметрическим уравнениям по группам (а) и по физическому смыслу характеристики (б). Размер символа на (а) пропорционален модулю коэффициента корреляции $R(Y, X)$

Группы $F-1$, $F-2$ в роли третьего фактора представлены преимущественно южнее $54-55^\circ$ с.ш., а группа $F-10$ и $F-11$ – к северу от этой границы. Также отмечается высокая значимость летней влажности почвы в бассейнах Верхней Оки, рр. Дон, Белая и Вятка. Остальные характеризуются распределением, близким к равномерному или случайному (Рисунок 5.10а, Рисунок 5.11).

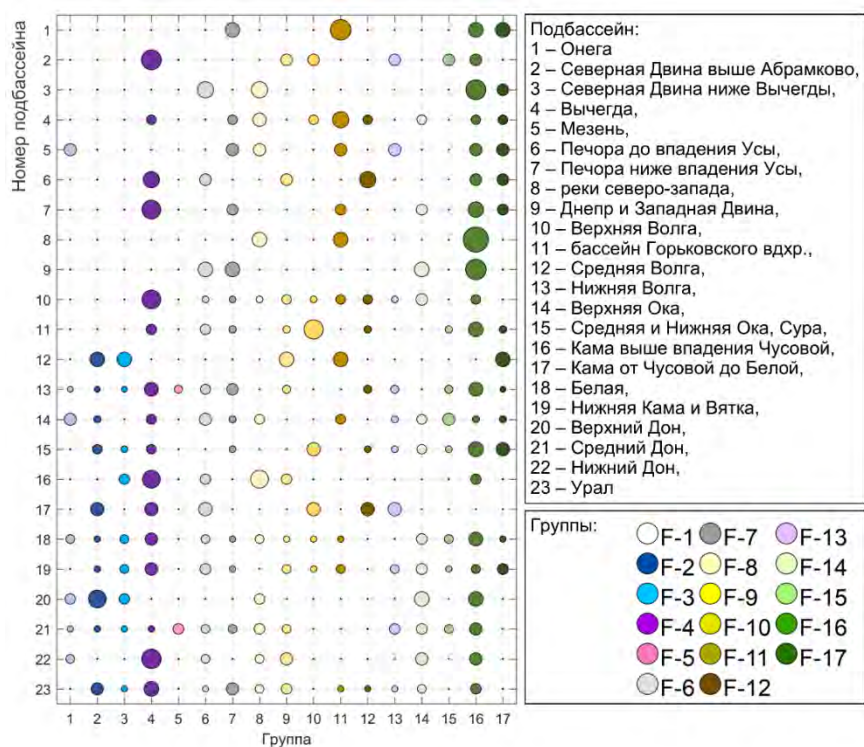


Рисунок 5.11 – Частота появления групп $F-1$ – $F-17$ в роли ФФС-3 в уравнениях вида E_{best} .
Размер символа пропорционален количеству случаев появления характеристики в пределах подбассейна

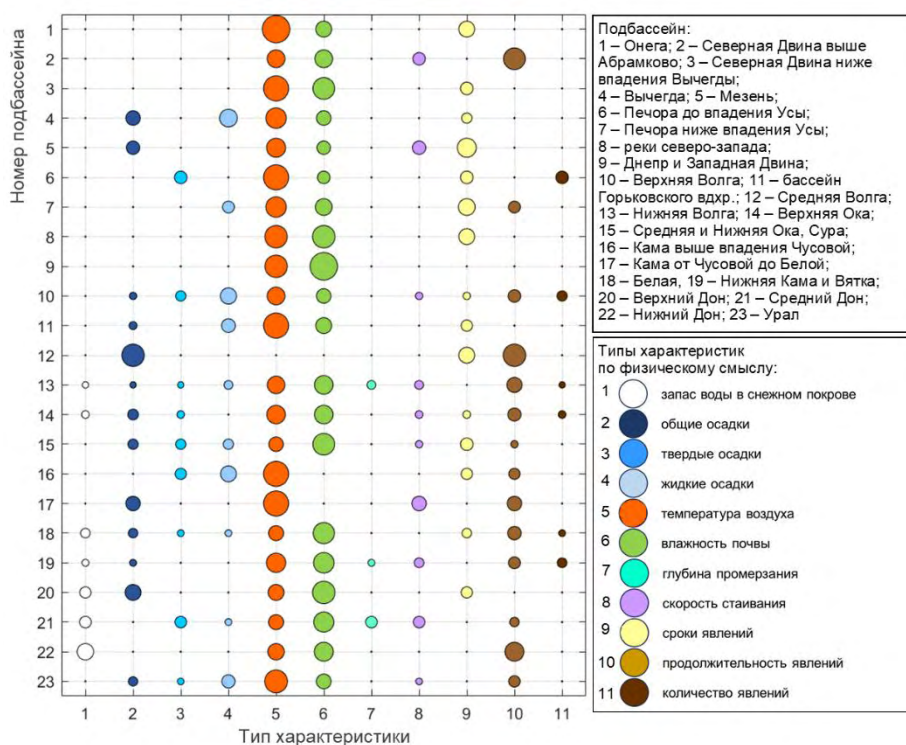


Рисунок 5.12 – Частота появления разных по физическому смыслу типов характеристик в роли ФФС-2 в уравнениях вида E_{best} для подбассейнов в пределах ЕТР. Размер символа пропорционален количеству случаев появления характеристики в пределах подбассейна

5.2.4. Приходная составляющая трехпараметрических уравнений

Особенностью статистического подхода стало получение 75 уравнений без приходной составляющей среди первых трех факторов: они состоят исключительно из перераспределяющих факторов. Соответствующие им водосборы расположены преимущественно к югу от 54–56° с.ш. По гидротермическому коэффициенту Селянинова – это зона недостаточного увлажнения (Рисунок 5.13б). Отсутствие в них приходной составляющей не является показателем аazonальности: лишь 41 из них имеет площадь менее 2 000 км² и 1 – более 50 000 км² (р. Дон – ст-ца Казанская). Как правило, эти уравнения содержат в себе влажность почвы, характеристики температуры воздуха и таяния снежного покрова, сроки и продолжительность явлений, а также промерзание почвы.

Важно отметить, что приходная составляющая для этих водосборов не является незначительной. Например, парный коэффициент стока половодья с суммой твердых осадков за зиму для р. Дон у ст-ца Казанская составляет 0.56, а с составляющими уравнения вида E_best – сроками установления снежного покрова (SP_day_{start}), скоростью пассивного таяния ($melt_passive_{TC}$) и весенней влажностью почвы ($swvl_{21-31.03}$) – 0.50, 0.45 и 0.41 соответственно. Тем не менее, комбинации расходных и перераспределяющих факторов обеспечивают формирование более тесной статистической связи их со стоком половодья. Таким образом выделяется обширная область, в пределах которой для рек в весенний период условия водоподачи играют гораздо более значимую роль, нежели объем этой самой водоподачи.

Отдельного анализа требуют факторы формирования стока половодья, имеющие схожий физический смысл, но относящиеся к разным группам и рангам (Рисунок 5.13а).

Запас воды в снежном покрове присутствует в 66 уравнениях вида E_best (Рисунок 5.14а). Практически в 2/3 случаев он представлен характеристиками группы $F-1$, но в 1/3 случаев – характеристиками групп $F-6$ – $F-12$. Главным фактором формирования половодного стока ФФС-1 группы $F-1$ он выступает в бассейнах Верхней Волги, Верхней Оки, Верхнего Днепра, а также для отдельных створов в бассейнах рек Северного края и Камы. При этом в бассейне Верхней Волги за исключением рр. Чагодыша, Которосль, Угра и Осётр он имеет первый ранг на малых реках. На рр. Уфа у г. Нязепетровск, Большой Черемшан и Калитва ФФС-1 представлен средним запасом воды в снежном покрове за конец зимы (группа $F-6$ – $Smean_{Smax-S0}$), для р. Ока у д. Вендерово – группой $F-7$ ($Smean_{Smax-T0}$). На рр. Упа и Жиздра главенствующую роль занимает средний последних 10 дней зимы влагозапас в снеге (группа $F-10$ – $Smean_{last 10d}$).

В роли ФФС-2 и ФФС-3 запас воды в снежном покрове, как правило, представлен по 14 раз в уравнениях для рек за пределами бассейнов Верхней Волги и Оки. Из них на второстепенной позиции максимальным показателем за зиму он представлен только в 4-х случаях (рр. Сухона, Вычегда, Емца и Гусь), а в роли ФФС-3 – в 2-х (рр. Валуй и Матыра).

В пределах центра ЕТР и на ее восточных окраинах значительно больше распространены характеристики, описывающие среднюю величину запаса воды в снежном покрове на конец зимы – начало весны (группы $F-6$ – $F-12$).

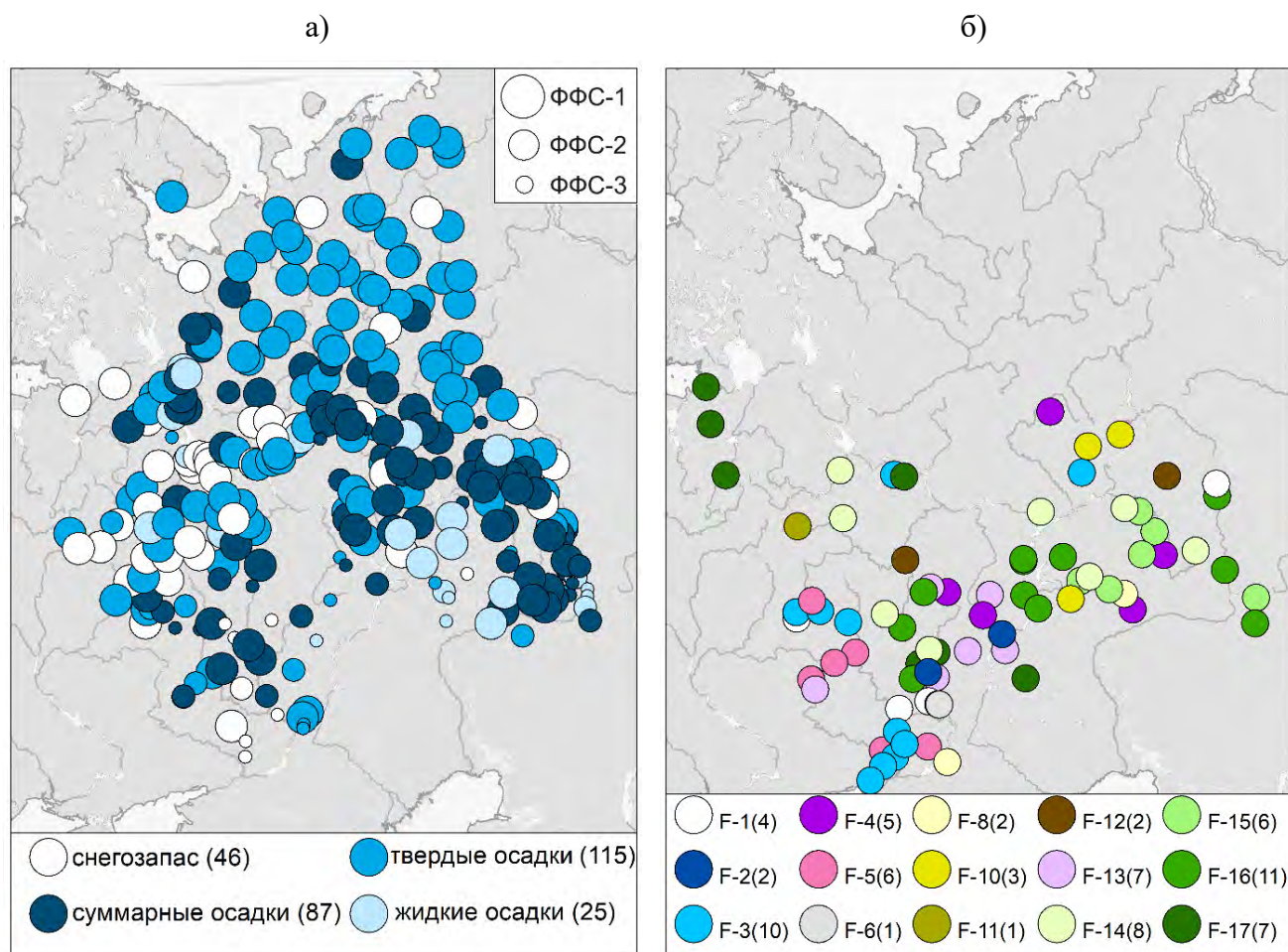


Рисунок 5.13 – Уравнения вида E_{best} : а) водосборы, для которых в уравнениях с максимальным MR присутствует приходная составляющая в виде ФФС-1, ФФС-2 или ФФС-3; б) водосборы, для которых в уравнениях с максимальным MR отсутствует приходная составляющая. Номер группы (б) соответствует ФФС-1, число в скобках – количество случаев

Для группы $F-1$ кроме наиболее часто встречающихся максимальных суточных величин значимыми оказались максимальный 10-дневный ($Smax_{10d}$), суммарный ($Ssum$) и средние за зиму запасы воды в снежном покрове ($Smean_{snow_days}$, $Smean_{snow_period}$) и их коэффициенты вариации.

Локализация запаса воды в снежном покрове как фактора формирования стока половодья напрямую связана с устойчивостью покрова в течение зимы и затоками тепла зимой. Так, сравнительно устойчивому снегонакоплению соответствуют ареалы доминирования факторов группы $F-1$, а областям с наиболее частыми и глубокими оттепелями – конца зимы.

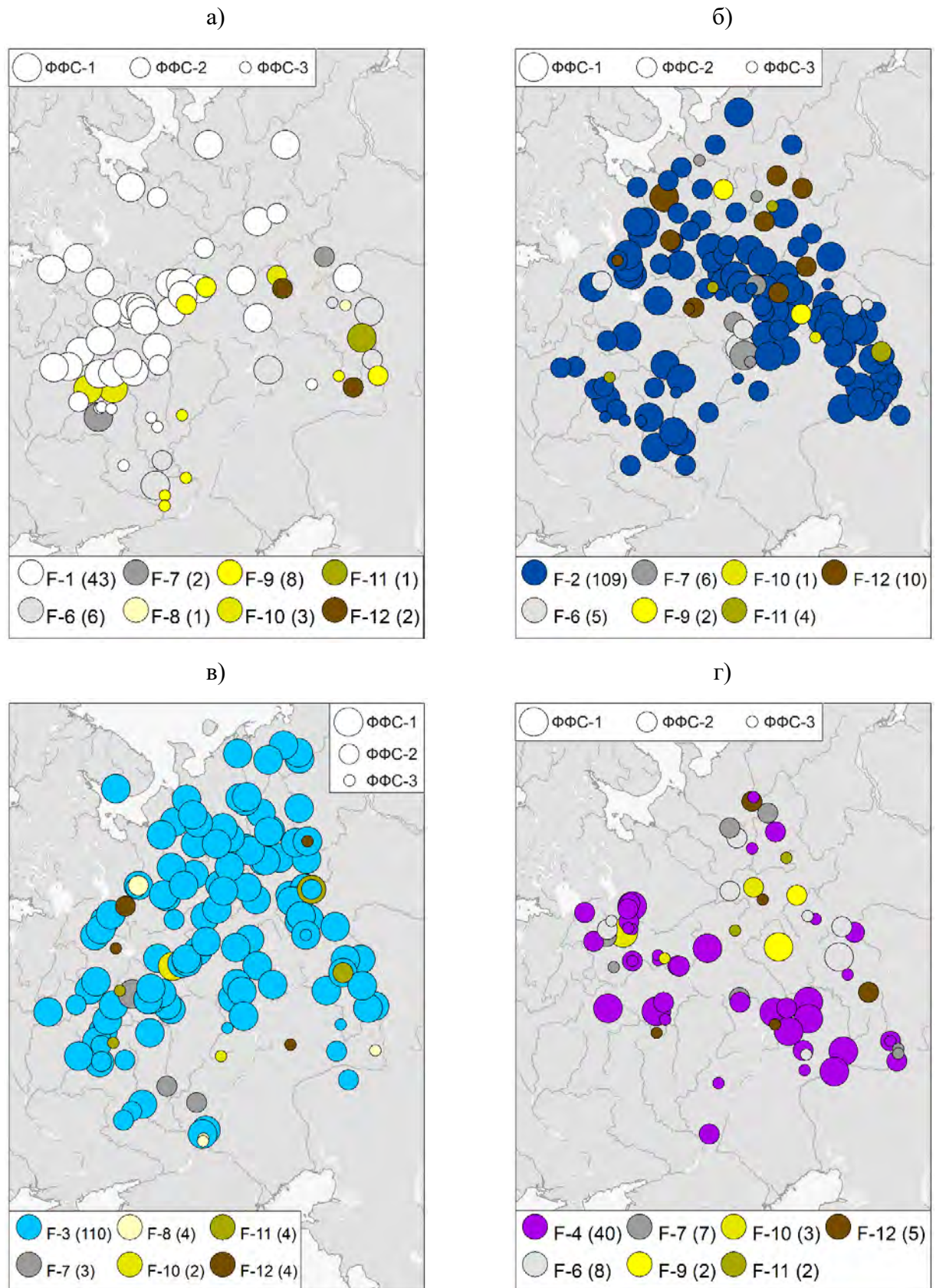


Рисунок 5.14 – Пространственное распределение рангов для запаса воды в снежном покрове (а), общих сумм осадков (б), твердых осадков или сумм осадков, выпадающих при отрицательных температурах (в), жидких осадков или сумм осадков, выпадающих при положительных температурах воздуха (г). Число в скобках – количество случаев

Общие суммы осадков представлены в группах $F-2$, $F-6$, $F-7$, $F-9$ – $F-12$. Как и запас воды в снежном покрове, они присутствуют в уравнениях вида E_best на трех позициях: главенствующим фактором – для 61 водосбора, вторым по значимости – для 55 водосборов и третьестепенным – для 21 водосбора (Рисунок 5.14б). Больше всего они распространены от Ладожского озера и бассейна р. Онега до верховьев р. Урал. К северо-востоку от этой области значимость сумм общих осадков резко снижается, а акцент уходит с зимних осадков на начало весны. Среди этих водосборов в 80 % случаев сумма осадков выражается группой $F-2$, в 38 % – суммой осадков с 1 ноября до схода снежного покрова ($TPsum_{01.11-SP}$). Последняя характеристика превалирует среди ФФС-1 по общим осадкам и характерна для бассейнов рр. Днепр, Дон, Ока, Вятка, Белая и Урал. Суммы осадков $TPsum_{01.02-SP10}$ и $TPsum_{20.02-SP10}$ имеют распределение в пространстве, близкое к случайному, а суммы осадков $TPsum_{10.02-SP10}$ тяготеет к Верхней Волге, р. Северная Двина и междуречью рр. Кама и Белая, а также на рр. Жиздра, Битюг, Хопер у хут. Барминский, Урал у с. Кизильское и Большая Караганка.

К северу от 53° с.ш. сравнительно равномерно распределены в пространстве суммы твердых осадков групп $F-3$, $F-7$, $F-8$, $F-10$ – $F-12$ (Рисунок 5.14в). Из всех случаев появления фактора в уравнениях, в 78 % он – главенствующий, и в 97 % из них – представлен суммой твердых осадков за зимний период. Лишь для рр. Медоza, Серая и Вишера ведущую роль играют осадки конца зимы – начала весны ($F-10$, $F-7$ и $F-11$, соответственно). К югу от указанной границы суммы твердых осадков представлены гораздо реже, преимущественно 2-м и 3-м рангами.

Суммы жидких осадков представлены в группах $F-4$, $F-6$ – $F-12$ и локализованы двумя ареалами: к югу от области наибольшего распространения сумм зимних осадков, а также к северу и востоку от нее до Уральских гор и Нижней Печоры (Рисунок 5.14г). Первый ареал в основном представлен группой $F-4$, что, вероятнее всего, связано с глубиной проникновения наиболее интенсивных зимних оттепелей, влияющих на условия накопления снежного покрова. К северу и востоку от нее в роли ФФС-2 и ФФС-3 выступают жидкие осадки конца зимы – начала весны. Предположительно, появление данного ареала связано с влиянием жидких осадков на скорость таяния и коэффициент стока.

5.2.5. Роль влажности почвы в статистических уравнениях

Для 204 водосборов (59 % выборки) значимой оказалась влажность почвы групп $F-14$ – $F-17$ (Рисунок 5.15а). Наибольший вклад в дисперсию стока половодья влажность почвы обеспечивает в бассейнах рр. Урал, Цна, Белая, Нижняя Волга, Хопер и на ряде малых рек к северу от 56° с.ш. (рр. Коваши, Днепр в верховьях, Кесьма, Ильдь, Корожечна, Воря, Быстрица и Мулянка). Но чаще всего она выступает ФФС-2 (42 %) и ФФС-3 (37 %).

Во всех рангах преобладают характеристики группы $F-16$ (влажность почвы перед окончанием зимы), квазиравномерно распределенные в пределах ЕТР с наибольшим

распространением в бассейнах рр. Дон, Чусовая, Белая и Нижней Волги (Рисунок 5.15а). Этот ареал соответствует зоне наибольшего перехвата поверхностного стока: областям отсутствия и незначительного стока из почвы, а также наибольшего распространения карста в пределах ЕТР. Кроме того, в пределах Северного края, Нижнего Дона и Нижней Волги влажность почвы в уравнениях вида E_{best} другими группами практически не представлена. Наиболее часто встречающаяся характеристика – влажность почвы конца февраля ($swvl_{21-28.02}$).

Летняя влажность почвы (группа F-14) значима как ФФС среди 4-х групп к югу от 58° с.ш. для рек площадью менее 3 500 км² (Рисунок 5.15а). Чаще других она представлена влажностью почвы конца августа ($swvl_{21-31.08}$). Для отдельных рек отмечены случаи значимости влажности почвы в июне (например, рр. Быстрица, Карай, Худолаз, Истра и Сызрань) и июле (например, рр. Ильдъ, Мулянка, База, Большой Авзян, Малый Кинель, Илеть и Луга).

Влажность почвы до начала установления снежного покрова (группа F-15) представлена в уравнениях для бассейнов рр. Урал, Волга и Дон (Рисунок 5.15а). В основном она играет второстепенную роль и чаще представлена влажностью почвы за 10 дней до установления снежного покрова ($swvl_{10d_before_sd_start}$) и ее классом ($swvl_type_{10d_before_sd_start}$). Ее ареал совпадает с описываемым в советской литературе, отклоняясь немного на восток.

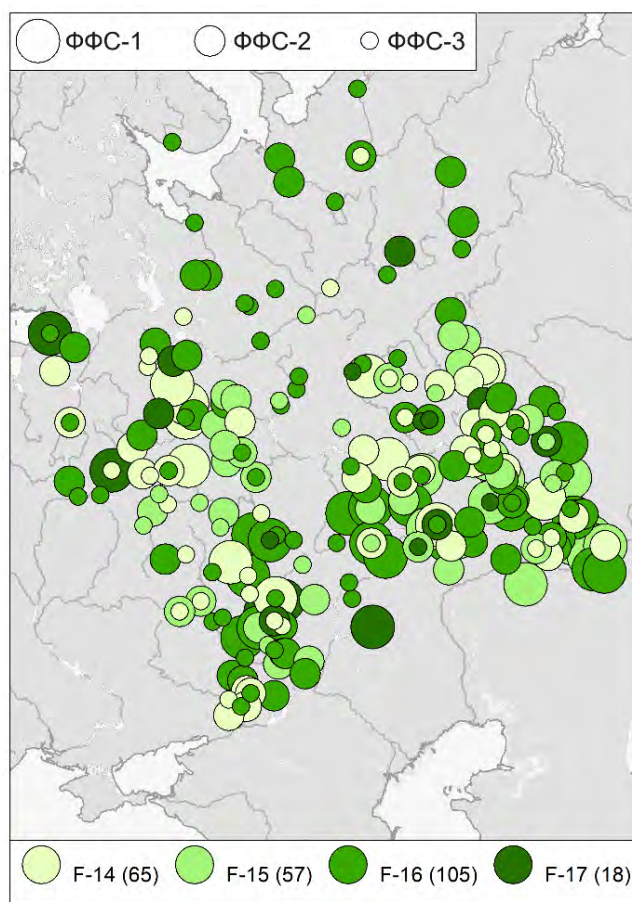


Рисунок 5.15 – Пространственное распределение влажности почвы как ФФС половодья различных рангов

Группа экстремумов влажности почвы ($F-17$) по характеру распределения и набору рек близка к аazonальной, а доминирующая характеристика отсутствует.

Выраженные ареалы распространения отсутствуют и для разных типов представления влажности почвы – абсолютной, линейной сухости (индекс lin) и класса сухости (индекс $type$).

5.2.6. Роль глубины промерзания почвы в статистических уравнениях

Глубина промерзания почвы (группа $F-5$) встречается для 22 водосборов: в 10 – в роли ФФС-1, в 7 – в роли ФФС-2 и в 5 – в роли ФФС-3 (Рисунок 5.16). Основной ареал распространения – бассейны Верхней Оки, рр. Дон и Сура. В отличие от классических представлений, подразумевающих использование данных о максимальной глубине промерзания и

на определенную дату, установлена высокая значимость средней глубины промерзания почвы: как ФФС-1 (рр. Ока у г. Белев, Зуша, Дон у г. Задонск, Сосна у д. Беломестная, Тихая Сосна) и ФФС-2 (рр. Ока у д. Костомарово и Аткара).

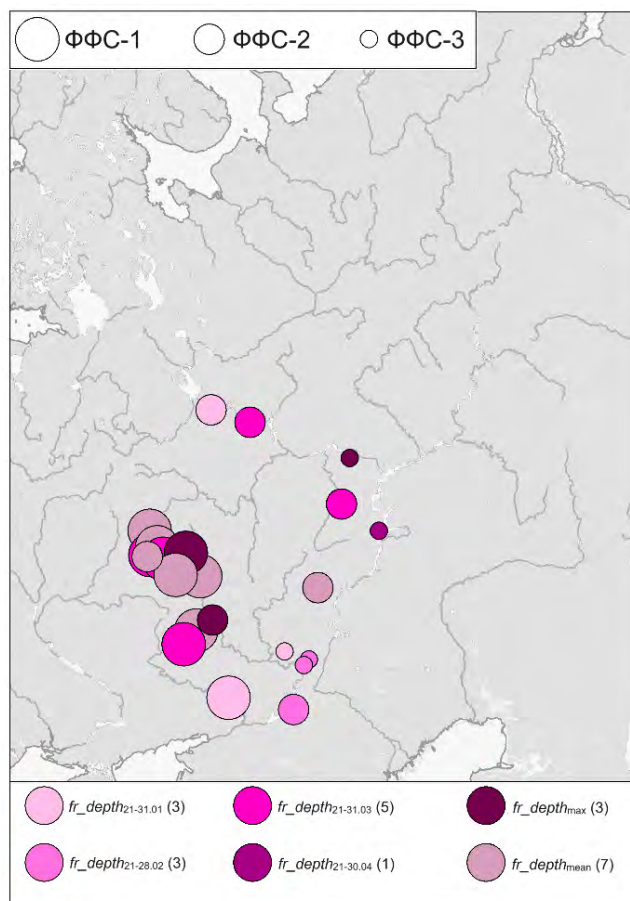


Рисунок 5.16 – Пространственное распределение глубины промерзания почвы как ФФС половодья разных рангов

5.2.7. Роль температуры воздуха и таяния снежного покрова в статистических уравнениях

В противовес локализованной глубине промерзания, температура воздуха как фактор

значима для 165 из 348 рек (Рисунок 5.17а). Более половины рек относятся к средним, что не позволяет считать данный фактор азональным. Фактором с наибольшим вкладом в дисперсию стока половодья ФФС-1 он выступает примерно в 10 % случаев, ФФС-2 – в 14 % и третьестепенным – в 30 % случаев. Характеристики температуры воздуха могут быть использованы в качестве члена уравнения практически для всех рек ЕТР.

В бассейнах рек Северного края, северо-запада и Верхней Волги температура воздуха на границе зимы и весны (группы $F-8$ – $F-11$), как правило, выступает в роли ФФС-3 и ФФС-2. В силу значительной величины снегонакопления и редких глубоких оттепелей в этом регионе она выступает показателем условий начала таяния снежного покрова.

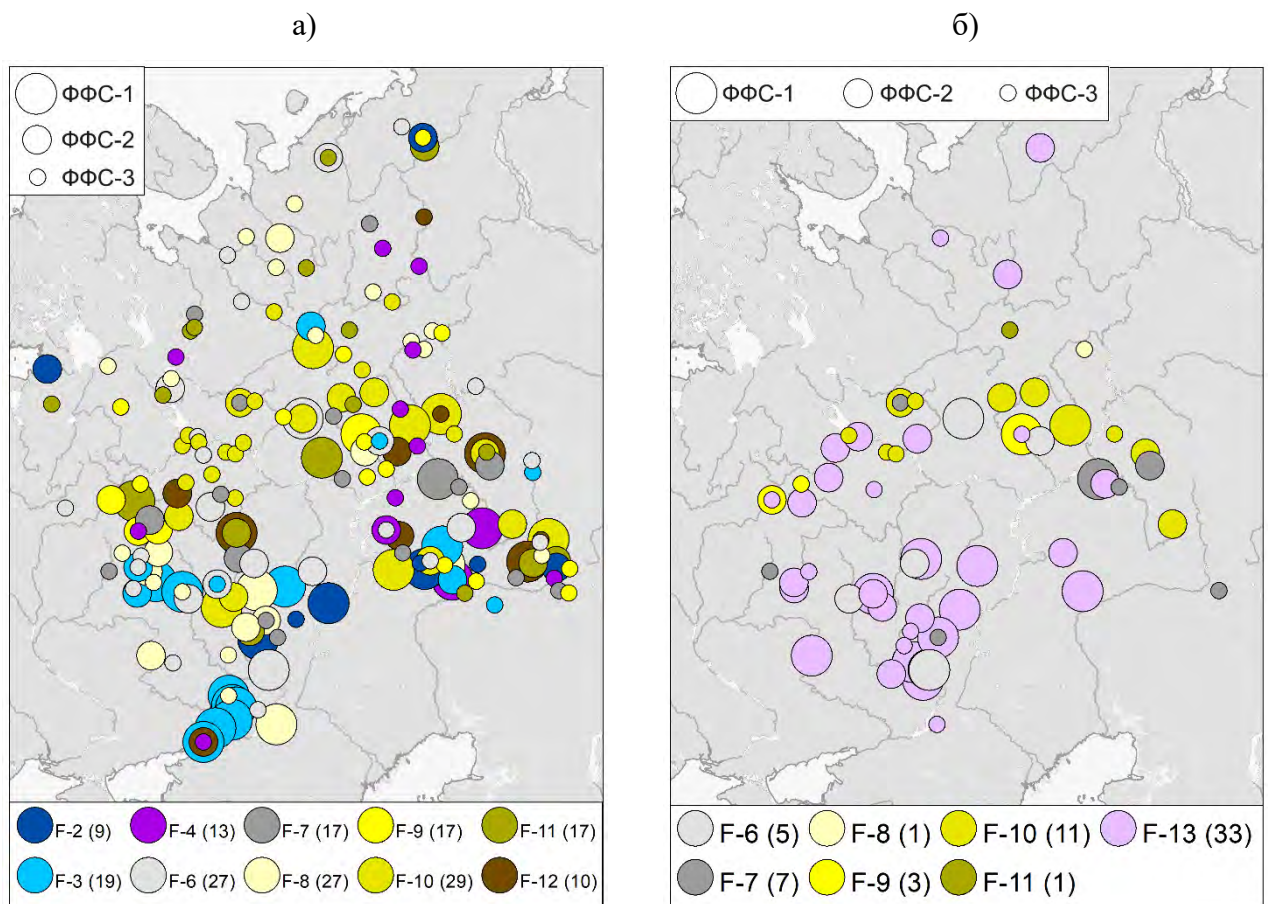


Рисунок 5.17 – Пространственное распределение рангов и тесноты связи для температуры воздуха (а), температурных трендов и скоростей таяния снежного покрова (б).

Значение в скобках – количество случаев

Южнее в области мягких и неустойчивых зим растет вклад температуры воздуха в дисперсию стока половодья. Здесь она характеризует возможность формирования условий снегонакопления, промерзания и режима увлажнения почвы. На этом фоне растет и ее ранг: для рек площадью менее 2 500 км², а также для рр. Сакмара, Луза, Сюнь, Бузулук (приток р. Волга), Сосна, Ворона, Калитва и Быстрая температура воздуха выступает ФФС-1. Возрастает

и теснота связи и сумм зимних и отрицательных температур (рр. Зуша, Сосна, Хопёр, реки Нижнего Дона) и их изменчивости (Бузулук (приток р. Волга), Терешка) групп *F-2* и *F-3*.

В роли первых трех ФФС, определенных регрессионными уравнениями, выступают 53 характеристики температуры воздуха от разных групп. Но среди них нет одной или несколько, которые встречаются существенно чаще других в пределах ЕТР. При кластеризации по физическому смыслу выделяются три ведущие группы: характеристики отрицательных температур, стандартное отклонение и коэффициент вариации. Менее распространены трендовые коэффициенты, суммы положительных температур и максимальные разницы температур за период, реже всего – средняя температура воздуха за период.

Характеристики таяния снежного покрова присутствуют в уравнениях стока половодья для рек бассейнов Дона, Оки, Северного края (рр. Вымь и Лая), малых рек Верхней Волги (Рисунок 5.17б). Как правило, эти водосборы аazonальны, а их почвогрунты характеризуются большой впитывающей способностью и минимальным внутрипочвенным стоком. По этой причине здесь преобладают скорость общего ($melt_{speed}$) и активного ($melt_active_{speed}$) таяния.

5.2.8. Сроки и продолжительность явлений как фактор формирования стока в уравнениях

Сроки формирования явлений и их продолжительность прежде напрямую не рассматривались как ФФС половодья. Тем не менее, анализ уравнений вида E_best показывает их значимость для достаточно большого числа речных водосборов: для 49 по срокам и 86 по продолжительности (Рисунок 5.18).

Сроки явлений в уравнениях вида E_best представлены характеристиками групп *F-1*, *F-2*, *F-16* и *F-17* (Рисунок 5.18а). Чаще других в уравнениях встречаются дни формирования максимальной (например, рр. Ловать, Вишера, Вычегда и Большой Караман) и минимальной (рр. Глубокая, Яренга, Луга, Емца) влажности почвы или ее класса (например, рр. Ворона, Мезень, Кена и Ухта). Для рр. Кема и Северский Донец в верховьях значимым является день схода снежного покрова, а для рр. Крома, Дон у ст-цы Казанская, Уза, Пёза и Белая у с. Шупша – день его установления. Для меньших речных водосборов увеличивается вес сроков начала и окончания зимы (например, рр. Межа, Чагра, Иньва, Тосна и Тихая Сосна). Закономерности полученного распределения не поддаются объяснению.

Более физически обосновано пространственное распределение факторов продолжительности явлений. В большей степени оно представлено продолжительностью оттепелей как со сходом снежного покрова, так и без него ($snowbreak_{max_len}$, $snowbreak_{mean_len}$, $snowbreak_{len}$, $thaw_{max_len}$, $thaw_{mean_len}$) и их коэффициента вариации ($thaw_days_{Cv}$).

Ареалы продолжительности из групп *F-5* и *F-13* соответствуют описанным выше (Рисунок 5.16, Рисунок 5.17). В них выделяются такие факторы как число дней с промерзшей почвой (fr_depth_{days} , например, на рр. Девица и Чир), продолжительность таяния снежного

покрова общая ($melt_{time}$, например, на рр. Бузулук, Барыш, Битюг) и нормированная на общую продолжительность его залегания ($melt_{time}_{\%}$, например, на рр. Мокша, Ай и Буй). В отдельных случаях значимой является относительная продолжительность активного (рр. Кутулук и Меша) и пассивного (рр. Большой Караман и Самара) таяния снега.

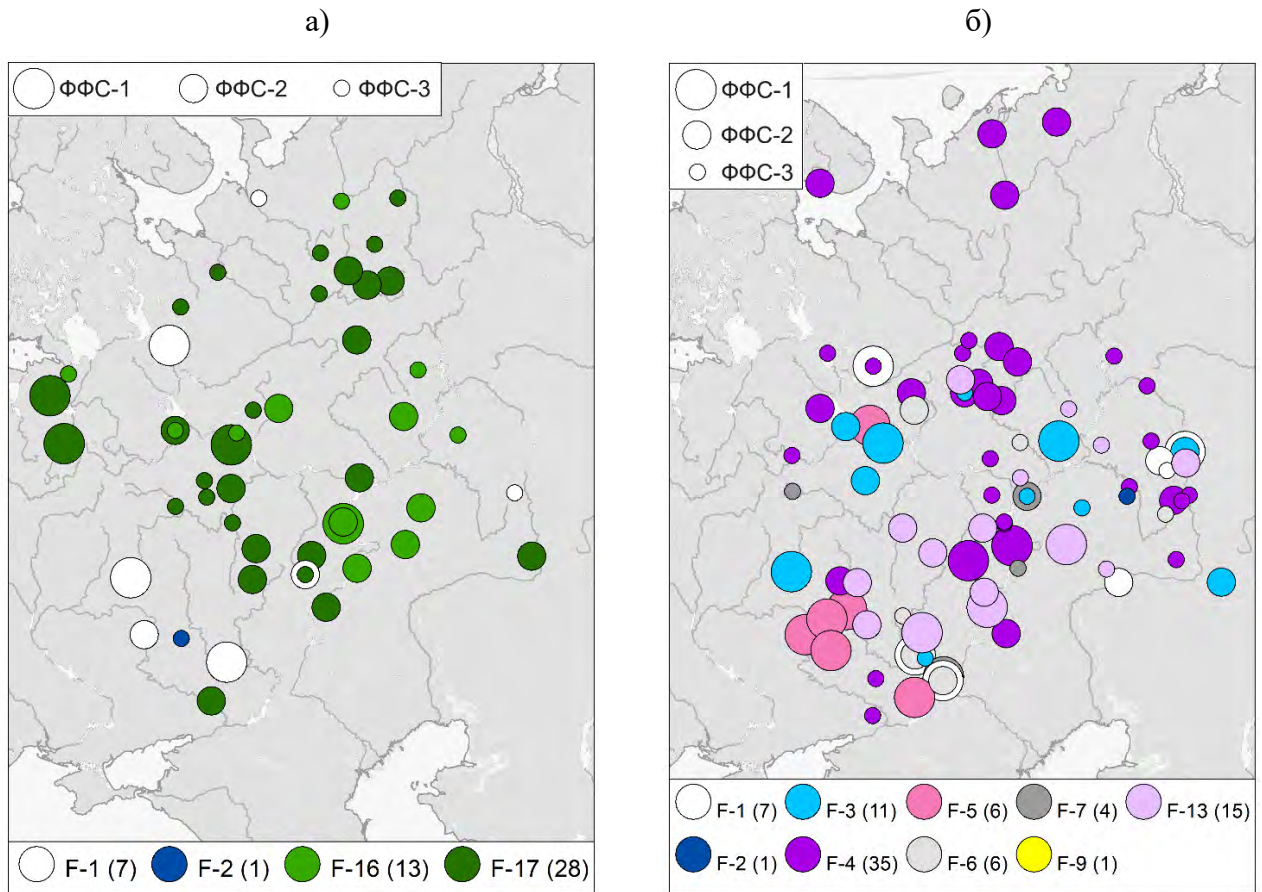


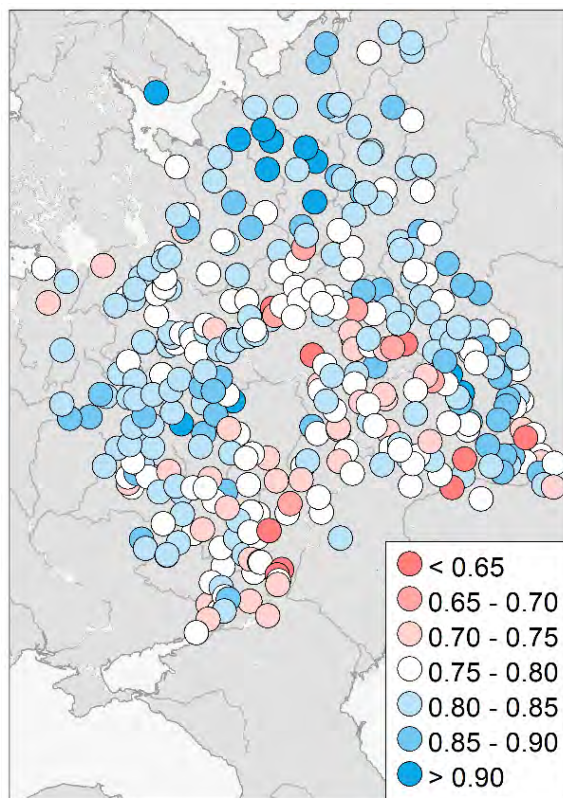
Рисунок 5.18 – Пространственное распределение сроков развития (а) и продолжительности явлений (б) в качестве ФФС разных рангов. Значение в скобках – количество случаев

5.2.9. Надежность полученных статистических и квазиводнобалансовых уравнений

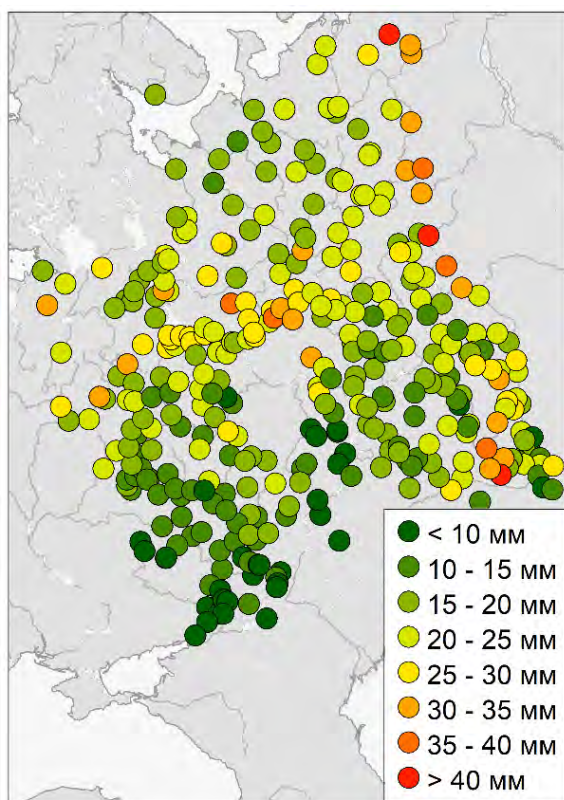
Привлечение столь большого количества факторов позволило получить трехпараметрические уравнения с высокими показателями тесноты связи. Так, среднее по всем водосборам значение множественного коэффициента корреляции MR составило 0.80 (Рисунок 5.19а). Наибольшие его значения достигаются в бассейнах рр. Пинега и Мезень (до 0.93), и наименьшие – для аazonальных рек центральной полосы и южного сектора ЕТР (до 0.61). Высокие показатели MR также достигаются для отдельных створов в бассейне р. Ока, Белая и Днепр.

Среднее по всем водосборам значение среднеквадратической ошибки $RMSE$ составило 19 мм. Ее минимальные абсолютные значения достигаются для рек бассейна Дона и Нижней Волги (до 4 мм), а наибольшие – для рр. Касмарка, Вишера (приток Камы) и Колва (до 51 мм). Большие значения $RMSE$ характерны для горных рек, включая Южный Урал (до 40 мм), и малых рек бассейна Верхней Волги (25–35 мм).

a)



б)



в)

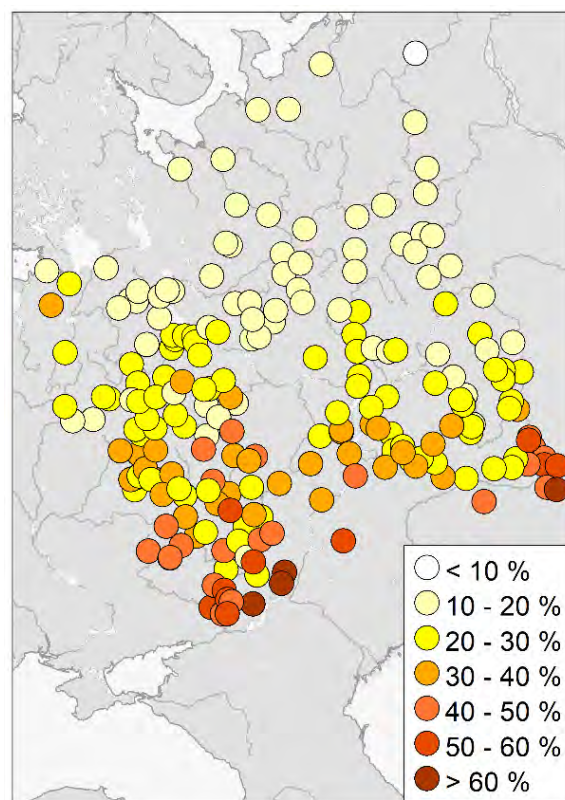


Рисунок 5.19 - Статистические оценки трехпараметрических уравнений: множественный коэффициент корреляции MR (а), абсолютная $RMSE$ (б) и нормированная $RMSE\%$ (в) величины среднеквадратической ошибки

При нормировании на среднее значение стока половодья картина распределения ошибок существенно меняется. Область наилучшего соответствия стока, описываемого статистическими уравнениями вида E_best смещается на север в бассейны рр. Пинега и Мезень. От нее на юг идет увеличение относительной ошибки $RMSE\%$ с максимумом в бассейнах Нижнего Дона, Нижней Волги и левобережного Урала (свыше 70 % для рр. Черная, Тишанка, Иловля, Паньшинка, Есауловский Аксай и Большой Караман). Наиболее резкий рост $RMSE\%$ приходится на зону недостаточного увлажнения и повышенной проницаемости почв.

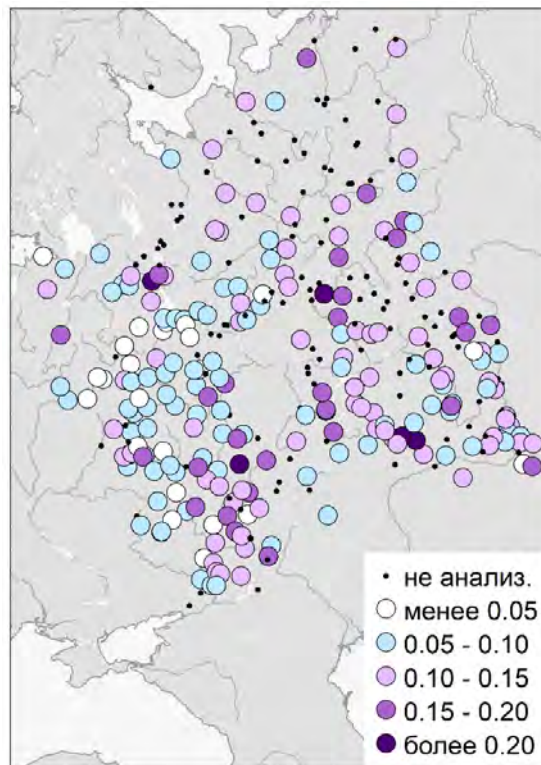
Преимущество статистического подхода над квазиводнобалансовым при описании стока половодья оценено также по полученному набору трехпараметрических уравнений. В качестве квазиводнобалансового выбиралось лучшее уравнение по MR и $RMSE$, содержащее запас воды в снеге группы $F-1$, глубину промерзания группы $F-5$ и влажность почвы групп $F-14 - F-17$. Анализ проводился для разницы множественных коэффициентов корреляции dMR , разницы среднеквадратических ошибок $dRMSE$ и их нормированных на слой стока значений $dRMSE\%$ (Рисунок 5.20).

Статистические уравнения вида E_best по тесноте связи MR в среднем на 0.1–0.2 превосходят квазиводнобалансовые. Пространственная картина распределений превышений dMR схожа с распределением доминирующего вида приходной составляющей (Рисунок 5.13а) и согласуются с результатами анализа парных связей стока с приходными компонентами (Рисунок 4.2).

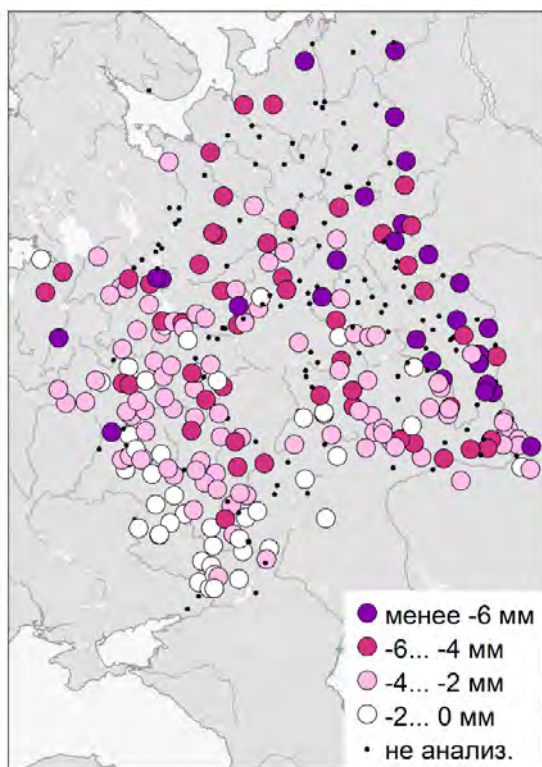
Величина $dRMSE$ по аналогии с (Рисунок 5.19) возрастает с юго-запада на восток и северо-восток (Рисунок 5.20б). В среднем статистический подход снижает среднеквадратическую ошибку на 3.7 мм, а в горных районах – на 6 мм и более. Нормирование этого результата на среднее значение стока $dRMSE\%$ показывает, что улучшение составляет в среднем 5 %. В зоне недостаточного увлажнения ошибка снижается до 10–15 %, то есть именно там, где на современном этапе наблюдаются наибольшие изменения условий зимы и весны, а, следовательно, и условий формирования половодья.

Устойчивость состава уравнений вида E_best определяется стационарностью и однородностью рядов, наличием лет с выдающимися значениями гидрометеорологических характеристик или их многолетних группировок. Однако, если в случае с квазиводнобалансовыми уравнениями речь идет об изменении множественного коэффициента корреляции MR и среднеквадратической ошибки $RMSE$, то в статистических уравнениях возможна и смена состава и рангов входящих характеристик. Подобная динамика показана на примере р. Дон у г. Задонск, р. Вятка у г. Киров и р. Онега у д. Череповская в период с 1950 по 2017 гг. с 38-летним скользящим осреднением (Рисунок 5.21).

а)



б)



в)

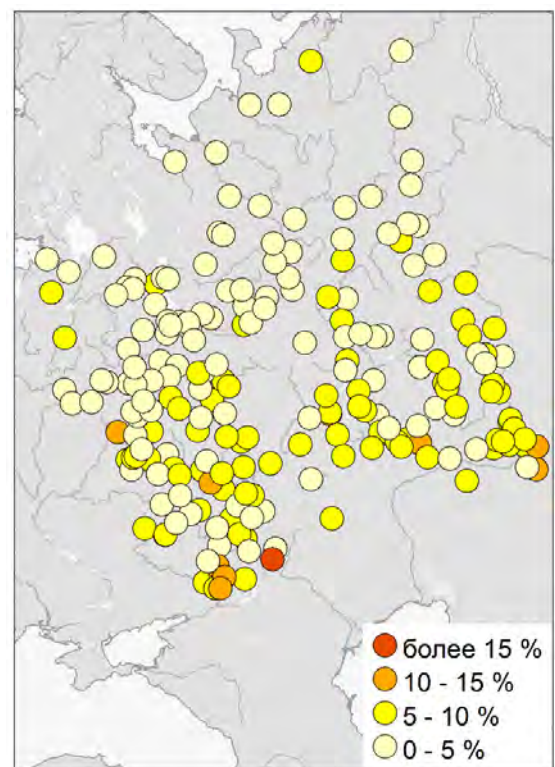
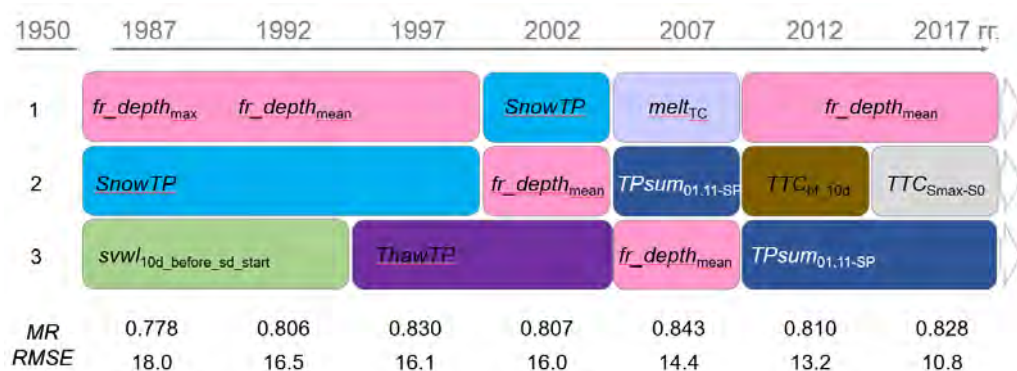
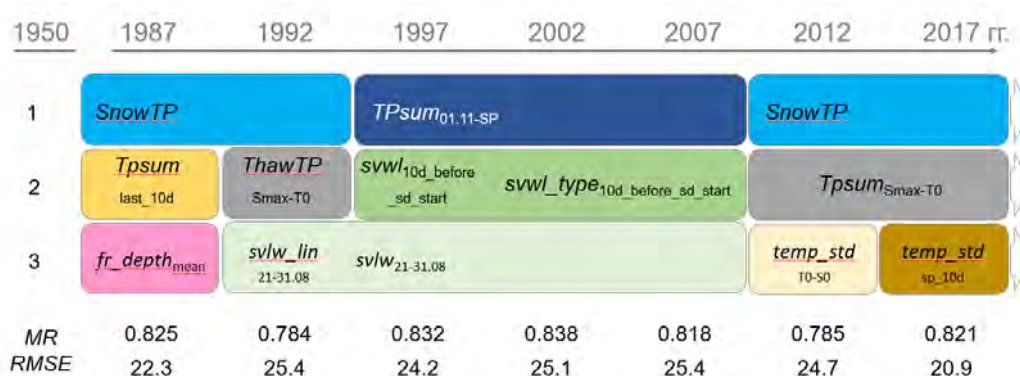


Рисунок 5.20 – Превышение статистических параметров трехпараметрических уравнений вида E_{best} над соответствующими для воднобалансовых уравнений: отклонение по коэффициенту корреляции dMR (а), абсолютной $dRMSE$ (б) и нормированной $dRMSE\%$ (в) величин среднеквадратической ошибки

а)



б)



в)

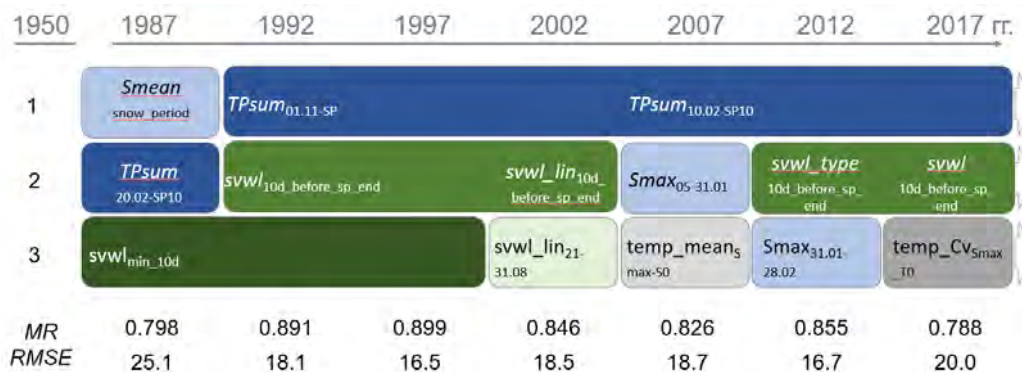


Рисунок 5.21 – Оценка устойчивости статистических уравнений для р. Дон у г. Задонск (а), р. Вятка у г. Киров (б) и р. Онега у д. Череповская (в) для скользящих 38-летних периодов (1950–1987, 1955–1992, 1960–1997, 1965–2002, 1970–2007, 1975–2012 и 1980–2017 гг.).

По вертикали – ФФС-1, ФФС-2 и ФФС-3 в уравнениях E_best , цветными прямоугольниками соответствующие им группы характеристик

На примере р. Дон показана устойчивость ФФС-1 и ФФС-2 в первые три анализируемые периода, а ФФС-3 – первые два (Рисунок 5.21а). Здесь следует обратить внимание, что глубина промерзания почвы выступает средней за период, а не ее максимальным значением, как это принято в представлениях XX в. Далее на фоне изменения климата и развития аномально

продолжительного маловодного периода началось изменение рангов факторов: глубина промерзания почвы в период 1965–2007 гг. была второстепенным и третьестепенным факторами. Также в последние десятилетия среди первых трех факторов появлялись трендовые коэффициенты скорости таяния снежного покрова и температуры воздуха, а также сумма осадков за зимний период.

Сравнительно устойчивым в период 1960–2007 гг. был состав уравнения E_{best} для р. Вятка у г. Киров, позже устойчивостью характеризовались ФФС-1 и ФФС-2 (Рисунок 5.21б). В последние десятилетия, как и для Верхнего Дона, в составе уравнения появляются факторы весенних условий – стандартное отклонение для температуры воздуха за периоды активного снеготаяния (группа $F-8$) и первых 10 дней весны (группа $F-11$). Характеристики конца зимы также появляются в последние годы и для наиболее устойчивых по составу уравнений для р. Онега у д. Череповская – влажность почвы до схода снежного покрова и коэффициент вариации температуры воздуха от даты накопления максимального запаса воды в снежном покрове до перехода температуры воздуха через 0 °С.

Не во всех случаях при смене состава уравнений вида E_{best} следует говорить о снижении тесноты связи по MR и $RMSE$ для заданного набора предикторов. При рассмотрении нового периода возможно обнаружение новой комбинации факторов, более тесно связанных со стоком воды за половодье, в то время как величины MR и $RMSE$ для прежнего уравнения практически не меняются. Все это указывает на необходимость регулярного уточнения состава предикторов уравнений в условиях изменения климата.

5.2.10. Основные выводы по анализу статистических уравнений

Результаты пространственного и статистического анализа трехпараметрических уравнений вида E_{best} для 348 гидрологических постов в пределах ЕТР показывают следующее:

- 1) статистический подход при описании слоя стока половодья качественным образом дополняет квазиводобалансовый, повышая тесноту связей, что показано на уровне двухпараметрических и трехпараметрических уравнений;
- 2) факторный и групповой состав статистических уравнений для стока половодья нестабилен даже в пределах разных постов одной реки. Это подтверждается не только анализом уравнений, но и вкладов в дисперсию слоя стока отдельных факторов, например, влажности почвы и глубины промерзания;
- 3) единый ФФС-1 половодья для ЕТР отсутствует. В зависимости от географического положения он может различаться по роли в водном балансе, типу и времени воздействия.
- 4) более чем для 60 % водосборов ФФС-1 выражен приходными и перераспределяющими факторами; запасом воды в снежном покрове, осадками общими, твердыми и жидкими. Эти водосборы расположены к северу от 53° с.ш. на западе и 55° с.ш.

на востоке. Наиболее часто приходная составляющая выражена суммой осадков. Всего в рамках выборки осадки выступают главным фактором для половины водосборов;

5) к югу от 53° с.ш. на западе и 55° с.ш. на востоке расположена область, в пределах которой условия водоподачи на водосборах в весенний период объясняют большую дисперсию слоя стока весеннего половодья, нежели объем водоподачи. К этой области относится 40 % водосборов выборки. В качестве ФФС-1 в ней выступают исключительно перераспределяющие факторы: влажность почвы, температура воздуха, глубина промерзания, скорость таяния, сроки, продолжительность и количество гидрометеорологических явлений;

6) запас воды в снежном покрове вносит наибольший вклад в объяснение наблюдаемой дисперсии слоя стока воды весеннего половодья для 10 % водосборов. В ряде случаев наравне с его максимальным за зиму значением высокой значимостью характеризуются максимальные 10-дневные и средние за расчетный период запасы воды в снежном покрове;

7) по данным реанализа ERA5 роль промерзания почвы как распространенного фактора не подтверждается. Как фактор оно входит менее чем в 7 % уравнений, в основном, в бассейнах Верхней Оки, Дона и Суры. Наравне с ее значениями за фиксированные сроки, значимая роль диагностирована для средней за зиму глубины промерзания почвы;

8) ФФС-2 характеризуется пестрой пространственной картиной. Он представлен по 10–14 % характеристиками групп *F-16*, *F-2* и *F-4*, по 5–8 % – характеристиками групп *F-15*, *F-14*, *F-13*, *F-17*, *F-6* и *F-3*. По физическому смыслу практически в 30 % случаев он представлен влажностью почвы, в 14–16 % случаев – суммой осадков и температурой воздуха (группы и физические типы перечислены в порядке уменьшения количества случаев). В бассейнах рр. Кама, Урал Волга выше впадения р. Унжа и на реках северо-запада на позиции ФФС-2 преобладают характеристики влажности почвы, в бассейнах р. Ока и Верхнего Дона – температуры воздуха, а в бассейнах рр. Северная Двина и Вятка – суммы осадков за зиму;

9) ФФС-3 также характеризуется пестрым пространственным распределением. В групповом отношении он представлен характеристиками групп *F-3* и *F-16* – по 15 % случаев, и характеристиками групп *F-14*, *F-6*, *F-7*, *F-8*, *F-9* и *F-17* – по 5–7 % случаев. По физическому смыслу практически в 30 % случаев он представлен температурой воздуха, в 26 % – влажностью почвы, в 10 % – продолжительностью явлений;

10) влажность почвы выступает в роли всех трех ФФС. Наибольшая ее значимость достигается в зоне недостаточного увлажнения в бассейнах Дона, Нижней Волги, Белой и Урала. Самой распространенной является влажность почвы перед окончанием зимы;

11) температура воздуха как ФФС половодья повышает свою значимость и ранг с севера на юг ЕТР;

12) исключение аazonальных рек не снижает пестроты получаемых пространственных

распределений ФФС разных рангов;

13) характеристики периода перехода от зимы к весне ($F-6 - F-12$) встречаются во всех рангах, занимая для каждой группы небольшую долю случаев. Суммарно они выступают ФФС-1 в 10% случаев, ФФС-2 – в 24 % случаев, а ФФС-3 – 37 % случаев;

14) уравнения вида E_best требуют регулярной актуализации в условиях изменения климата.

Важным результатом следует считать отсутствие устойчивого набора ФФС в уравнениях вида E_best в пределах одного речного бассейна, что указывает на высокую значимость локальных особенностей формирования стока даже для зональных рек в выбранный период времени. Тем не менее, как говорилось выше, можно выделить наиболее часто распространенные группы и типы характеристик по физическому смыслу (Рисунок 5.5, Рисунок 5.6, Рисунок 5.8, Рисунок 5.9, Рисунок 5.11, Рисунок 5.12).

Все полученные выводы получены на основе анализа стационарных данных о стоке воды в период весеннего половодья, метеорологических и агрометеорологических данных, рассчитанных по реанализу ERA5. При замене последних на стационарные и экспедиционные материалы результаты могут измениться. Тем не менее, они согласуются друг с другом, что может быть показано на примере анализа многолетней динамики тесноты связи стока за половодье с запасом воды в снежном покрове в пределах бассейна р. Дон по данным снегомерных маршрутов (рис. 5.22) [Варенцова и др., 2020]. Установлено, что за истекшие полвека произошло существенное снижение их коэффициента корреляции в пределах Верхнего и частично Среднего Дона, а также среднего течения р. Северский Донец. При этом выявлен рост тесноты связи в бассейнах рр. Медведица и Иловля.

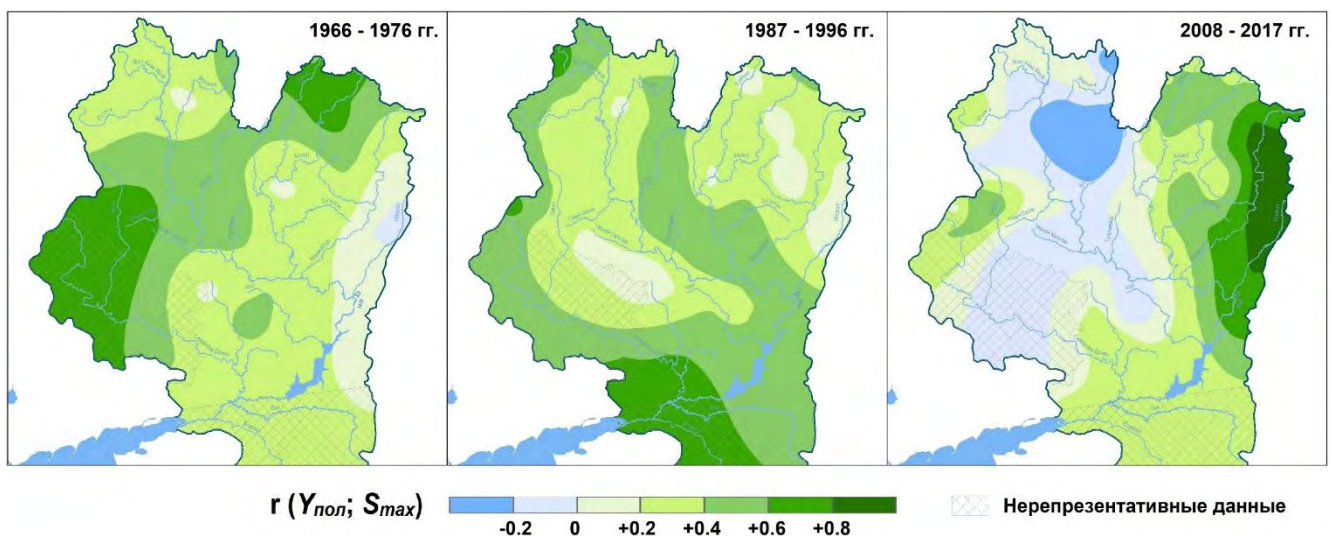


Рисунок 5.22 – Пространственное распределение коэффициента корреляции между слоем стока за весеннее половодье и максимальным запасом воды в снежном покрове по данным снегомерных маршрутов [Варенцова и др., 2020]

5.3. Масштабные эффекты факторов формирования стока на примере рек ЕТР

Статистический подход позволяет проверить гипотезу об устойчивости величины вклада ФФС в дисперсию стока половодья в пределах одной реки. В рамках имеющейся выборки взяты 124 гидропоста в пределах 48 рек (от 2 до 6 гидропостов на реке) и проанализирована устойчивость ФФС в уравнениях вида E_{best} .

Полностью стабильного состава уравнений сверху вниз по течению не диагностировано ни для одной реки. Для всех рек отмечается смена характеристики внутри группы при сохранении ранга, смена характеристики и группы при сохранении ранга, смена ранга при сохранении характеристики и группы, а также полная смена состава ведущих факторов.

Наименьшие изменения наблюдаются для р. Пинега: для ФФС-2 сокращается на 10 дней период оценки влияющих сумм осадков. На рр. Северная Двина, Юг и Вага наблюдается смена группы ФФС-3 при постоянстве первых двух (Рисунок 5.23, Приложение Г). За исключением р. Юг

у с. Подосиновец это характеристики окончания зимнего периода. Для 13 рек (Клязьма, Молома, Сухона, Сысола, Мезень, Вашка, Печора, Ижма, Унжа, Кама, Иньва, Быстрый Танып и Иловля) и 6 участков (рр. Сакмара, Ока, Днепр, Вятка, Юрюзань, Уфа) главный ФФС половодья – сумма осадков за зимний период $TPsum_{01.11-SP}$ и сумма осадков, выпавших при отрицательных температурах, $SnowTP$ – характеризуется повышенной устойчивостью (Рисунок 5.23, Рисунок 5.24, Рисунок 5.25).

Для остальных рек установлена смена факторов внутри групп или вне их. Закономерность их смены при нарастании площади водосбора отсутствует. Предположительно, она связана с факторами, доминирующими в районе расположения речного створа. Например, для верховьев Оки среди двух главенствующих факторов присутствует глубина промерзания почвы, которая ниже г. Калуга сменяется устойчивой связью стока половодья с влажностью почвы.

Отсутствует закономерность для динамики тесноты связи для факторов разных рангов при увеличении площади водосбора. Так, для рр. Урал, Северная Двина, Пинега, Вашка, Ижма, Унжа, Межа, Ворона и Иловля вклад ФФС-3 в нижнем течении снижается в сравнении с верхнем. Наоборот, для рр. Онега, Сухона, Мезень, Жиздра, Зуша, Сура, Иньва, Уфа, Молома, Чепца, происходит увеличение его значимости. На рр. Печора, Ока, Белая, Дон, Хопер и Медведица изменения носят разнонаправленный характер. Аналогичная ситуация получена и для главного и второстепенного факторов.

Не прослеживаются закономерности и относительно природных зон.

Причин полученных выводов может быть сразу несколько. Первая – особенность статистического подхода, на результаты которого могут оказывать существенное влияние близкие

по величине коэффициенты корреляции со стоком для смежных или близких по смыслу характеристик. Во-вторых, полизональные реки так или иначе испытывают на себе влияние той зоны, где расположен створ. Поэтому и набор факторов может стремиться к характерному для района. В-третьих, антропогенное влияние, как правило, нарушает физические закономерности.

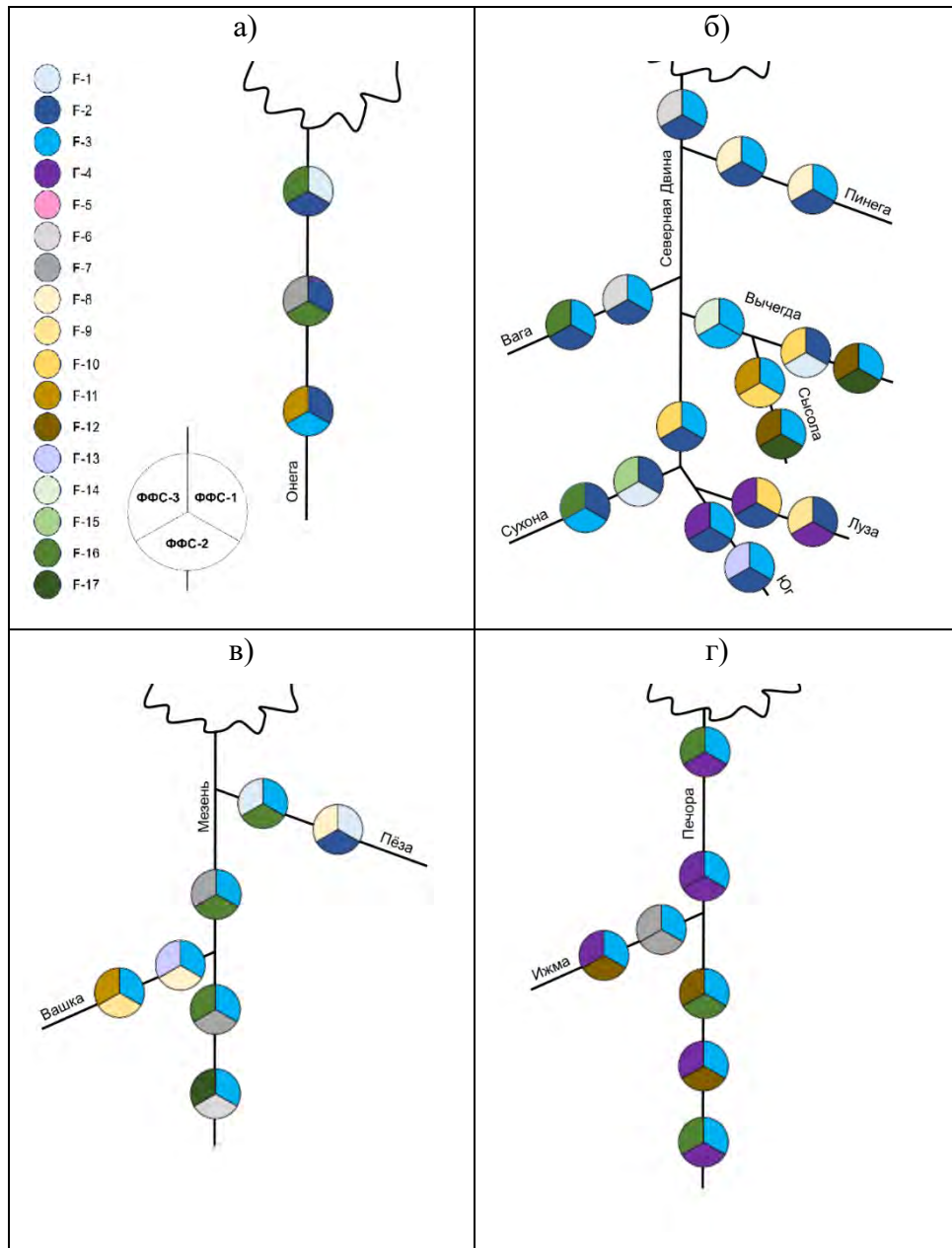


Рисунок 5.23 – Проявление масштабных эффектов на реках севера ЕТР

Следует отметить, что не все уравнения существенным образом отличаются от разработанных в течение XX в. Это указывает одновременно на надежность полученных результатов и полученных физико-статистических (воднобалансовых) зависимостей, используемых в оперативной практике Росгидромета. В то же время, это подтверждает существенную подверженность процесса формирования стока половодья климатическим и

антропогенным изменениям конца XX в. – начала XXI в.

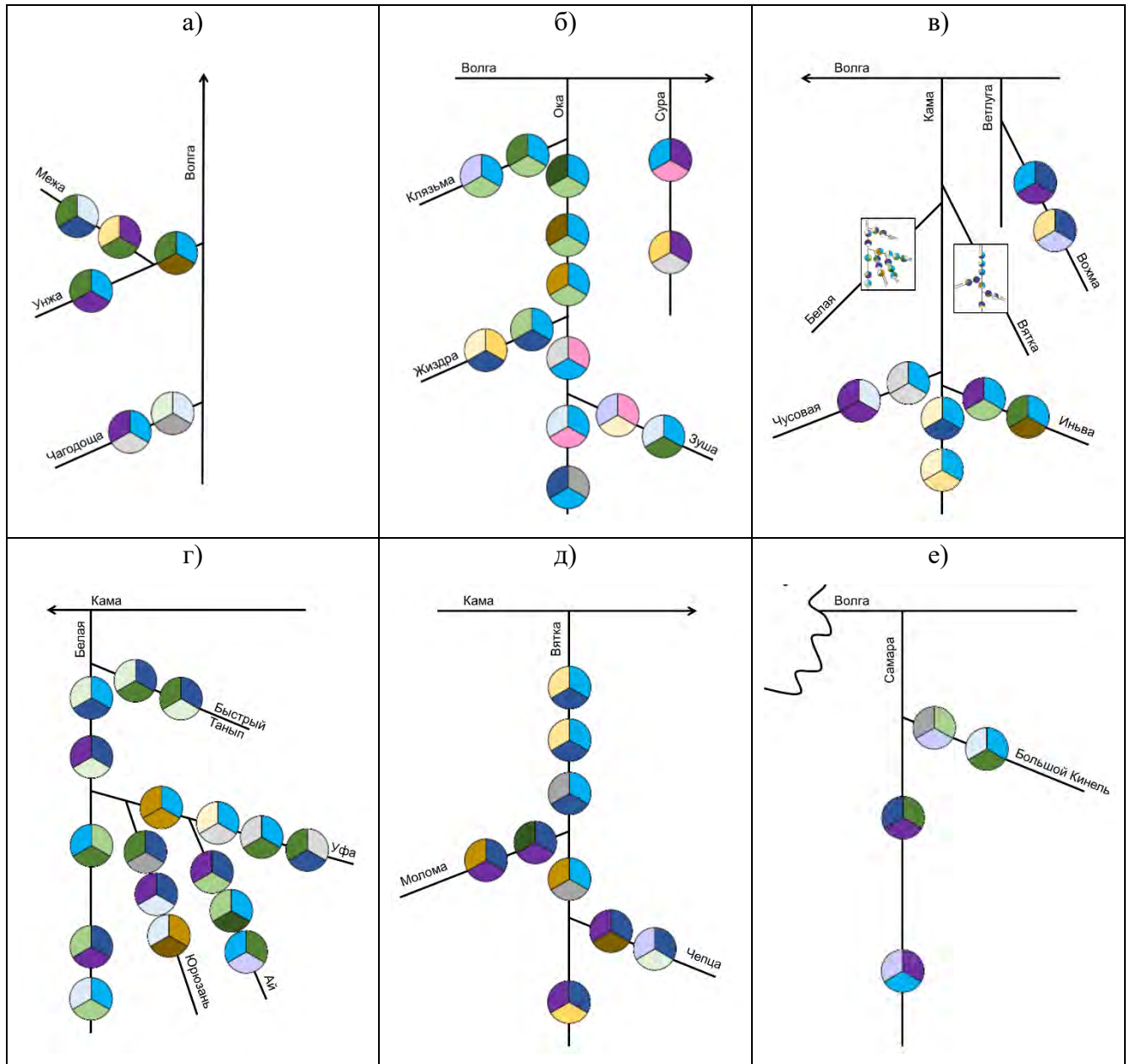


Рисунок 5.24 – Проявление масштабных эффектов на реках бассейна Волги. Врезки схем на (в) соответствуют (г) и (д). Обозначения аналогичны Рисунок 5.23

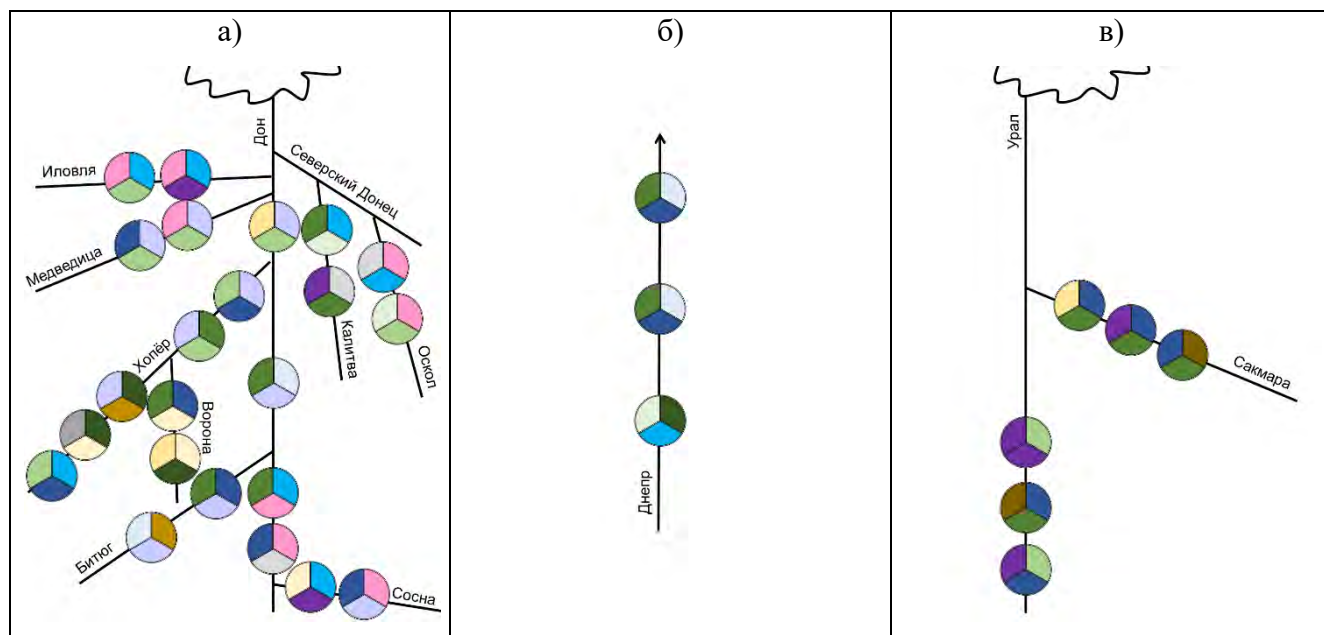


Рисунок 5.25 – Схемы проявления масштабных эффектов на реках бассейнов Дона (а), Днепра (б) и Урала (в). Обозначения аналогичны Рисунок 5.23

ГЛАВА 6. РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ УРАВНЕНИЙ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ПОЛОЖЕНЫ В ОСНОВУ УТОЧНЯЮЩИХ ПРОГНОЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Обновление прогнозных зависимостей является одной из наиболее острых потребностей в современной оперативной работе региональных подразделений Росгидромета. Поиск основных определяющих факторов, влияющих на формирование весеннего половодья в современных гидрометеорологических условиях, имеет как научную, так и практическую значимость, даже в случае использования методов физико-математического моделирования для дальнейшего выпуска прогноза. Понимание механизма формирования половодья на зональном, региональном и локальном уровнях поможет создать актуальную методологическую концепцию для совершенствования прогнозных подходов с помощью самых разнообразных подходов. Кроме того, картографическое обобщение в рамках всей территории Европейской России позволит понять, каким образом трансформировались стокоформирующие процессы в разных частях региона и как это повлияло на географию и вариативность однородных гидрологических районов с точки зрения формирования половодья.

В рамках данной главы результаты, полученные в предыдущих частях работы, объединены в виде районирования, целью которого является визуализация основных рекомендаций по поиску оптимальных трёхпараметрических статистических уравнений, которые в дальнейшем могут быть положены в основу основных или уточняющих прогнозов, а также могут использоваться в качестве дополнения к традиционным схемам или результатам математического моделирования.

Концепция создания данного районирования соответствует разработанным ранее подходам, предложенным в рамках запуска веб-портала «Водный режим рек ЕТР» [www.autolab.geogr.msu.ru/water-regime-etr/index.html; Фролова и др., 2020; Фролова и др., 2024].

Районирование создавалось на основе «послойного анализа первого, второго и третьего определяющего фактора в трехпараметрическом уравнении. Было принято решение визуализировать этот подход в виде создания псевдо-формулы, позволяющей расшифровать основные компоненты уравнения. Основной фактор выражен заглавной римской цифрой, второй член трехпараметрического уравнения – арабской цифрой в верхнем углу, рекомендованные третьи факторы перечислены в порядке убывания частоты их появления слева направо. Таким образом каждый район имеет уникальную формулу, соответствующую основным факторам формирования половодья (Рисунок 6.1).

По главному фактору из статистических зависимостей ФФС-1 в пределах исследуемой территории было выделено 11 районов (Рисунок 6.2) и 25 районов в их пределах –

по второстепенному фактору ФФС-2. По третьему фактору ФФС-3 выделение районов в рамках выбранного экспертного подхода считается нецелесообразным в силу высокой пестроты поля. Перечисление факторов в данной главе производится, как правило, в порядке уменьшения числа случаев появления в выборке.

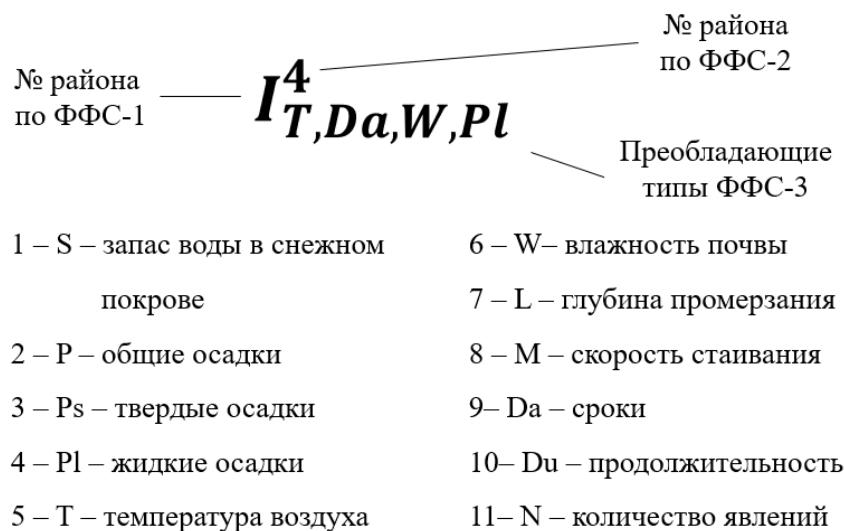


Рисунок 6.1 – Расшифровка индексов предлагаемого районирования

Полученная карта может быть сопоставлена с ранее опубликованными наработками, в том числе 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.

Граница 5-го типа водного режима (далее – ТВР) проходит практически по южной границе II района по ФФС-1, за исключением II⁶, распространяющегося на юг. Наиболее северо-восточный 6-й ТВР соответствует подрайону I⁴ (Рисунок 6.3).

В целом можно отметить, что самый разнообразный 4-й ТВР имеет свое отражение на карте ФФС (Рисунок 6.2). Именно эта субширотная полоса отличается большим многообразием подрайонов по главным 1-му и 2-му фактору формирования половодья (III-X, за исключением I). Скорее всего, именно в этой зоне из-за разницы в геологическом строении, рельефе, почве и континентальности климатические изменения по-разному повлияли на водный режим рек, особенно весной. Эта же территория имеет наиболее высокий коэффициент трансформации водного режима – от 30 до 50, а порой и более.

Третий тип водного режима, наиболее южный, соответствует V и XI районам, здесь трансформация водного режима чуть ниже, в основном 30–40. В этой зоне главными факторами формирования стока выступают температуры воздуха и скорость таяния снежного покрова. То есть здесь характер водного режима связан напрямую с типом весны (дружная или затяжная),

что хорошо соответствует опубликованным ранее тенденциям в динамики климата на юге России.

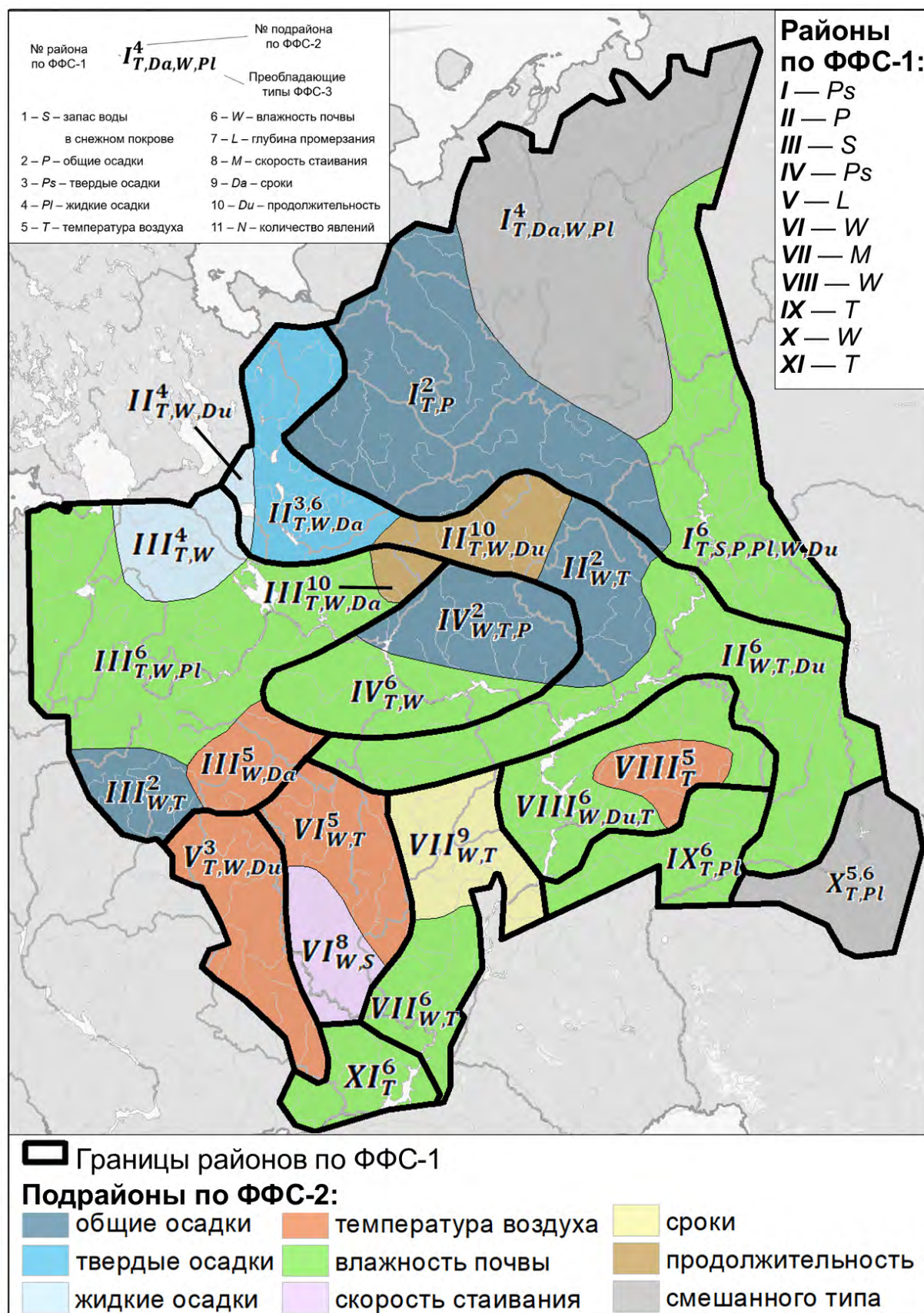


Рисунок 6.2 – Крупномасштабное районирование ЕТР по факторам формирования слоя стока половодья на основе анализа статистических уравнений

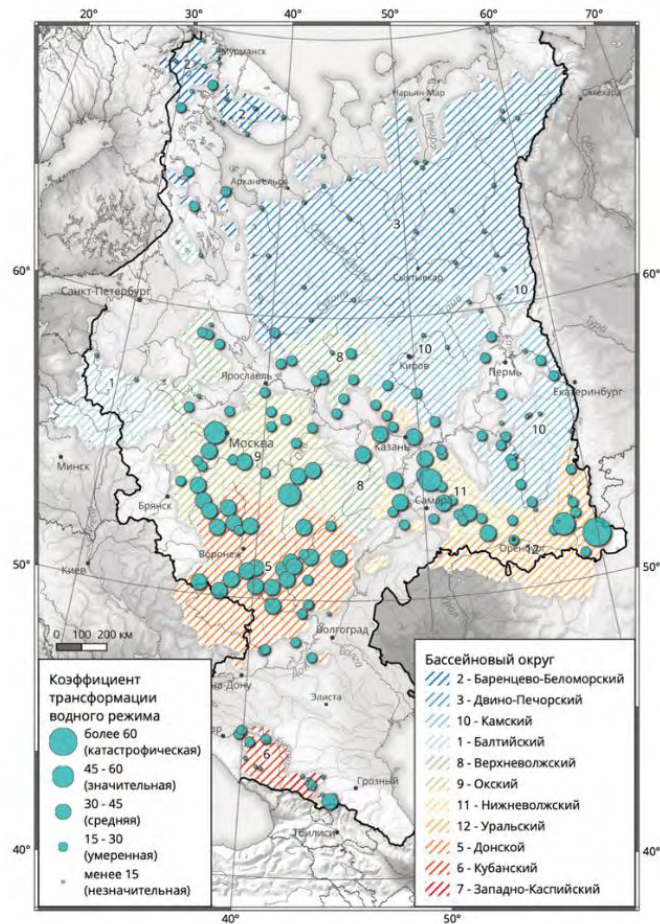


Рисунок 6.3 – Трансформация водного режима [Фролова и др., 2020]

Ниже приводится более подробное описание выделенных районов.

Район I охватывает водосборы рр. Печора, Мезень, Северная Двина (за исключением верхней половины бассейнов рр. Сухона, Юг и Луза, а также р. Емца), Волошка и Лепша (притоки р. Онега), Кама до слияния с р. Чусовая включая ее и верховья р. Уфа. С общегеографической точки зрения данный район охватывает большую часть Русского Севера, где климатические изменения проявляются наиболее слабым образом и коэффициент трансформации водного режима не превышает 10. Этот район соответствует 5-му и 6-му ТВР [Фролова и др., 2020]. Граница I района четко совпадает с распространением песков (> 40 % в гранулометрическом составе), а также привязана к рельефу, проходя сначала по водоразделу Онеги и Северной Двины (Онежская гряда), затем – по Северным Увалам, по Верхнекамской возвышенности (водораздел Камы и Чепцы) и на юге – по Тулвинской возвышенности до границы РФ.

В 82 % случаев главным фактором в регрессионном уравнении здесь выступают твердые осадки группы *F-3*. Кроме того, в 7 % случаев ФФС-1 представлен запасом воды в снежном покрове группы *F-1*, а в 5 % – общими осадками группы *F-2*. Единичны случаи главенствования жидких осадков, температуры воздуха и влажности почвы. Район I включает в себя 3 подрайона.

Подрайон $I_{T,Da,W,Pl}^4$. В нем второстепенными факторами ФФС-2 выступают жидкие осадки (23 % случаев), общие осадки, температура воздуха, продолжительность и сроки явлений (по 14 % случаев), а также влажность почвы, скорость таяния и запас воды в снежном покрове. Третий фактор ФФС-3 представлен температурой воздуха (36 % случаев), сроками явлений (18 % случаев), влажностью почвы и жидкими осадками (по 14 % случаев), общими осадками и количеством явлений. С географической точки зрения этот район соответствует Большеземельской тундре и отделяется с юга Тиманский кряжем.

Подрайон $I_{T,S,P,Pl,W,Du}^6$. Второстепенным фактором здесь выступает влажность почвы (53 % случаев), общие осадки (18 % случаев), жидкие осадки (12 % случаев), а также запас воды в снежном покрове, твердые осадки и продолжительность явлений. Третий фактор ФФС-3 представлен температурой воздуха (29 % случаев), запасом воды в снежном покрове, общими осадками, твердыми и жидкими осадками, влажностью почв и продолжительностью явлений (примерно по 12 % случаев). Этот район соответствует наветренному макросклону Приполярного, Северного и Среднего Урала, а его западная граница проходит по долине р.Печоры, а затем по Верхнекамской возвышенности.

Подрайон $I_{T,P}^2$. Основной второстепенный фактор здесь представлен общими осадками (63 % случаев). Также в роли ФФС-2 встречаются жидкие осадки (11 % случаев), влажность почвы и температура воздуха (по 7 % случаев), запас воды в снежном покрове, твердые осадки и сроки явлений. Температура воздуха выступает здесь наиболее часто встречающимся третьим фактором формирования стока ФФС-3 (44 % случаев). Также ФФС-3 представлен влажностью почвы (22 % случаев), сроками явлений, скоростью таяния и продолжительностью явлений, общими и жидкими осадками (по 3–7 % случаев). Район охватывает обширные равнинные пространства бассейна Северной Двины и Мезени.

Район II охватывает водосборы рр. Емца, Онега, Шексна, верхней половины бассейнов рр. Сухона, Юг и Луза, Средней Камы, Верхней Вятки, большей части бассейна р. Белая, верхнего течения р. Урал и его правобережной части водосбора в среднем течении. Кроме того, к нему относятся водосборы к западу от Средней Волги между 54 и 56° с.ш. до Московско-Клязьминского междуречья. В 64 % случаев главным ФФС весеннего половодья здесь выступает сумма осадков за зимний период или его часть. В 9 % случаев главный фактор представлен суммой твердых осадков, по 6 % – температурой воздуха и влажностью почвы. В единичных случаях в этой роли выступает продолжительность явлений, запас воды в снежном покрове, жидкие осадки, сроки и количество явлений. Южная физико-географическая граница этого района – кряж Ветряный Пояс на северо-западе, затем Андомская возвышенность, Белозерская и Андогская гряды, водораздел Сухоны и Костромы, и затем Унжи. Далее граница

уходит чуть южнее и проходит по Вятскому Увалу. Затем район уходит в две стороны – на Запад, по макродолине Камы и Волги, что соответствует зоне слаборасчлененных возвышенностей на геоморфологической карте, и на юго-восток – охватывая весь Южный Урал. С точки зрения гранулометрического состава, в этом районе все еще в основном преобладают пески, содержание которых составляет 20–40 %. Примечательно, что к району относится практически весь Южный Урал с его интенсивным распространением карста, но ни на одном из анализируемых уровней он не выделяется в обособленную область.

Подрайон $II_{W,T,Du}^6$. Преобладающим второстепенным фактором здесь выступает влажность почвы (52 % случаев). Примерно по 10 % случаев соответствует запасу воды в снежном покрове, температуре воздуха и продолжительности явлений. Еще реже встречаются в роли ФФС-2 общие и жидкие осадки, скорость таяния, твердые осадки и сроки явлений. Третьестепенным фактором выступают влажность почвы (44 % случаев), температура воздуха (37 % случаев) и продолжительность явлений (33 % случаев). Гораздо реже роль ФФС-3 играют скорость таяния и сроки (по 11 % случаев), общие и жидкие осадки, количество явлений. Этот район охватывает Южный Урал и всю макродолину Камы и Волги в районе их слияния. С геоморфологической точки зрения – это сглаженные формы возвышенностей и горных стран.

Подрайон $II_{T,W,Du}^4$. В 75 % случаев в роли ФФС-2 здесь выступают жидкие осадки, в остальных – температура воздуха. Доминирующий по значимости третий фактор отсутствует: он представлен в равном количестве жидкими осадками, влажностью почв, температурой воздуха и продолжительностью явлений. Этот небольшой подрайон соответствует водосбору оз. Белое, окруженному со всех сторон грядами, перехватывающими осадки теплых воздушных масс.

Подрайон $II_{W,T}^2$. В роли главного второстепенного фактора с небольшим перевесом выступают общие осадки (29 % случаев). Чуть реже встречаются температура воздуха и влажность почвы (по 21 % случаев), запас воды в снежном покрове, скорость таяния и сроки явлений. Наиболее часто в роли ФФС-3 выступают влажность почвы (50 % случаев) и температура воздуха (43 % случаев), а в 7 % – количество явлений. Этот регион охватывает Верхнекамскую возвышенность, включая бассейн Вятки и ее притока Чепцы.

Подрайон $II_{T,W,Du}^{10}$. В подавляющем большинстве случаев (75 %) ФФС-2 в районе представлен продолжительностью явления, в остальных – температурой воздуха и продолжительностью явлений. Фактор третьего ранга представлен, как правило, температурой воздуха, влажностью почвы и продолжительностью явлений (по 25 % случаев), а также общими и жидкими осадками. Этот район соответствует центральной части Северных Увалов.

Подрайон $II_{T,W,Da}^{3,6}$. Влажность почвы и твердые осадки здесь выступают основным второстепенным фактором – по 33 % случаев. Кроме них встречаются общие осадки и запас воды

в снежном покрове. В роли ФФС-2 чаще других выступает температура воздуха (33 % случаев), влажность почвы и сроки явлений (по 22 % случаев). Единичны случаи, когда третий ранг имеют жидкие осадки и продолжительность явлений. Этот район в рельефе соответствует низменным равнинам, перемежающимся несколькими возвышенностями (Галичская, Харовская, Верхневажская, Конощская, Няндомская).

Район III охватывает западный сектор ЕТР, включая в себя реки Балтийского бассейна, Верхней Волги, Верхней Оки от впадения р. Упа до р. Москва, Верхнего Днепра и р. Десна. В 42 % случаев главным ФФС весеннего половодья здесь выступает запас воды в снежном покрове, в 22 % случаев – сумма твердых осадков за различные периоды и по 10 % случаев – сумма осадков, сумма жидких осадков и влажность почвы. В отдельных случаях в этой роли выступают сроки и продолжительность явлений, а также температура воздуха.

Граница района проходит по западной периферии возвышенностей – Валдайской, Смоленско-Московской и Среднерусской. Район включает в себя как низменности (бассейн Волхва, Рыбинского вдхр., так и все перечисленные возвышенности, обладает разнообразной литологией, что отражается в пестроте подрайонов.

Подрайон III_{T,W,PI}⁶. Наиболее распространенным второстепенным фактором ФФС-2 здесь выступает влажность почвы (48 % случаев). В ряде случаев он представлен скоростью таяния (14 % случаев), температурой воздуха, жидкими осадками и продолжительностью явлений, общими и твердыми осадками, глубиной промерзания и сроками явлений. Наиболее распространенный фактор третьего ранга – температура воздуха (31 % случаев). Кроме нее он представлен влажностью почвы (21 % случаев), жидкими осадками (17 % случаев), сроками явлений (10 % случаев), твердыми осадками и продолжительностью явлений, скоростью таяния и количеством явлений. Этот подрайон охватывает большую часть III района и соответствует низменным равнинам в бассейнах озера Ильмень и Рыбинского водохранилища.

Подрайон III_{T,W}⁴. Жидкие осадки преобладают на позиции второстепенного фактора в данном подрайоне – 50 % случаев. В остальных случаях ФФС-2 представлен общими осадками и влажностью почвы. В роли ФФС-3 выступают температура воздуха (38 % случаев) и влажность почвы (25 % случаев). Единичны случаи, когда роль ФФС-3 выполняют общие и жидкие осадки, продолжительность явлений. Этот подрайон четко соответствует границам Тихвинской гряды.

Подрайон III_{W,T}². Общие осадки играют второстепенную роль в подрайоне на подавляющем большинстве рек (80 % случаев). Оставшиеся 20 % относятся к продолжительности явлений. Большей изменчивостью характеризуется ФФС-3: в 60 % случаев он описывается влажностью почвы, в 40 % – температурой воздуха. Этот район соответствует наветренному склону Смоленско-Московской гряды.

Подрайон $III_{T,W,Pa}^{10}$. В пределы подрайона попадают всего 3 гидрологических поста. Для них в 67 % случаев второстепенным фактором выступает продолжительность явлений, в 33 % – общие осадки. Среди факторов третьего ранга отсутствует доминирующий: он представлен температурой воздуха, влажностью почвы и сроками явлений. Этот район охватывает самые верховья Унжи, Неи и Костромы, зажатых между Галичской грядой и отрогами Северных Увалов.

Подрайон $III_{W,Pa}^5$. На подавляющем большинстве рек второстепенное значение имеет температура воздуха (78 % случаев), на остальных – влажность почвы и продолжительность явлений. Факторы третьего ранга ФФС-3 имеют большую изменчивость: в 33 % случаев они представлены влажностью почвы, в 22 % - сроками явлений, в остальных – общими и твердыми осадками, температурой воздуха и продолжительностью явлений. Этот подрайон соответствует северным склонам Среднерусской возвышенности.

Район IV располагается между районами II и III в пределах нижнего течения рр. Ока и Сура, бассейна р. Клязьма и левобережной Волги от р. Унжа до р. Илеть. Здесь снова роль главного ФФС весеннего половодья отведена сумме твердых осадков за различные периоды (69 % случаев). Единичны случаи ведущей роли температуры воздуха, запаса воды в снежном покрове, жидких осадков, сроков и продолжительности явлений. С точки зрения рельефа подрайон четко соответствует субширотной макродолине Средней Волги, в геоморфологическом отношении это задровая равнина, а в геологическом – континентальные отложения плейстоцена.

Подрайон $IV_{T,W}^6$. В половине случаев в подрайоне второстепенным фактором выступает влажность почвы, реже – жидкие осадки и продолжительность явлений (по 17 % случаев), глубина промерзания и сроки явлений. Третий по значимости фактор в 57 % случаев представлен температурой воздуха, в 17 % – влажностью почвы, а также глубиной промерзания, скоростью таяния и сроками явлений. Этот подрайон соответствует подветренному правому берегу Волжской макродолины.

Подрайон $IV_{W,T,P}^2$. В подрайоне ФФС-2 в 43 % случаев описывается общими осадками, в остальных – запасом воды в снежном покрове и температурой воздуха (по 14 % случаев), глубиной промерзания, скоростью таяния, продолжительностью и сроками явлений. По ФФС-3 подрайон можно описать как смешанный: по 31 % случаев относится к температуре воздуха и влажности почвы, в 23 % случаев – к общим осадкам и в 15 % случаев – к продолжительности явлений. Этот подрайон соответствует наветренному восточному склону Волжской макродолины.

Район V охватывает преимущественно правобережную часть водосбора р. Дон в верхнем и среднем течении, верховья р. Северский Донец, а также р. Ока выше г. Белев. Главным ФФС половодья здесь выступает глубина промерзания почвы (45 % случаев). Присутствуют случаи

первенства продолжительности явлений (23 % случаев), температуры воздуха, запаса воды в снежном покрове, суммы осадков, суммы жидких осадков, а также сроков явлений. Этот район соответствует границам Среднерусской возвышенности, причем в основном ее наветренному западному макросклону, встречающему относительно теплые воздушные потоки западного переноса.

Подрайон $V_{T,W,Du}^3$. По второстепенному фактору подрайон – смешанного типа. В роли ФФС-2 здесь чаще выступают твердые осадки и температура воздуха (по 23 % случаев). Также ФФС-2 представлен влажностью почвы и скоростью таяния (по 14 % случаев), общими осадками и сроками явлений, а в единичных случаях – глубиной промерзания и продолжительностью явлений. ФФС-3 представлен температурой воздуха (27 % случаев), влажностью почвы и продолжительностью явлений (по 18 % случаев), общими осадками (14 % случаев), запасом воды в снежном покрове, а в единичных случаях – скоростью таяния, количеством и сроками явлений.

Район VI включает в себя левобережную часть Верхнего Дона, большую часть водосбора Среднего Хопра, а также правобережную часть бассейна р. Ока между р. Проня и Цна. В 43 % случаев первым фактором формирования стока весеннего половодья здесь выступает влажность почвы, в 19 % – сумма осадков за различные периоды, в 14 % – температура воздуха, в остальных – сумма твердых осадков, скорость таяния и сроки явлений.

Подрайон $VI_{W,S}^8$. Вторым по значимости фактором в подрайоне выступает скорость таяния (63 % случаев), а также запас воды в снежном покрове, влажность и глубина промерзания почвы. Более пестрая картина для ФФС-3: в 50 % случаев он описывается влажностью почвы, в 25 % случаев – запасом воды в снежном покрове, в остальных – температурой воздуха и скоростью таяния.

Подрайон $VI_{W,T}^5$. Преобладающим второстепенным фактором здесь выступает температура воздуха (54 % случаев). В остальных случаях он представлен влажностью почвы (15 % случаев), общими и твердыми осадками, скоростью таяния и сроками явлений. Схожей пестротой характеризуется третий фактор ФФС-3: 46 % относится к влажности почвы, 15 % – к температуре воздуха, остальные – к запасу воды в снежном покрове, общим и жидким осадкам, скорости таяния и продолжительности явлений.

Район VII в основном соответствует Приволжской возвышенности: он расположился между рр. Дон и Волга, включая р. Дон на участке от р. Хопер до Цимлянского вдхр., верхнее течение рр. Хопер, Сура, а также р. Большой Караман. На фоне относительно сглаженных возвышенных равнин здесь получили широкое распространение глубокие овраги и балки, а содержание песчаной фракции в почвах возрастает от 20 до 40 % и выше с севера на юг. В 45 % случаев главным ФФС половодья здесь выступает скорость таяния, в 18 % случаев –

продолжительность явлений, в остальных – температура воздуха, количество явлений и сумма твердых осадков.

Подрайон VII⁶_{W,T}. В подрайоне наиболее часто в роли ФФС-2 выступает влажность почвы (58 % случаев), хотя на отдельных реках она представлена продолжительностью явлений (17 % случаев), общими, твердыми и жидкими осадками. По фактору третьего ранга район характеризуется как смешанный: по 25 % случаев в роли ФФС-3 выступают влажность и глубина промерзания почвы, по 17 % случаев – твердые осадки и температура воздуха, в единичных случаях – запас воды в снежном покрове и продолжительность периодов.

Подрайон VII⁹_{W,T}. По второстепенному фактору ФФС-2 подрайон близок к смешанному типу: на 40 % рек он описывается сроками явлений, глубиной промерзания и скоростью таяния – по 20 % случаев, а также общими осадками и температурой воздуха. Более однородно доленое распределение для ФФС-3: на влажность почвы приходится 60 % случаев, на 15 % случаев – твердые осадки. Единичны случаи жидких осадков и сроков явлений в третьем ранге.

Район VIII в основном охватывает междуречье рр. Волга, Самара и Белая, лишь на 100–150 км простираясь на запад от р. Волга. Главным образом, он приурочен к лесостепям и типичным степям на преимущественно глинистых почвах (песчаная фракция в основном не превышает 22 %). В роли главного ФФС половодья в 59 % случаев здесь выступает влажность почвы, в 15 % случаев – сумма жидких осадков, в остальных – температура воздуха, запас воды в снежном покрове, сумма твердых осадков, скорость таяния, сроки и продолжительность явлений. Подобный набор факторов определяется, вероятнее всего, распространением термокарста.

Подрайон VIII⁶_{W,Du,T}. Второстепенным фактором здесь, как правило, выступает влажность почвы (50 % случаев). Реже – общие осадки, скорость таяния и сроки явлений (по 14 % случаев), а также жидкие осадки. Еще менее однородное распределение диагностируется для ФФС-3: в 32 % случаев он описывается влажностью почвы, в 18 % – продолжительностью периодов, в 14 % – температурой воздуха, общими и твердыми осадками в 9 % случаев, а в единичных – запасом воды в снежном покрове, жидкими осадками, глубиной промерзания почвы и количеством явлений.

Подрайон VIII⁵_T. Сравнительно однородный по второстепенному фактору подрайон: в 80 % случаев ФФС-2 описывается температурой воздуха, в 20 % случаев – твердыми осадками. Для фактора третьего ранга распределение более пестрое: на долю температуры воздуха приходится 40 % случаев, а влажность почвы, количество и продолжительность явлений описывают оставшиеся 60 %.

Район IX охватывает преимущественно верхнюю половину водосбора р. Самара и

ее окрестностей. Главную роль в формировании стока половодья здесь играет температура воздуха (63 % случаев), сумма жидких осадков (25 % случаев) и скорость таяния (12 % случаев). Скорее всего, подобный набор факторов определен исключительно редким и глубоким залеганием подземных вод, обеспечивающих большие потери при растянутом снеготаянии.

Подрайон $IX_{Т,Р}^6$. Второстепенный фактор здесь представлен влажностью почвы в 63 % случаев. Также ФФС-2 описывается твердыми осадками, температурой воздуха и продолжительностью периодов. Фактор третьего ранга, как и в большинстве подрайонов этой части ЕТР, характеризуется большей пестротой: он представлен температурой воздуха (38 % случаев), жидкими осадками (25 % случаев), запасом воды в снежном покрове, влажностью почвы и скоростью таяния.

Район X включает в себя бассейн р. Урал на участке от с. Кизильское до с. Донское, а также р. Илек. С физико-географической точки зрения он охватывает Урало-Тобольское плато, Илекское плато, Саринское плато и Орскую равнину, что коррелируют с областью распространения перекрыто-покрытых известняковых и терригенно-известняковых карстов.

Это наиболее однородный по главному фактору формирования район – в 92 % случаев ФФС-1 представлен влажностью почв, и лишь в 8 % – температурой воздуха.

Подрайон $X_{Т,Р}^{5,6}$. В противовес ФФС-1, второстепенный фактор характеризуется крайне пестрой картиной: он представлен температурой воздуха и влажностью почвы (по 23 % случаев), общими и жидкими осадками (по 15 % случаев), а также твердыми осадками, сроками и продолжительностью явлений. В то же время ФФС-3 более однозначен: в более чем половине случаев он описывается температурой воздуха, в 23 % случаев – жидкими осадками, в остальных – общими и твердыми осадками.

Район XI практически соответствует бассейну Нижнего Дона и нижнего течения р. Северский Донец – рр. Есауловский Аксай, Чир, Калитва, Кундрючья и Тузлов. Практически для всех его рек главным ФФС весеннего половодья является температура воздуха (89 % случаев). И лишь в самых верховьях р. Калитва ФФС-1 представлен запасом воды в снежном покрове. Границы района, предположительно, определяются распространением области формирования устойчивого снежного покрова.

Подрайон $XI_{Т,Р}^6$. Второстепенный фактор здесь представлен влажностью почвы в 80 % случаев, тогда как глубина промерзания и температура воздуха – единичными случаями. ФФС-3 характеризуется крайне пестрой картиной: температурой воздуха описывается 30 % случаев, запасом воды в снежном покрове, влажностью почвы и продолжительностью явлений – по 20 % случаев, скоростью таяния – 10 % случаев.

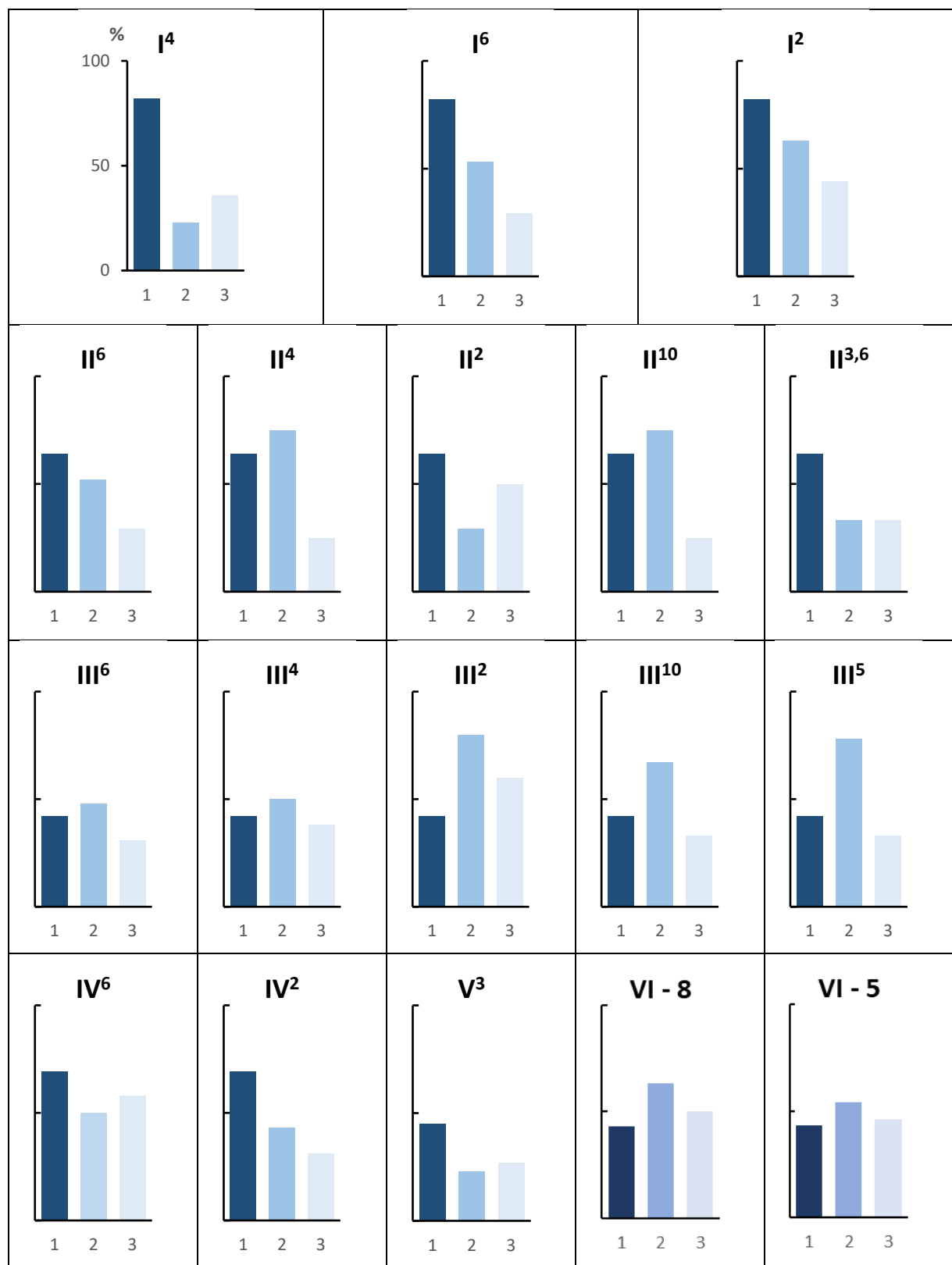


Рисунок 6.4 – Относительное распределение доминирующих типов характеристик ФФС-1 (1), ФФС-2 (2) и ФФС-3 (3) в долях от единицы для районов I - VI

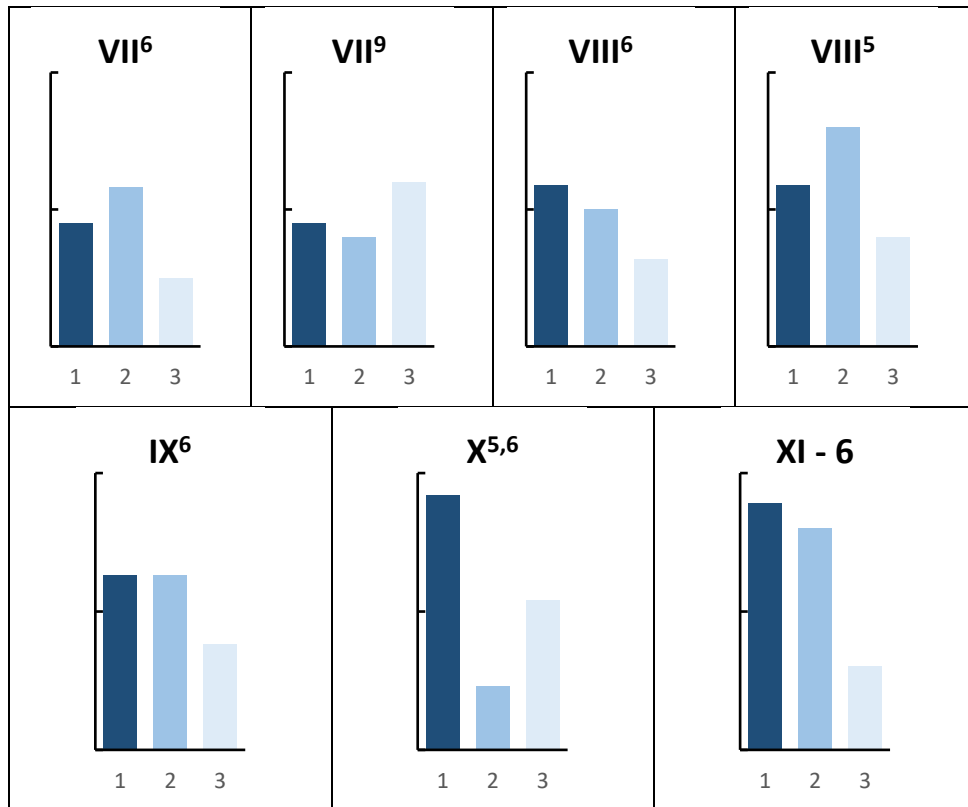


Рисунок 6.5 – Относительное распределение доминирующих типов характеристик ФФС-1 (1), ФФС-2 (2) и ФФС-3 (3) в долях от единицы для районов VII – XI

Приведенные результаты районирования показывают высокую степень изменчивости значимости главного, второстепенного и третьестепенного ФФС весеннего половодья даже в случае доминирования определенного типа фактора по физическому смыслу. Так, практически однородны по ФФС-1 районы I, X и XI. 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}. Одновременно с этим отмечается большая доля районов и подрайонов, где несмотря на присутствие наиболее распространенных по физическому смыслу характеристик, 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 попытках переноса имеющихся выводов на близрасположенные реки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, об объеме стока весеннего половодья и факторах его формирования. Созданный массив информации лег в основу комплексного анализа трансформации половодья. Применение предложенного подхода при дальнейшем изменении климата получать актуальные результаты о факторах формирования стока половодья и в будущем.

В результате работы сформулированы основные результаты и выводы исследования:

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

2) Сформирована база гидрометеорологических данных, включающая станционные 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 опорных изолиний среднего стока и увеличение изменчивости коэффициента вариации и отношения коэффициента асимметрии к нему. Основными драйверами 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, 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 р. Вятка – общее таяние. В то же время, в восточном и северном секторах ЕТР больший вес имеют оттепели, а в правобережной части бассейна Дона, на реках южной части Урала и его предгорий, а также в бассейне р. Вятка – глубина промерзания почвы.

9) Показана значимость сроков формирования ФФС и их продолжительности. 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 р. Белая и левобережья р. Урал.

10) Установлена высокая 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 р. Белая, а также рр. Хопер и Урал в верхнем течении) и глубины промерзания (бассейн Дона). Высокая изменчивость первой триады факторов формирования стока наблюдается даже в рамках одного бассейна.

11) В зоне недостаточного увлажнения диагностирована область, для которой условия подачи влаги к поверхности почвы в весенний период играют гораздо большую 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЕТР – Европейская территория России

РИК – разностно-интегральная кривая

ТВР – тип водного режима

ФФС – фактор формирования стока, в частности, ФФС-1 – фактор формирования стока первого ранга, ФФС-2 – фактор формирования стока второго ранга, ФФС-3 – фактор формирования стока третьего ранга. Правила назначения ранга описаны в разделах 5.2.1 – 5.2.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авилова К.В., Голосов В.Н., Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Состояние русел // Малые реки волжского бассейна. Москва: Издательство Московского Университета, 1998. С. 109–116.
2. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
3. Алюшинская Н.М., Анискина Н.А., Ивашинцова Л.Д. Весенний сток рек бассейна Северной Двины и его прогнозы // Труды ГГИ. 1962. № 97. С. 3–138.
4. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Ленинград: Наука, 1974. 419 с.
5. Барабанов А.Т. Закономерности формирования поверхностного стока талых вод, его прогноз и регулирование // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2012. Т. 33. № 1. С. 65–68.
6. Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Влияние современных изменений климата и сельскохозяйственной деятельности на весенний поверхностный склоновый сток в лесостепных и степных районах Русской равнины // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 332–340.
7. Бельчиков В.А., Борщ С.В., Павроз Ю.А., Романов А.В., Сильницкая М.И., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Современное состояние и перспективы системы оперативного гидрологического прогнозирования в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 184–202.
8. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. Т. 4. С. 47–63.
9. Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Статистический анализ в гидрологических прогнозах. Москва: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2018. 160 с.
10. Бураков Д.А., Литвинова О.С. Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 111–120.
11. Быстров А.В. Расчет и прогноз потерь талых вод на водосборах левобережной части Нижнего Дона // Труды ГГИ. 1980. № 265. С. 83–87.
12. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Илич В.П., Сазонов А.А. Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. 2020. Т. 47.

№ 6. С. 694–709.

13. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022а. Т. 2. С. 117–146.
14. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022б. Т. 2. С. 92–116.
15. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. 2021. № 5. С. 98–108.
16. Великанова Т.И. Весенний сток и особенности его формирования в условиях северной части Европейской территории СССР // Труды Центрального Института прогнозов. 1967. № 54. С. 78–100.
17. Веретенникова М.В., Зорина Е.Ф., Ковалев С.Н., Любимов Б.П., Никольская И.И., Прохорова С.Д. Современная пораженность овражной эрозией земель сельскохозяйственного фонда и прогноз возможного ее развития // Эрозия почв и русловые процессы. 1998. Т. 11. С. 103–111.
18. Вершинина Л.К. Анализ зависимости объема весеннего стока рек бассейна р. Дона от обуславливающих факторов // Труды ГГИ. 1974. № 218. С. 45–71.
19. Вершинина Л.К. Методика расчета и прогноза объема стока весеннего половодья в бассейне р. Дона // Труды ГГИ. 1977. № 223. С. 52–65.
20. Вершинина Л.К., Змиева Е.С. Оценка увлажненности водосборов в засушливые годы при прогнозах весеннего стока // Труды ГГИ. 1980. № 265. С. 96–105.
21. Вершинина Л.К., Крестовский О.И. Учет водопоглотительной способности водосборов при прогнозах стока весеннего половодья // Труды ГГИ. 1980. № 265. С. 3–30.
22. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
23. Владимиров А.М. Факторы формирования экстремального стока в маловодный сезон // Ученые записки РГГМУ. 2008. № 7. С. 13–22.
24. Владимиров А.М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды весеннего половодья // Ученые Записки РГГМУ. 2009. № 9. С. 22–39.
25. Водные ресурс России и их использование / под ред. И.А. Шикломанов. Санкт-Петербург: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.

26. Водогребский В.Е. Антропогенное изменение стока малых рек. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 176 с.
27. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата / под ред. В.М. Катцов, С.М. Семенов. Москва: Росгидромет, 2014. 1018 с.
28. Гареев А.М., Зайцев П.Н., Комиссаров А.В. Некоторые особенности изменчивости максимальных расходов воды весеннего половодья в зависимости от влияния стокоформирующих факторов (на примере бассейнов рек башкирского Предуралья) // Вестник Башкирского Университета. Серия География. 2015. Т. 20. № 2. С. 478–485.
29. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 6–23.
30. Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // Водные Ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 651–662.
31. Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова: сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://voeikovmgo.ru/>.
32. Гладкевич Г.И., Терский П.Н., Фролова Н.Л. Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации // Водное хозяйство России. 2012. № 2. С. 29–46.
33. Голосов В.Н., Панин А.В. Пространственно-временные закономерности процесса деградации речной сети на Восточно-Европейской равнине // Труды Академии водохозяйственных наук. 1998. № 5. С. 163–172.
34. Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28.
35. Госстрой_России. Свод правил по проектированию и строительству 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». Российская Федерация, 2004.
36. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
37. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние: ГЕОС, 2017. 205 с.
38. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Бугров А.А. Особенности Формирования Современных Ресурсов Подземных Вод Европейской Части России // Водные Ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 457–466.

39. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные Ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685.
40. Змиева Е.С. Весенний сток в бассейне р. Волги и метод его прогноза // Труды Центрального Института прогнозов. 1955. № 39 (66). С. 27–34.
41. Змиева Е.С. Предвычисление весеннего притока воды в Куйбышевское водохранилище на основе территориальных прогнозов стока // Труды гидрометцентра СССР. 1977. № 186. С. 15–40.
42. Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В. Земледельческое освоение территории и отмирание рек европейской части России // Геморфология. 1996. № 4. С. 53–60.
43. Калужный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. Экспериментальные исследования и моделирование. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2012. 616 с.
44. Калужный И.Л., Лавров С.А. Изменчивость глубины промерзания почвы в бассейне р. Волга и ее влияние на процессы формирования зимнего и весеннего стока при изменениях климата // Метеорология и гидрология. 2016а. № 7. С. 58–71.
45. Калужный И.Л., Лавров С.А. Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга // Лёд и Снег. 2016b. Т. 56. № 2. С. 207–220.
46. Каримова Т.И. Методика расчета и прогноза стока весеннего половодья с бассейна р. Белой // Труды ГГИ. 1980. № 265. С. 61–73.
47. Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г. Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне р. Дон в 2007-2015 гг. // Геориск. 2017. № 04. С. 18–25.
48. Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е. Водный режим рек Европейской территории России и его трансформация в XXI веке под влиянием меняющегося климата // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, г. Сочи, 08-14 октября 2018 г. Новочеркасск: Лик, 2018а. С. 49–55.
49. Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Телегина Е.А., Харламов М.А., Езерова Н.Н., Пахомова О.М. Паводочный сток на реках европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018b. № 4. С. 48–68.
50. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколизина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления. Москва: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
51. Кланг П.С., Хан В.М., Тарасова Л.Л. Оценка объемной влажности почвы реанализа

- ERA5-Land по данным наблюдений влагозапасов в регионах ЕТР // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. Т. Кланг, П.С. № 4 (394). С. 146–162.
52. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. Москва: Гидрометеиздат, 1959. 259 с.
 53. Коронкевич Н.И., Зайцева И.С., Мандыч А.Ф., Барабанова Е.А., Долгов С.В., Шапоренко С.И., Попова В.В., Шилькрот Г.С., Черногаева Г.М., Ясинский С.В. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия. Москва: Наука, 2003. 367 с.
 54. Крестовский О.И. Опыт расчета и прогноза элементов водного баланса весеннего половодья бассейна р. Вятки // Труды ГГИ. 1977. № 233. С. 3–14.
 55. Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек / под ред. А.А. Соколов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 118 с.
 56. Крестовский О.И., Соколова Н.В. Весенний сток и потери талых воды в лесу и поле // Труды ГГИ. 1980. № 265. С. 32–60.
 57. Крестовский О.И., Хатькова Н.П. Потери талых вод на заболоченных водосборах лесной зоны ЕТС и возможности его прогноза // Труды ГГИ. 1980. Т. 265. С. 74–82.
 58. Крючков А.Д., Калинин Н.А. Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа на территории Пермского края // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 95–110.
 59. Кузник И.А. Агролесомелиоративные мероприятия, весенний сток и эрозия почв. Ленинград: Гидрометеиздат, 1962. 220 с.
 60. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели. Москва: Издательство «Наука», 1983. 216 с.
 61. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России. 2016. № 6. С. 42–60.
 62. Леонович И.И., Вырко Н.П., Демидко М.Н. Статистический метод определения глубины промерзания грунтов // Труды БГТУ. 2015. № 2. С. 27–31.
 63. Линслей Р.К., Колер М.А., Паулюс Л.Х. Прикладная гидрология. Ленинград: Гидрометеиздат, 1962. 760 с.
 64. Макарова Т.Т. Исследование формирования весеннего половодья по методу водного баланса (на примере р. Мологи) // Труды Центрального Института прогнозов. 1950. № 22 (49). С. 53–84.
 65. Макарова Т.Т. Исследование условий формирования весеннего стока р. Камы и методика

- его прогноза // Труды Центрального Института прогнозов. 1955. № 39 (66). С. 15–22.
66. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометеорологических наблюдений. Санкт-Петербург: ФГБУ «ГГИ», 2005. 103 с.
 67. Михайлова Н.В., Юровский А.В. Восточноатлантическое колебание: механизм и влияние на климат Европы в зимний период // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 4 (190). С. 27–37.
 68. Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И. Гидрологическое обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне Верхнего Дона // Экология бассейна Дона. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2005а. С. 74–75.
 69. Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И. Бассейн Верхнего Дона: водные ресурсы, гидрология, гидрография // Труды НИИ Геологии ВГУ. 2005b. № 26. С. 1–139.
 70. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях: научно-прикладной справочник / под ред. М. М.Л. Санкт-Петербург: РИАЛ, 2021. 202 с.
 71. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевский. Санкт-Петербург: ООО «РИАЛ», 2021. 190 с.
 72. Молчанов А.А. Гидрологическая роль сосновых лесов на песчаных почвах. Москва: Изд-во АН СССР, 1952. 487 с.
 73. Национальный Атлас почв Российской Федерации. / под ред. С.А. Шоба. Москва: АСТРЕЛЬ: АСТ, 2011. 632 с.
 74. Нестеров Е.С. Особенности состояния океана и атмосферы в разных фазах северо-атлантического колебания // Метеорология и гидрология. 1998. № 8. С. 74–82.
 75. Неушкин А.И., Сидоренков Н.С., Санина А.Т. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие / под ред. Р.М. Вильфанд, И. Неушкин, А. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 123 с.
 76. Осипова Н.В., Болгов М.В. Оценка характеристик максимального стока весеннего половодья в бассейне р. Дон в нестационарных условиях // Водные Ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 686–693.
 77. Отчет о выполнении проекта РНФ № 19-77-10032 «Структурные изменения процессов формирования стока рек Восточно-Европейской равнины в условиях нестационарности климата», в период с 1 июля 2019 г. по 30 июня 2020 г. Москва: , 2020. 51 с.
 78. Отчет о выполнении проекта РНФ № 19-77-10032 «Структурные изменения процессов формирования стока рек Восточно-Европейской равнины в условиях нестационарности

- климата», в период с 1 июля 2020 г. по 30 июня 2021 г., 2021.
79. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата / под ред. С.М. Семенова. Москва: Росгидромет, 2008. 288 с.
 80. Паршин В.Н., Салов М.С. Весенний сток в бассейне реки Дон и его предвычисление. Ленинград: Гидрометеиздат, 1955. 103 с.
 81. Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В. Теория общей циркуляции атмосферы. Казань: Казанский Университет, 2013. 223 с.
 82. Перминов А.В., Смирнова М.А. Оценка внутригодового распределения речного стока в бассейне Верхней Волги // Вестник ФГОУ ВО МГАУ. 2014. № 3. С. 30–34.
 83. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. 395 с.
 84. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.
 85. Разумова Л.А. Сезонная мерзлота и влажность почвы на Европейской территории СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1953. 352 с.
 86. Рахманов В.В. Водоохранная роль лесов. Москва: Гослесбумиздат, 1962. 235 с.
 87. Рахманов В.В. Долгосрочный прогноз объема половодья р. Оки с учетом весенних осадков // Труды гидрометцентра СССР. 1977. № 186. С. 3–14.
 88. Рахманов В.В. Долгосрочный прогноз объема половодья Дона // Труды Гидрометцентра СССР. 1981. № 236. С. 51–63.
 89. Рахманов В.В. Долгосрочный прогноз объема половодья Верхней Печоры // Труды Гидрометцентра СССР. 1988. № 300. С. 3–9.
 90. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 357 с.
 91. Сафина Г.Р., Голосов В.Н. Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины европейской территории России // Ученые записки Казанского Университета. Серия Естественные науки. 2018. Т. 160. С. 111–125.
 92. Соколов А.А. О влиянии леса на максимальный сток весеннего половодья // Труды ГГИ. 1962. № 99. С. 79–140.
 93. Соломатин Н.В., Валиева Ж., Гейде Э.Г. Антропогенные изменения в формировании стока на водосборах Южного Урала // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2007. Т. 15–1. С. 104–106.
 94. Субботин А.И. Структура половодья и территориальные прогнозы весеннего стока рек в нечерноземной зоне европейской территории России. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978.

- 98 с.
95. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцов. Санкт-Петербург: Научно-технологические, 2022. 676 с.
 96. Фролова Н.Л. Гидрология рек. Антропогенные изменения речного стока: учебное пособие для академического бакалавриата. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 115 с.
 97. Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Нестеренко Д.П., Повалишников Е.С. Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 32–49.
 98. Фролова Н.Л., Григорьев В.Ю., Киреева М.Б., Харламов М.А. Анализ изменения стока рек европейской территории России по дистанционным и наземным данным // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Материалы международной научно-практической конференции (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.) / под ред. С.А. Куролап, Л.М. Акимов, В.А. Дмитриева. Воронеж: Издательство «Цифровая полиграфия», 2019. С. 532.
 99. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К., Семин В.Н., Повалишников Е.С., Сазонов А.А., Харламов М.А., Григорьев В.Ю. Комплексное исследование и картографирование современного водного режима рек европейской территории России и его опасных проявлений [Электронный ресурс]. URL: <https://autolab.geogr.msu.ru/water-regime-ctr/index.html>.
 100. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 961. № 7. С. 14–26.
 101. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные Ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.
 102. Фролова Н.Л., Самсонов Т.Е., Киреева М.Б., Семин В.Н., Энтин А.Л. Веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России»: структура и функциональные возможности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 6–22.
 103. 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 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 120–143.

104. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Мониторинг формирования и прохождения весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища в 2014 г. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 7. С. 5–13.
105. Ahmed R., Prowse T., Dibike Y., Bonsal B. Effects of Climatic Drivers and Teleconnections on Late SSS20th Century Trends in Spring Freshet of Four Major Arctic-Draining Rivers // *Water*, 2021. Vol. 13. № 2. 179 p.
106. Assani A.A. Analysis of the Influence of the 2007–2008 La Niña Events, Land Use, and Dam Management Modes on the 2008 Spring Freshet Characteristics in Quebec, Canada // *Flood Risk Management: InTech*, 2017. P. 215–219.
107. Blöschl G., Hall J., Viglione A., Perdigão R.A.P., Parajka J., Merz B., Lun D., Arheimer B., Aronica G.T., Bilibashi A., Boháč M., Bonacci O., Borga M., Čanjevac I., Castellarin A., Chirico G.B., Claps P., Frolova N., Ganora D., Gorbachova L., Gül A., Hannaford J., Harrigan S., Kireeva M., Kiss A., Kjeldsen T.R., Kohnová S., Koskela J.J., Ledvinka O., Macdonald N., Mavrova-Guirguinova M., Mediero L., Merz R., Molnar P., Montanari A., Murphy C., Osuch M., Ovcharuk V., Radevski I., Salinas J.L., Sauquet E., Šraj M., Szolgay J., Volpi E., Wilson D., Zaimi K., Živković N. Changing climate both increases and decreases European river floods // *Nature*. 2019. Vol. 573. № 7772. P. 108–111.
108. Burn D.H., Cunderlik J.M., Pietroniro A. Hydrological trends and variability in the Liard River basin / Tendances hydrologiques et variabilité dans le bassin de la rivière Liard // *Hydrol. Sci. J.* 2004. Vol. 49. № 1. P. 53–67.
109. Burn D.H., Whitfield P.H. Changes in flood events inferred from centennial length streamflow data records // *Adv. Water Resour.* 2018. Vol. 121. P. 333–349.
110. Curran J.H., Biles F.E. Identification of Seasonal Streamflow Regimes and Streamflow Drivers for Daily and Peak Flows in Alaska // *Water Resour. Res.* 2021. Vol. 57. № 2.
111. Davie T. Fundamentals of hydrology. Second edition. London and New York: Taylor & Francis e-Library, 2008. 200 p.
112. Déry S.J., Stahl K., Moore R.D., Whitfield P.H., Menounos B., Burford J.E. Detection of runoff timing changes in pluvial, nival, and glacial rivers of western Canada // *Water Resour. Res.* 2009. Vol. 45. № 4.
113. Flow Forecasting for the Lower Fraser River (from Hope to the Ocean). 2012. 5 p.
114. Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D. V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E. V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment // *Nat. Hazards*. 2017. Vol. 88. № S1. P. 103–131.

115. Frolova N.L., Magritskii D. V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Y., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data // *Water Resour.* 2022. Vol. 49. № 3. P. 333–350.
116. Gelfan A., N. Frolova, Magritsky D., Kireeva M., Grigoriev V., Motovilov Y., Gusev E. Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections // *Fundam. Appl. Climatol.* 2021. Vol. 7. № 1. P. 36–79.
117. Guide to hydrological practices: World Meteorological Organization, 1994. Vol. 5. 735 p.
118. Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No.168, 2008. 290 p.
119. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara G. De, Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P. de, Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146. № 730. P. 1999–2049.
120. Jones N.E., Petreman I.C., Schmidt B.J. High flows and freshet timing in Canada: observed trends. 42 climate change research report (CCRR-42). Ontario: Ministry of Natural resources and forestry, 2015. 24 p.
121. Kharlamov M., Kireeva M. Drought dynamics in the East European Plain for the period 1980–2018 // *E3S Web Conf.* 2020. Vol. 163. P. 02004.
122. Kharlamov M., Kireeva M., Varentsova N. Spring freshet on East European plain: changes in drivers and conditions during last three decades // *EGU General Assembly 2021*, online, 19–30 Apr 2021, 2021.
123. Kireeva M., Frolova N., Rets E., Samsonov T., Entin A., Kharlamov M., Telegina E., Povalishnikova 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 Manag.* 2020. Vol. 18. № 4. P. 491–502.
124. Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Sazonov A.A., Mikhaylyukova P.G. Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don River basin during 2007-2016 // *Geogr. Environ. Sustain.* 2019. Vol. 12. № 2. P. 62–77.
125. Kreibich H., Loon A.F. Van, Schröter K., Ward P.J., Mazzoleni M., Sairam N., Abeshu G.W., Agafonova S., AghaKouchak A., Aksoy H., Alvarez-Garreton C., Aznar B., Balkhi L.,

- Barendrecht M.H., Biancamaria S., Bos-Burging L., Bradley C., Budiyono Y., Buytaert W., Capewell L., Carlson H., Cavus Y., Couasnon A., Coxon G., Daliakopoulos I., Ruiter M.C. de, Delus C., Erfurt M., Esposito G., François D., Frappart F., Freer J., Frolova N., Gain A.K., Grillakis M., Grima J.O., Guzmán D.A., Huning L.S., Ionita M., Kharlamov M., Khoi D.N., Kieboom N., Kireeva M., Koutroulis A., Lavado-Casimiro W., Li H.-Y., LLasat M.C., Macdonald D., Mård J., Mathew-Richards H., McKenzie A., Mejia A., Mendiondo E.M., Mens M., Mobini S., Mohor G.S., Nagavciuc V., Ngo-Duc T., Thao Nguyen Huynh T., Nhi P.T.T., Petrucci O., Nguyen H.Q., Quintana-Seguí P., Razavi S., Ridolfi E., Riegel J., Sadik M.S., Savelli E., Sazonov A., Sharma S., Sörensen J., Arguello Souza F.A., Stahl K., Steinhausen M., Stoelzle M., Szalińska W., Tang Q., Tian F., Tokarczyk T., Tovar C., Tran T.V.T., Huijgevoort M.H.J. Van, Vliet M.T.H. van, Vorogushyn S., Wagener T., Wang Y., Wendt D.E., Wickham E., Yang L., Zambrano-Bigiarini M., Blöschl G., Baldassarre G. Di. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management // *Nature*. 2022. Vol. 608. № 7921. P. 80–86.
126. Li K., Huang G., Baetz B. Development of a Wilks feature importance method with improved variable rankings for supporting hydrological inference and modelling // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2021. Vol. 25. № 9. P. 4947–4966.
 127. Magritsy D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector // *Polarforschung*. 2018. № 87 (2). P. 177–194.
 128. Merz R., Tarasova L., Basso S. The flood cooking book: ingredients and regional flavors of floods across Germany // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. № 11. P. 114024.
 129. Mistry M.N., Schneider R., Masselot P., Royé D., Armstrong B., Kyselý J., Orru H., Sera F., Tong S., Lavigne É., Urban A., Madureira J., García-León D., Ibarreta D., Ciscar J.-C., Feyen L., Schrijver E. de, Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M. de, Pascal M., Tobias A., Alahmad B., Abrutzky R., Saldiva P.H.N., Correa P.M., Orteg N.V., Kan H., Osorio S., Indermitte E., Jaakkola J.J.K., Rytty N., Schneider A., Huber V., Katsouyanni K., Analitis A., Entezari A., Mayvaneh F., Michelozzi P., De'Donato F., Hashizume M., Kim Y., Diaz M.H., la Cruz Valencia C. De, Overcenco A., Houthuijs D., Ameling C., Rao S., Seposo X., Nunes B., Holobaca I.-H., Kim H., Lee W., Íñiguez C., Forsberg B., Åström C., Ragettli M.S., Guo Y.-L.L., Chen B.-Y., Colistro V., Zanolletti A., Schwartz J., Dang T.N., Dung D. Van, Guo Y., Vicedo-Cabrera A.M., Gasparrini A. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. № 1. P. 5178.
 130. Naikm P.K., Jay D.A. Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: changes in the disturbance processes // *Cold Region Hydrology in a Changing Climate*,

- Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011. IAHS Publ. 346. Melbourne, 2011. P. 21–26.
131. Parker, W. S., 2016: Reanalyses and observations: What's the difference? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol. 97. P. 1565–1572.
 132. Partasenok I.S., Groisman P.Y., Chekan G.S., Melnik V.I. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus // *Environ. Res. Lett.* 2014. Vol. 9. № 9. P. 095005.
 133. Prowse T.D., Wrona F.J., Reist J.D., Gibson J.J., Hobbie J.E., Lévesque L.M.J., Vincent W.F. Climate change effects on hydroecology of arctic freshwater ecosystems // *R. Swedish Acad. Sci.*, 2006. Vol. 35. № 7. P. 347–358.
 134. Reanalysis ERA5 [Электронный ресурс]. URL: www.ecmwf.int.
 135. Rivoire P., Martius O., Naveau P. A Comparison of moderate and extreme ERA-5 daily precipitation with two observational data sets // *Earth Sp. Sci.* 2021. Vol. 8. № 4.
 136. Rood S.B., Foster S.G., Hillman E.J., Luek A., Zanewich K.P. Flood moderation: Declining peak flows along some Rocky Mountain rivers and the underlying mechanism // *J. Hydrol.* 2016. Vol. 536. P. 174–182.
 137. Schmidt L., Heße F., Attinger S., Kumar R. Challenges in Applying Machine Learning Models for Hydrological Inference: A Case Study for Flooding Events Across Germany // *Water Resour. Res.* 2020. Vol. 56. № 5.
 138. Tarek M., Brissette F.P., Arsenault R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. Vol. 24. № 5. P. 2527–2544.
 139. Walker B. J. and Marsh P. Dr. High resolution spatial variability in spring snowmelt for an Arctic shrub-tundra watershed. Theses and Dissertations (Comprehensive). Wilfrid Laurier University, 2019. 98 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А.1 – Перечень подбассейнов в пределах ЕТР

№ региона	Регион	Количество гидропостов	Реки
0	Кольский п-ов	1	Варзуга
1	Онега	5	Онега, Волошка, Кена
2	Северная Двина выше д. Абрамково	8	Северная Двина, Сухона, Кубена, Юг, Луза
3	Северная Двина ниже впадения р. Вычегда	8	Северная Двина, Вага, Вель, Устья, Емца, Пинега
4	Вычегда	12	Вычегда, Нившера, Локчим, Сысола, Вымь, Яренга, Виледь
5	Мезень	7	Мезень, Вашка, Пёза
6	Печора от истока до впадения р. Уса, включая ее	8	Печора, Илыч, Чикшина, Уса, Адзьва, Колва
7	Печора ниже впадения р. Уса	9	Печора, Лая, Ижма, Ухта, Пижма, Цильма, Сула
8	Реки северо-запада	5	Тосна, Паша, Ловать, Коваши, Луга
9	Днепр и Западная Двина	5	Днепр, Каспля
10	Верхняя Волга	24	Волга, Вазуза, Тверца, Лама, Дубна, Корожечна, Улейма, Сутка, Ильдь, Кесьма, Молога, Чагодоша, Песь, Суда, Колпь, Андога, Ковжа, Мотома, Куность, Шола, Кема, Индоманка
11	Бассейн Горьковского вдхр.	20	Черёмуха, Урдома, Печегда, Которосль, Касть, Соть, Кострома, Тебза, Обнора, Меза, Шача, Сунжа, Мера, Медоза, Немда, Унжа, Вига, Межа, Нея
12	Средняя Волга	5	Ветлуга, Вохма, Нея
13	Нижняя Волга	33	Цивиль, Малый Цивиль, Большая Кокшага, Малая Кокшага, Илеть, Свияга, Сельда, Карша, Кубня, Казанка, Шешма, Кичуй, Меша, Актай, Большой Черемшан, Уса, Сок, Кондурча, Самара, Малый Уран, Ток, Бузулук, Большой Кинель, Малый Кинель, Чапаевка, Сызрань, Чагра, Большой Караман, Кутулук, Терешка
14	Верхняя Ока	22	Ока, Крома, Цон, Оптуха, Зуша, Неручь, Нугрь, Упа, Солова, Жиздра, Угра, Таруса, Протва, Осётр, Москва, Искона, Истра, Северка
15	Средняя и Нижняя Ока, Сура	24	Ока, Проня, Бужа, Гусь, Мокша, Атмисс, Вад, Цна, Кариан, Выша, Ушна, Клязьма, Воря, Серая, Колокша, Нерль, Судогда, Пёт, Сура, Тешнярь, Уза, Барыш

Таблица А.1 - Продолжение

Номер региона	Регион	Количество гидростов	Реки
16	Кама от истока до впадения р. Чусовая	10	Кама, Коса, Лолог, Вишера, Яйва, Иньва, Вельва, Обва
17	Кама от впадения р. Чусовая до р. Белая	6	Чусовая, Мулянка, Очер, Тулва, Буй
18	Белая	28	Белая, Ашкадар, Стерля, Уршак, Уфа, Ай, Куса, Тюй, Сарс, Юрюзань, Дема, Мияки, Чермасан, Быстрый Танып, База, Сюнь
19	Нижняя Кама и Вятка	27	Позимь, Ик, Дымка, Вятка, Белая Холуница, Чепца, Лоза, Святица, Филипповка, Великая, Быстрица, Молома, Воя, Уржумка, Кильмезь, Вала, Нылга, Лобань, Ирень, Большой Авзян, Кобра
20	Верхний Дон	10	Дон, Красивая Меча, Сосна, Девица, Воронеж, Лесной Воронеж, Тихая Сосна, Матыра
21	Средний Дон	28	Дон, Битюг, Подгорная, Хопер, Карай, Ворона, Савала, Бузулук, Кардаил, Кумылга, Медведица, Аткара, Терса, Арчеда, Иловля, Тишанка, Паньшинка, Чир, Есауловский Аксай
22	Нижний Дон	14	Северский Донец, Нежеголь, Оскол, Валуй, Глубокая, Калитва, Ольховая, Большая, Березовая, Кундрючья, Тузлов
23	Урал	29	Урал, Миндяк, Малый Кизил, Большой Кизил, Большая Караганка, Большая Уртазымка, Сундук, Джуса, Таналык, Большой Кумак, Жарлы, Орь, Кугутык, Сакмара, Зилаир, Касмарка, Большой Ик, Салмыш, Чёрная, Илек, Чаган, Худолаз, Малый Узень

Приложение Б

Таблица Б.1 – Перечень факторов формирования стока, сформированный на основе данных реанализа ERA5

Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-1 Показатели снежного покрова	1.1	<i>snow_days</i>	общее количество дней со снежным покровом без учета оттепелей со сходом снега
	1.2	<i>snow_period</i>	продолжительность снежного периода с учетом оттепелей со сходом снега
	1.3	<i>Smax</i>	максимальный запас воды в снежном покрове за <i>snow_days</i>
	1.4	<i>Smax</i> _{10d}	максимальный 10-дневный запас воды в снежном покрове за <i>snow_days</i>
	1.5	<i>Smean</i> _{snow_days}	средний запас воды в снежном покрове за <i>snow_days</i>
	1.6	<i>Ssum</i> _{snow_days}	сумма глубин снежного покрова
	1.7	<i>Smean</i> _{snow_period}	средний запас воды в снежном покрове, включая дни с оттепелями
	1.8	<i>Cv_S</i> _{snow_period}	коэффициент вариации запаса воды в снежном покрове за <i>snow_period</i>
	1.9	<i>Cv_S</i> _{snow_days}	коэффициент вариации запаса воды в снежном покрове за <i>snow_days</i>
	1.10	<i>Smax</i> _{05-31.01}	максимальный запас воды в снежном покрове 5-31 января
	1.11	<i>Smax</i> _{05-28.02}	максимальный запас воды в снежном покрове 5 - 28 февраля
	1.12	<i>Smax</i> _{31.01-15.02}	максимальный запас воды в снежном покрове 31 января - 15 февраля
	1.13	<i>Smax</i> _{31.01-28.02}	максимальный запас воды в снежном покрове 31 января - 28 февраля
	1.14	<i>Smax</i> _{05.01-31.03}	максимальный запас воды в снежном покрове 5 января - 31 марта
	1.15	<i>SP_day</i> _{start}	порядковый номер дня в году установления снежного покрова
	1.16	<i>SP_day</i> _{max}	порядковый номер дня в году максимального запаса воды в снеге
	1.17	<i>SP_day</i> _{end}	порядковый номер дня в году схода снежного покрова
F-2 Средние характеристики зимнего периода	2.1	<i>winter_days</i>	продолжительность зимнего периода (от первого перехода через 0 °С в сторону отрицательных значений до последнего перехода через 0 °С в сторону положительных значений)
	2.2	<i>winter_temp</i> _{mean}	средняя температура воздуха за <i>winter_days</i>
	2.3	<i>winter_temp</i> _{sum}	сумма среднесуточных температур воздуха за <i>winter_days</i>

Таблица Б.1 – Продолжение

Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-2 (продолжение)	2.4	$winter_temp_{Cv}$	коэффициент вариации температуры воздуха за $winter_days$
	2.5	$TPsum_{01.11-SP}$	сумма осадков с 01 ноября до окончания $winter_days$
	2.6	$TPsum_{01.02-SP10}$	сумма осадков с 01 февраля до 10 дня посл окончания $winter_days$
	2.7	$TPsum_{10.02-SP10}$	сумма осадков с 10 февраля до 10 дня посл окончания $winter_days$
	2.8	$TPsum_{20.02-SP10}$	сумма осадков с 20 февраля до 10 дня посл окончания $winter_days$
F-3 Характеристики зимних морозов	3.1	$frozen_days$	количество дней с отрицательной температурой в пределах $winter_days$
	3.2	$subzero_temp_{sum}$	сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха за $frozen_days$
	3.3	$subzero_temp_{mean}$	средняя температура воздуха за $frozen_days$
	3.4	$frozen_days_{Suzp}$	количество дней с отрицательной температурой для устойчивого зимнего периода (началом устойчивого периода назначался день, после которого 5 дней подряд сохранялась отрицательная температура воздуха, концом - день с последней отрицательной температурой)
	3.5	$frozen_days_{1.01}$	количество дней с отрицательной температурой с 1 января
	3.6	$frozen_days_{15.01}$	количество дней с отрицательной температурой с 15 января
	3.7	$frozen_days_{1.02}$	количество дней с отрицательной температурой с 1 февраля
	3.8	$subzero_temp_{Cv}$	коэффициент вариации отрицательной температуры воздуха
	3.9	$SnowTP_{Cv}$	коэффициент вариации твердых осадков
	3.10	$SnowTP$	сумма осадков, выпавших за $frozen_days$ при отрицательной температуре воздуха (твердые осадки)
F-4 Характеристики зимних оттепелей	4.1	$thaw_temp_{sum}$	сумма положительных среднесуточных температур воздуха зимнего периода (оттепели)
	4.2	$thaw_temp_{mean}$	средняя положительная температура зимнего периода (оттепели)
	4.3	$snowbreak_{len}$	продолжительность оттепелей (дни без снега внутри снежного периода)
	4.4	$snowbreak_{count}$	количество оттепелей
	4.5	$snowbreak_{len_max}$	максимальная продолжительность оттепели
	4.6	$snowbreak_{len_mean}$	средняя продолжительность оттепели
	4.7	$snowbreak_{Cv}$	коэффициент вариации продолжительности оттепелей

Таблица Б.1 – Продолжение

Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-4 (продолжение)	4.8	$thaw_{count}$	количество оттепелей
	4.9	$thaw_days$	суммарная продолжительность оттепелей
	4.10	$thaw_{len_mean}$	средняя продолжительность оттепели
	4.11	$thaw_{len_max}$	максимальная продолжительность оттепели
	4.12	$thaw_temp_{mean\ per\ thaw}$	средняя температура оттепели
	4.13	$ThawTP_{per\ thaw}$	средняя сумма осадков за оттепель
	4.14	$thaw_days_{Cv}$	коэффициент вариации продолжительности оттепелей
	4.15	$thaw_temp_{Cv}$	коэффициент вариации положительной температуры
	4.16	$ThawTP_{Cv}$	коэффициент вариации жидких осадков (оттепели)
	4.17	$ThawTP$	сумма жидких осадков зимнего периода
F-5 Характеристики промерзания почвы	5.1	fr_depth_{days}	количество дней с промерзшей почвой
	5.2	fr_depth_{max}	максимальная глубина промерзания почвы
	5.3	fr_depth_{mean}	средняя глубина промерзания почвы
	5.4	$fr_depth_{21-31.01}$	средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду января
	5.5	$fr_depth_{21-28.02}$	средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду февраля
	5.6	$fr_depth_{21-31.03}$	средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду марта
	5.7	$fr_depth_{21-30.04}$	средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду апреля
F-6 Характеристики периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до его схода	6.1	$temp_mean_{Smax-SP}$	средняя температура периода
	6.2	$temp_sum_{Smax-SP}$	сумма температур периода
	6.3	$frozen_temp_{Smax-SP}$	сумма отрицательных температур периода
	6.4	$thaw_temp_{Smax-SP}$	сумма положительных температур периода
	6.5	$range_temp_{Smax-SP}$	максимальная разница температур периода
	6.6	$TPsum_{Smax-SP}$	сумма осадков периода
	6.7	$SnowTP_{Smax-SP}$	сумма твердых осадков периода
	6.8	$ThawTP_{Smax-SP}$	сумма жидких осадков периода

Таблица Б.1 – Продолжение

Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-6 (продолжение)	6.9	$temp_Cv_{Smax-SP}$	коэффициент вариации температур периода
	6.10	$temp_std_{Smax-SP}$	среднеквадратическая ошибка температур воздуха периода
	6.11	$Smean_{Smax-SP}$	средняя глубина снежного покрова за период
	6.12	$len_{Smax-SP}$	продолжительность периода
	6.13	$temp_TC_{Smax-SP}$	трендовый коэффициент температур за период
F-7 Характеристики периода от накопления максимального запаса воды в снежном покрове до перехода температуры воздуха через 0°C	7.1	$temp_mean_{Smax-T0}$	средняя температура периода
	7.2	$temp_sum_{Smax-T0}$	сумма температур периода
	7.3	$frozen_temp_{Smax-T0}$	сумма отрицательных температур периода
	7.4	$thaw_temp_{Smax-T0}$	сумма положительных температур периода
	7.5	$range_temp_{Smax-T0}$	максимальная разница температур периода
	7.6	$TPsum_{Smax-T0}$	сумма осадков периода
	7.7	$SnowTP_{Smax-T0}$	сумма твердых осадков периода
	7.8	$ThawTP_{Smax-T0}$	сумма жидких осадков периода
	7.9	$temp_Cv_{Smax-T0}$	коэффициент вариации температур периода
	7.10	$temp_std_{Smax-T0}$	среднеквадратическая ошибка температур воздуха периода
	7.11	$Smean_{Smax-T0}$	средняя глубина снежного покрова за период
	7.12	$len_{Smax-T0}$	продолжительность периода
	7.13	$temp_TC_{Smax-T0}$	трендовый коэффициент температур за период
F-8 Характеристики периода от перехода температуры через 0°C до схода снежного покрова	8.1	$temp_mean_{T0-SP}$	средняя температура периода
	8.2	$temp_sum_{T0-SP}$	сумма температур периода
	8.3	$frozen_temp_{T0-SP}$	сумма отрицательных температур периода
	8.4	$thaw_temp_{T0-SP}$	сумма положительных температур периода
	8.5	$range_temp_{T0-SP}$	максимальная разница температур периода
	8.6	$TPsum_{T0-SP}$	сумма осадков периода
	8.7	$SnowTP_{T0-SP}$	сумма твердых осадков периода
	8.8	$ThawTP_{T0-SP}$	сумма жидких осадков периода

Таблица Б.1 – Продолжение

Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-8 (продолжение)	8.9	$temp_Cv_{T0-SP}$	коэффициент вариации температур периода
	8.10	$temp_std_{T0-SP}$	среднеквадратическая ошибка температур периода
	8.11	$Smean_{T0-SP}$	средняя глубина снежного покрова за период
	8.12	len_{T0-SP}	продолжительность периода
	8.13	$temp_TC_{T0-SP}$	трендовый коэффициент температур за период
F-9 характеристики 10-дневного периода после схода снежного покрова	9.1	$temp_mean_{ESC10}$	средняя температура периода
	9.2	$temp_sum_{ESC10}$	сумма температур периода
	9.3	$frozen_temp_{ESC10}$	сумма отрицательных температур периода
	9.4	$thaw_temp_{ESC10}$	сумма положительных температур периода
	9.5	$range_temp_{ESC10}$	максимальная разница температур периода
	9.6	$TPsum_{ESC10}$	сумма осадков периода
	9.7	$SnowTP_{ESC10}$	сумма твердых осадков периода
	9.8	$ThawTP_{ESC10}$	сумма жидких осадков периода
	9.9	$temp_Cv_{ESC10}$	коэффициент вариации температур периода
	9.10	$temp_std_{ESC10}$	среднеквадратическая ошибка температур периода
	9.11	$Smean_{ESC10}$	средняя глубина снежного покрова за период
	9.12	len_{ESC10}	продолжительность периода
	9.13	$temp_TC_{ESC10}$	трендовый коэффициент температур за период
F-10 Характеристики последних 10 дней зимы	10.1	$temp_mean_{LAST10}$	средняя температура периода
	10.2	$temp_sum_{LAST10}$	сумма температур периода
	10.3	$frozen_templ_{LAST10}$	сумма отрицательных температур периода
	10.4	$thaw_templ_{LAST10}$	сумма положительных температур периода
	10.5	$range_templ_{LAST10}$	максимальная разница температур периода
	10.6	$TPsum_{LAST10}$	сумма осадков периода
	10.7	$SnowTP_{LAST10}$	сумма твердых осадков периода
	10.8	$ThawTP_{LAST10}$	сумма жидких осадков периода
	10.9	$temp_Cv_{LAST10}$	коэффициент вариации температур периода

Таблица Б.1 – Продолжение

Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-10 (продолжение)	10.10	$temp_std_{LAST10}$	среднеквадратическая ошибка температур периода
	10.11	$Smean_{LAST10}$	средняя глубина снежного покрова за период
	10.12	len_{LAST10}	продолжительность периода
	10.13	$temp_TC_{LAST10}$	трендовый коэффициент температур за период
F-11 Характеристики первых 10 дней весны	11.1	$temp_mean_{SP10}$	средняя температура периода
	11.2	$temp_sum_{SP10}$	сумма температур периода
	11.3	$frozen_temp_{SP10}$	сумма отрицательных температур периода
	11.4	$thaw_temp_{SP10}$	сумма положительных температур периода
	11.5	$range_temp_{SP10}$	максимальная разница температур периода
	11.6	$TPsum_{SP10}$	сумма осадков периода
	11.7	$SnowTP_{SP10}$	сумма твердых осадков периода
	11.8	$ThawTP_{SP10}$	сумма жидких осадков периода
	11.9	$temp_Cv_{SP10}$	коэффициент вариации температур периода
	11.10	$temp_std_{SP10}$	среднеквадратическая ошибка температур периода
	11.11	$Smean_{SP10}$	средняя глубина снежного покрова за период
	11.12	len_{SP10}	продолжительность периода
	11.13	$temp_TC_{SP10}$	трендовый коэффициент температур за период
F-12 Характеристики последних 10 дней зимы и первых 10 дней весны	12.1	$temp_mean_{LAST10-SP10}$	средняя температура периода
	12.2	$temp_sum_{LAST10-SP10}$	сумма температур периода
	12.3	$frozen_temp_{LAST10-SP10}$	сумма отрицательных температур периода
	12.4	$thaw_temp_{LAST10-SP10}$	сумма положительных температур периода
	12.5	$range_temp_{LAST10-SP10}$	максимальная разница температур периода
	12.6	$TPsum_{LAST10-SP10}$	сумма осадков периода
	12.7	$SnowTP_{LAST10-SP10}$	сумма твердых осадков периода

Таблица Б.1 – Продолжение

Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
<i>F</i> -12 (продолжение)	12.8	$ThawTP_{LAST10-SP10}$	сумма жидких осадков периода
	12.9	$temp_Cv_{LAST10-SP10}$	коэффициент вариации температур периода
	12.10	$temp_std_{LAST10-SP10}$	среднеквадратическая ошибка температур периода
	12.11	$Smean_{LAST10-SP10}$	средняя глубина снежного покрова за период
	12.12	$len_{LAST10-SP10}$	продолжительность периода
	12.13	$temp_TC_{LAST10-SP10}$	трендовый коэффициент температур за период
<i>F</i> -13 Характеристики скорости таяния	13.1	$melt_{time}$	время таяния
	13.2	$melt_{time} \%$	время таяния в процентах от количества дней со снежным покровом
	13.3	$melt_{speed}$	скорость таяния, мм/день
	13.4	$melt_{TC}$	трендовый коэффициент таяния (k из $kx + b$)
	13.5	$melt_active_{TC}$	трендовый коэффициент активного таяния (k из $kx + b$)
	13.6	$melt_active_{time}$	продолжительность активного таяния
	13.7	$melt_active_{time} \%$	продолжительность активного таяния в процентах от количества дней со снежным покровом
	13.8	$melt_active_{speed}$	скорость активного таяния, мм/день
	13.9	$melt_passive_{TC}$	трендовый коэффициент пассивного таяния (k из $kx + b$)
	13.10	$melt_passive_{time}$	продолжительность пассивного таяния
	13.11	$melt_passive_{time} \%$	продолжительность пассивного таяния в процентах от количества дней со снежным покровом
	13.12	$melt_passive_{speed}$	скорость пассивного таяния, мм/день
<i>F</i> -14 Характеристики летней влажности почвы	14.1	$swvl_{21-30.06}$	влажность почвы последней декады июня
	14.2	$swvl_{21-31.07}$	влажность почвы последней декады июля
	14.3	$swvl_{21-31.08}$	влажность почвы последней декады августа

Таблица Б.1 – Продолжение

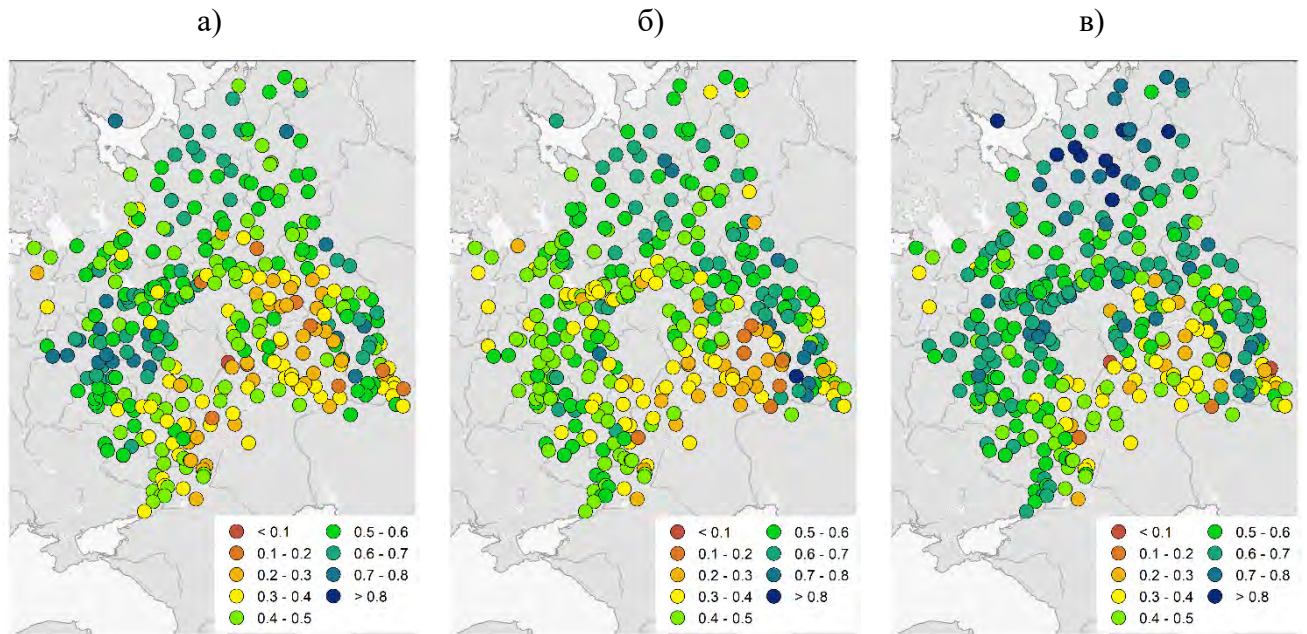
Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-14 (продолжение)	14.4	<i>swvl lin</i> _{21-30.06}	линейная влажность почвы последней декады июня
	14.5	<i>swvl lin</i> _{21-31.07}	линейная влажность почвы последней декады июля
	14.6	<i>swvl lin</i> _{21-31.08}	линейная влажность почвы последней декады августа
	14.7	<i>swvl type</i> _{21-30.06}	класс сухости почвы последней декады июня
	14.8	<i>swvl type</i> _{21-31.07}	класс сухости почвы последней декады июля
	14.9	<i>swvl type</i> _{21-31.08}	класс сухости почвы последней декады августа
F-15 Характеристики предзимней влажности почвы	15.1	<i>swvl</i> _{31.10}	влажность почвы на 31 октября
	15.2	<i>swvl lin</i> _{31.10}	линейная влажность почвы на 31 октября
	15.3	<i>swvl type</i> _{31.10}	класс сухости почвы на 31 октября
	15.4	<i>swvl</i> _{10d before sd_start}	влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова
	15.5	<i>swvl lin</i> _{10d before sd_start}	линейная влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова
	15.6	<i>swvl type</i> _{10d before sd_start}	класс сухости почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова
F-16 Характеристики влажности почвы конца зимы	16.1	<i>swvl</i> _{21-31.03}	влажность почвы последней декады марта
	16.2	<i>swvl</i> _{21-28.02}	влажность почвы последней декады февраля
	16.3	<i>swvl lin</i> _{21-31.03}	линейная влажность почвы последней декады марта
	16.4	<i>swvl lin</i> _{21-28.02}	линейная влажность почвы последней декады февраля
	16.5	<i>swvl type</i> _{21-31.03}	класс сухости почвы последней декады марта
	16.6	<i>swvl type</i> _{21-28.02}	класс сухости почвы последней декады февраля
	16.7	<i>swvl</i> _{10d BW_end}	влажность почвы за 10 дней до конца зимы
	16.8	<i>swvl lin</i> _{10d BW_end}	линейная влажность почвы за 10 дней до конца зимы
	16.9	<i>swvl type</i> _{10d BW_end}	класс сухости почвы за 10 дней до конца зимы
	16.10	<i>swvl</i> _{10d AW_end}	влажность почвы за 10 дней после конца зимы
	16.11	<i>swvl lin</i> _{10d AW_end}	линейная влажность почвы за 10 дней после конца зимы
	16.12	<i>swvl type</i> _{10d AW_end}	класс сухости почвы за 10 дней после конца зимы

Таблица Б.1 – Продолжение

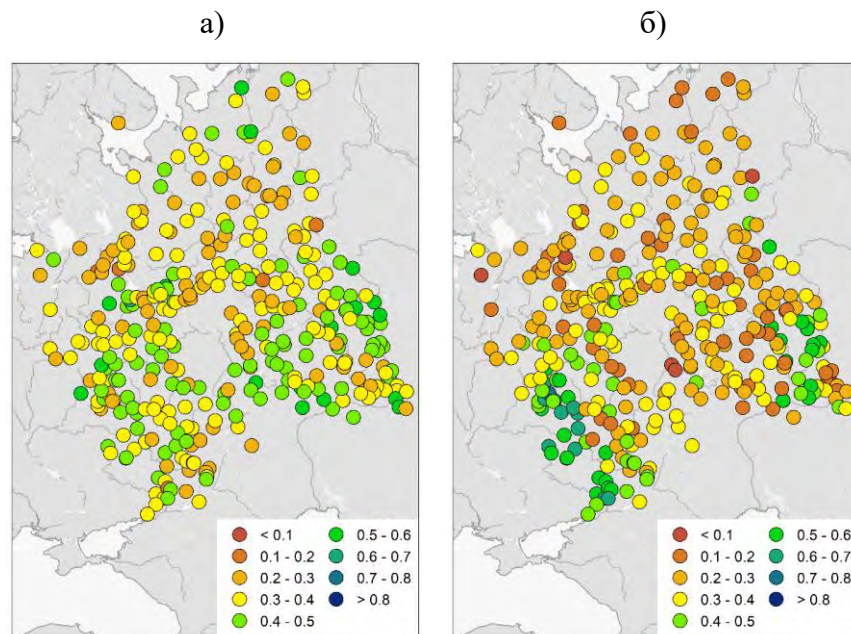
Группа	№ характеристики	Обозначение	Описание
F-16 (продолжение)	16.13	<i>winter_start</i>	порядковый номер дня в году первого перехода температуры через ноль
	16.14	<i>winter_end</i>	порядковый номер дня в году последнего перехода температуры через ноль
	16.15	<i>swvl</i> _{10d before sd_end}	влажность почвы за 10 дней перед сходом снежного покрова
	16.16	<i>swvl_lin</i> _{10d before sd_end}	линейная влажность почвы за 10 дней перед сходом снежного покрова
	16.17	<i>swvl_type</i> _{10d before sd_end}	класс сухости почвы за 10 дней перед сходом снежного покрова
	16.18	<i>swvl</i> _{10d after sd_end}	влажность почвы за 10 дней после схода снежного покрова
	16.19	<i>swvl_lin</i> _{10d after sd_end}	линейная влажность почвы за 10 дней после схода снежного покрова
	16.20	<i>swvl_type</i> _{10d after sd_end}	класс сухости почвы за 10 дней после схода снежного покрова
F-17 Экстремумы влажности почвы	17.1	<i>swvl</i> _{max_10d}	максимальная 10-дневная влажность почвы
	17.2	<i>swvl</i> _{min_10d}	минимальная 10-дневная влажность почвы
	17.3	<i>swvl_day</i> _{max_10d}	порядковый номер дня в году с максимальной 10-дневной влажностью почвы
	17.4	<i>swvl_day</i> _{min_10d}	порядковый номер дня в году с минимальной 10-дневной влажностью почвы
	17.5	<i>swvl_lin</i> _{max_10d}	максимальная 10-дневная линейная влажность почвы
	17.6	<i>swvl_lin</i> _{min_10d}	минимальная 10-дневная линейная влажность почвы
	17.7	<i>swvl_lin_day</i> _{max_10d}	порядковый номер дня в году с максимальной 10-дневной линейной влажностью почвы
	17.8	<i>swvl_lin_day</i> _{min_10d}	порядковый номер дня в году с минимальной 10-дневной линейной влажностью почвы
	17.9	<i>swvl_type</i> _{max_10d}	максимальный 10-дневный класс сухости почвы
	17.10	<i>swvl_type</i> _{min_10d}	минимальной 10-дневный класс сухости почвы
	17.11	<i>swvl_type_day</i> _{max_10d}	порядковый номер дня в году с максимальным 10-дневным классом сухости почвы
	17.12	<i>swvl_type_day</i> _{min_10d}	порядковый номер дня в году с минимальным 10-дневным классом сухости почвы

Приложение В

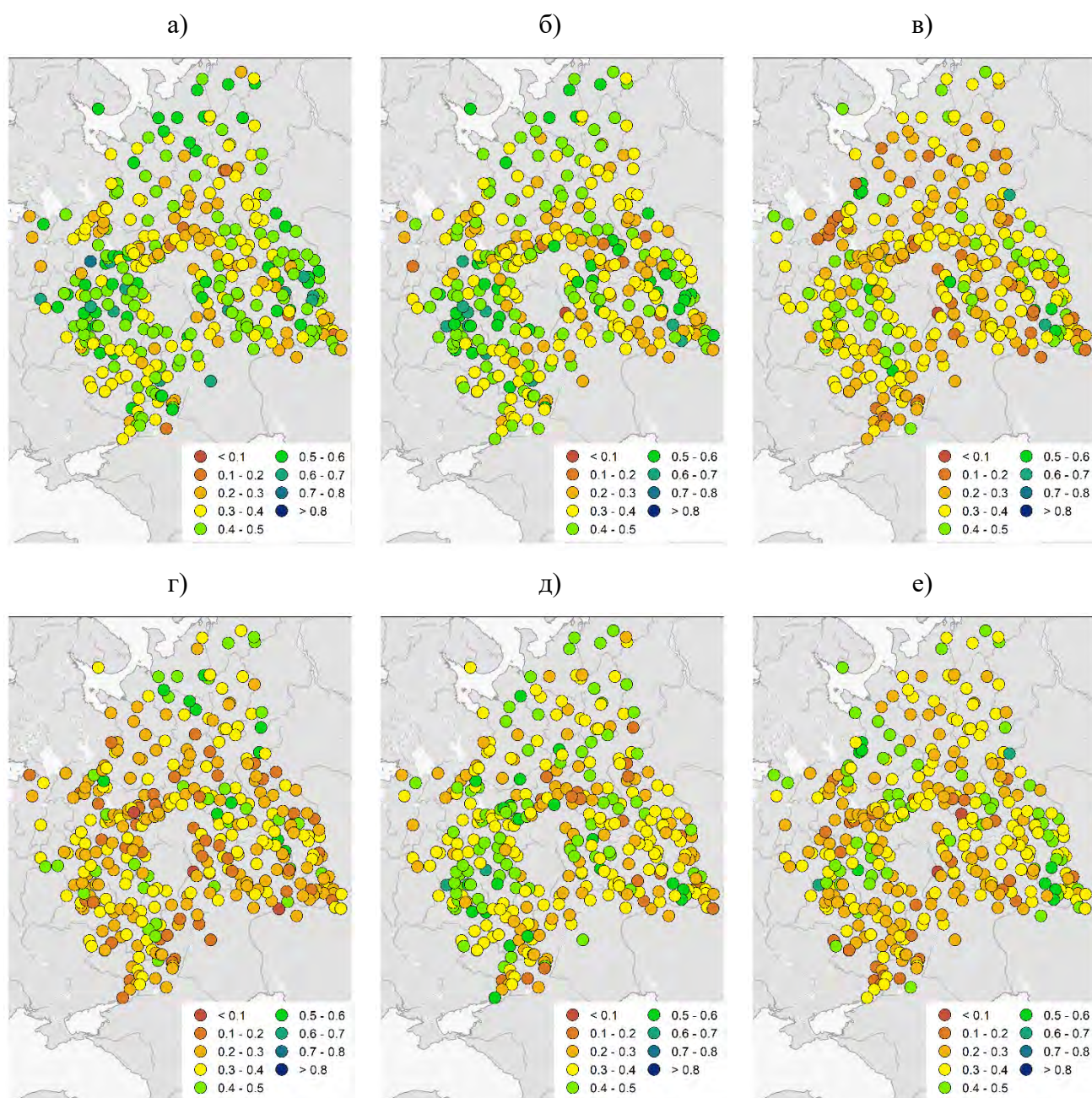
Пространственное распределение максимальных коэффициентов корреляции слоя стока
за половодье с разными группами факторов



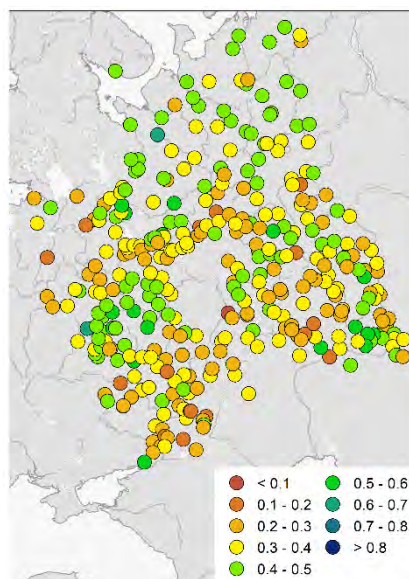
Приложение В.1 – Пространственное распределение максимального коэффициента корреляции $R_{\max}$ слоя стока за половодье с характеристиками групп $F-1$ (а), $F-2$ (б) и $F-3$ (в)



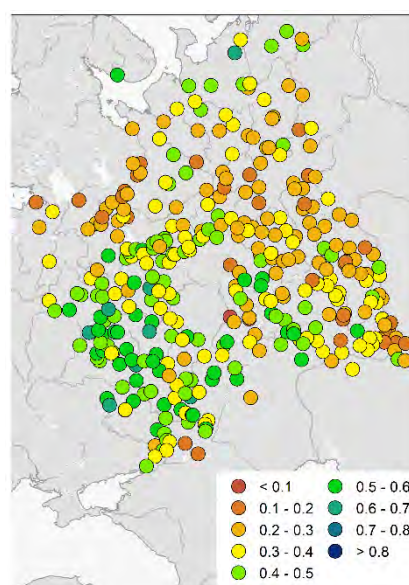
Приложение В.2 – Пространственное распределение максимального коэффициента корреляции $R_{\max}$ слоя стока за половодье с характеристиками групп $F-4$ (а) и $F-5$ (б)



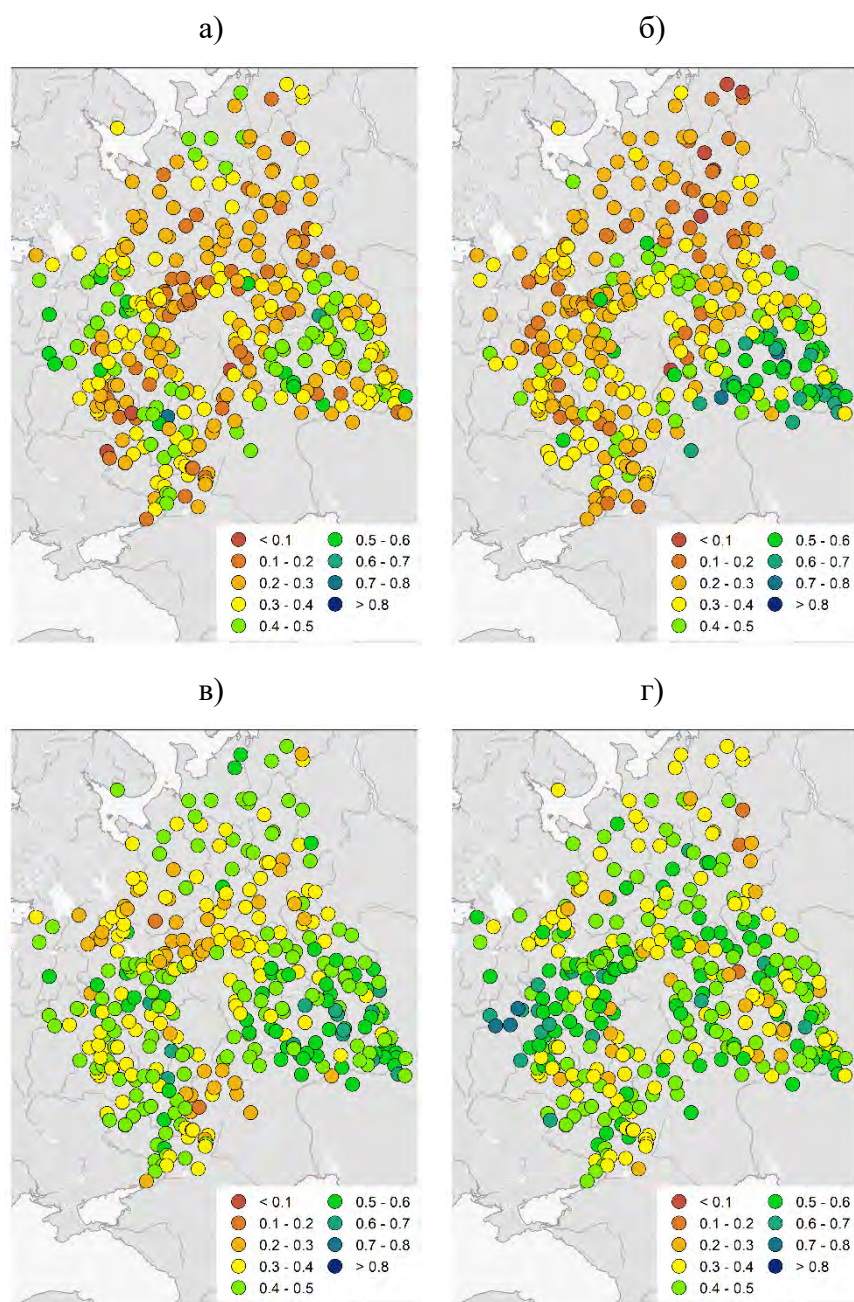
Приложение В.3 – Пространственное распределение максимального коэффициента корреляции $R_{\max}$ слоя стока за паводке с характеристиками групп $F-6$ (а), $F-7$ (б), $F-8$ (в), $F-9$ (г), $F-10$ (д), $F-11$ (е)



Приложение В.4 – Пространственное распределение максимального коэффициента корреляции $R_{\max}$ слоя стока за половодье с характеристиками группы $F-12$



Приложение В.5 – Пространственное распределение максимального коэффициента корреляции $R_{\max}$ слоя стока за половодье с характеристиками группы $F-13$



Приложение В.6 – Пространственное распределение максимального коэффициента корреляции $R_{\max}$ слоя стока за половодье с характеристиками групп $F-14$ (а), $F-15$ (б), $F-16$ (в) и $F-17$ (г)

Приложение Г

Таблица Г.1. Состав уравнений для вложенных водосборов в пределах ЕТР

Река	Пост	ФФС-1	ФФС-2	ФФС-3
Пинега	Засурье	<i>SnowTP</i>	<i>TPsum</i> _{10.02-SP10}	<i>temp_std</i> _{T0-SP}
	Кулогоры		<i>TPsum</i> _{20.02-SP10}	
Северная Двина	Абрамково	<i>SnowTP</i>	<i>TPsum</i> _{01.02-SP10}	<i>temp_Cv</i> _{LAST10}
	Усть-Пинега			<i>temp_Cv</i> _{Smax-S0}
Юг	Кичменгский Городок	<i>SnowTP</i>	<i>TPsum</i> _{10.02-SP10}	<i>melt</i> _{TC}
	Подосиновец			<i>snowbreak</i> _{len_max}
Вага	Филеевская	<i>SnowTP</i>	<i>TPsum</i> _{10.02-SP10}	<i>swvl_type</i> _{10d_before_sd_end}
	Усть-Сюма			<i>temp_std</i> _{Smax-S0}
Клязьма	Владимир	<i>SnowTP</i>	<i>swvl_type</i> _{31.10}	<i>melt_passive</i> _{TC}
	Ковров		<i>swvl_type</i> _{10d_before_sd_start}	<i>swvl_type</i> _{10d_AW_end}
Молома	Пермятское	<i>TPsum</i> _{01.11-SP}	<i>snowbreak</i> _{len}	<i>ThawTP</i> _{SP10}
	Спасское		<i>snowbreak</i> _{len_max}	<i>swvl</i> _{max_10d}
Сухона	Тотьма	<i>TPsum</i> _{20.02-SP10}	<i>SnowTP</i>	<i>swvl</i> _{21-28.02}
	Каликино	<i>TPsum</i> _{01.11-SP}	<i>Smax</i> _{05.01-31.03}	<i>swvl_type</i> _{10d_before_sd_start}
Сысола	Койгородок	<i>SnowTP</i>	<i>swvl</i> _{max_10d}	<i>ThawTP</i> _{LAST10-SP10}
	Первомайский		<i>ThawTP</i> _{LAST10}	<i>TTC</i> _{SP10}
Мезень	Макариб	<i>SnowTP</i>	<i>ThawTP</i> _{Smax-S0}	<i>swvl</i> _{max_10d}
	Большая Пысса		<i>ThawTP</i> _{Smax-T0}	<i>swvl_type</i> _{10d_after_sd_end}
	Малонисогорская		<i>swvl_type</i> _{10d_after_sd_end}	<i>TPsum</i> _{Smax-T0}
Вашка	Вендинга	<i>SnowTP</i>	<i>TPsum</i> _{ESC10-10D}	<i>thaw_temp</i> _{SP10}
	Рещельская (Резя)		<i>temp_std</i> _{T0-SP}	<i>melt_active</i> _{TC}
Печора	Якша	<i>SnowTP</i>	<i>snowbreak</i> _{Cv}	<i>swvl</i> _{10d before sd end}
	Тройко-Печерск		<i>TPsum</i> _{LAST10-SP10}	<i>thaw_temp</i> _{mean_per_thaw}
	Усть-Щугор		<i>swvl_type</i> _{10d AW end}	<i>temp_Cv</i> _{LAST10-SP10}
	Усть-Цильма		<i>thaw</i> _{len_mean}	<i>ThawTP</i>
	Оксино			<i>swvl_type</i> _{10d_after_sd_end}
Ижма	Усть-Ухта	<i>SnowTP</i>	<i>TPsum</i> _{LAST10-SP10}	<i>thaw_temp</i> _{mean_per_thaw}
	Картайоль		<i>ThawTP</i> _{Smax-T0}	<i>temp_std</i> _{Smax-T0}
Унжа	Мантурово	<i>SnowTP</i>	<i>snowbreak</i> _{Cv}	<i>swvl_type</i> _{10d_before_sd_start}
	Макарьев		<i>TPsum</i> _{LAST10-SP10}	<i>swvl_lin</i> _{10d after sd end}
Кама	Гайны	<i>SnowTP</i>	<i>ThawTP</i> _{ESC10-10D}	<i>temp_mean</i> _{T0-SP}
	Бондюг		<i>TPsum</i> _{01.02-SP10}	

Таблица Г.1 – Продолжение

Река	Пост	ФФС-1	ФФС-2	ФФС-3
Иньва	Кудымкар	SnowTP	TPsum _{LAST10-SP10}	winter_end
	Слудка		swvl _{10d before sd_start}	ThawTP
Быстрый Танып	Чернушка	TPsum _{10.02-SP10}	swvl _{21-31.08}	winter_start
	Алтаево		swvl _{21-28.02}	swvl _{21-31.08_type}
Иловля	Александровка	SnowTP	swvl_type _{31.10}	fr_depth _{21-28.02}
	Боровки		ThawTP _{per thaw}	
Сакмара	Верхне-Галеево	range_temp _{LAST10-SP10}	swvl _{21-28.02}	TPsum _{01.02-SP10}
	Акьюлово	TPsum _{01.11-SP}		snowbreak _{len_mean}
	Татарская Каргала			thaw temp _{ESC10-10D}
Ока	Вендерево	Smean _{Smax-T0}	subzero temp _{Cv}	TPsum _{20.02-SP10}
	Костомарово	SnowTP	fr_depth _{mean}	Cv S _{snow period}
	Белев	fr_depth _{mean}	SnowTP	temp_std _{Smax-S0}
	Калуга	SnowTP	swvl_type _{10d before s d_start}	TPsum _{SP10}
	Половское			ThawTP _{LAST10-SP10}
	Муром			swvl_lin _{10d before sd_end}
Оскол	Старый Оскол	fr_depth _{days}	swvl_type _{31.10}	swvl_type _{21-31.07}
	Раздолье	fr_depth _{21-31.03}	SnowTP	thaw temp _{Smax-SP}
Днепр	Болшево	swvl _{max_10rollmean}	SnowTP	swvl _{21-31.08}
	Дорогобуж	Smax	TPsum _{01.11-SP}	swvl _{10d_BW_end}
	Смоленск	Smax _{31.01-28.02}		
Вятка	Красноглинье	TPsum _{01.11-SP}	Smean _{LAST10}	snowbreak _{count}
	Киров	SnowTP	TPsum _{Smax-T0}	temp_std _{SP10}
	Котельнич		TPsum _{10.02-SP10}	temp_mean _{Smax-T0}
	Аркуль		TPsum _{01.02-SP10}	temp_std _{ESC10-10D}
	Вятские Поляны			
Юрюзань	Вязовая	Smean _{SP10}	ThawTP _{LAST10-SP10}	snow_days
	Чулпан	TPsum _{01.11-SP}	snow_days	snowbreak _{count}
	Атняш		TTC _{Smax-T0}	swvl _{10d before sd_end}
Уфа	Нязепетровск	Smean _{Smax-S0}	TPsum _{20.02-SP10}	swvl _{21-28.02}
	Михайловск	SnowTP	swvl_type _{21-28.02}	TPsum _{Smax-S0}
	Красноуфимск		TPsum _{Smax-S0}	Smean _{T0-SP}
	Верхний Суян		SnowTP _{SP10}	temp_std _{SP10}
Онега	Надпорожский Погост	TPsum _{01.02-SP10}	SnowTP	range_temp _{SP10}
	Череповская	TPsum _{10.02-SP10}	swvl _{10d before sd_end}	temp_Cv _{Smax-T0}
	Порог	Smax _{31.01-28.02}	TPsum _{01.02-SP10}	swvl_type _{10d before s d_end}
Медведица	Лысые Горы	melt _{TC}	swvl_type _{31.10}	winter temp _{Cv}
	Арчединская	melt _{speed}	swvl _{10d before sd_start}	fr_depth _{21-31.01}
Чепца	Полом	TPsum _{01.02-SP10}	swvl _{21-31.08}	melt _{time %}
	Глазов	TPsum _{01.11-SP}	Smean _{LAST10-SP10}	thaw temp _{Cv}
Жиздра	Дубровка	Smean _{LAST10}	TPsum _{10.02-SP10}	temp_Cv _{T0-SP}
	Козельск	SnowTP	TPsum _{01.02-SP10}	swvl_type _{10d before s d_start}

Таблица Г.1 – Продолжение

Река	Пост	ФФС-1	ФФС-2	ФФС-3
Сура	Чаадаевка	$snowbreak_{len_max}$	$temp_std_{Smax-S0}$	$SnowTP_{LAST10}$
	Сурское	$snowbreak_{count}$	$fr_depth_{21-31.03}$	$SnowTP_{Cv}$
Вохма	Тихон	$TPsum_{01.02-SP10}$	$melt_{time\ \%}$	$len_{ESC10-10D}$
	Гробовщино	$TPsum_{01.11-SP}$	$snowbreak_{len_max}$	$frozen_days_{uzp}$
Дон	Задонск	fr_depth_{mean}	$TTC_{Smax-S0}$	$TPsum_{01.11-SP}$
	Лиски	$SnowTP$	fr_depth_{max}	$swvl_type_{21-28.02}$
	Казанская	SP_day_{start}	$melt_passive_{TC}$	$swvl_{21-31.03}$
	Беляевский	$melt_passive_{TC}$	$swvl_type_{31.10}$	$Smean_{ESC10-10D}$
Битюг	Мордово	$temp_std_{SP10}$	$melt_active_{speed}$	Cv_Snow_period
	Бобров	$TPsum_{10.02-SP10}$	$melt_{time}$	$swvl_type_{21-28.02}$
Хопер	Пановка	$subzero_temp_{mean}$	$TPsum_{01.11-SP}$	$swvl_lin_{10d\ before\ sd\ start}$
	Балашов	$swvl_{min_10d}$	$frozen_temp_{T0-SP}$	$frozen_temps_{Smax-T0}$
	Поворино		$frozen_temp_{SP10}$	$melt_passive_{TC}$
	Бесплемянновский	$swvl_lin_{10d\ after\ sd\ end}$	$swvl_{31.10}$	$melt_active_{speed}$
	Барминский	$melt_{speed}$	$TPsum_{10.02-SP10}$	$swvl_{10d\ before\ sd\ start}$
Урал	Верхнеуральск	$swvl_{31.10}$	$TPsum_{01.11-SP}$	$thaw_{len_mean}$
	Кизильское	$TPsum_{01.11-SP}$	$swvl_{21-28.02}$	$temp_Cv_{LAST10-SP10}$
	Березовский	$swvl_{31.10}$	$ThawTP_{per\ thaw}$	$ThawTP_{Cv}$
Луза	Обьячево	$TPsum_{01.11-SP}$	$snowbreak_{len}$	$temp_Cv_{ESC10-10D}$
	Красавино	$temp_std_{LAST10}$	$TPsum_{01.02-SP10}$	$snowbreak_{len}$
Вычегда	Помоздино	$SnowTP$	$swvl_day_{max\ 10d}$	$ThawTP_{SP10}$
	Малая Кужба	$TPsum_{01.02-SP10}$	$Smax_{05-28.02}$	$temp_Cv_{LAST10}$
	Федяково	$SnowTP$	$subzero_temp_{Cv}$	$swvl_{21-31.07}$
Пёза	Сафоново	$Smean_{snow_period}$	$TPsum_{20.02-SP10}$	$temp_std_{T0-SP}$
	Игуменово	$SnowTP$	$swvl_{10d\ after\ sd\ end}$	SP_day_{start}
Чагодыща	Анисимово	$SnowTP$	$TPsum_{Smax-S0}$	$snowbreak_{Cv}$
	Мегрино	$Smax_{05-28.02}$	$ThawTP_{Smax-T0}$	$swvl_lin_{21-31.08}$
Межа	Георгиевское	$Ssum$	$TPsum_{10.02-SP10}$	$swvl_{10d\ after\ sd\ end}$
	Загатино	$ThawTP_{Cv}$	$winter_end$	$temp_std_{ECS10-10D}$
Зуша	Новосиль	$subzero_temp_{sum}$	$swvl_{21-31.03}$	Cv_Snow_days
	Мценск	fr_depth_{mean}	$temp_std_{T0-SP}$	$melt_active_{speed}$
Чусовая	Кын	$Smax_{10D}$	$ThawTP$	$thaw_{len_mean}$
	Лямино	$SnowTP$	$ThawTP_{Smax-S0}$	$temp_std_{Smax-S0}$
Белая	Шупша	$SnowTP$	$swvl_{10d\ before\ sd\ start}$	SP_day_{start}
	Арский Камень	$TPsum_{01.11-SP}$	$snowbreak_{len}$	$swvl_{10d\ before\ sd\ start}$
	Стерлитамак	$swvl_type_{31.10}$	$swvl_type_{10d\ AW_end}$	$SnowTP$
	Уфа	$TPsum_{01.11-SP}$	$swvl_{21-31.08}$	$snowbreak_{len}$
	Бирск	$SnowTP$	$TPsum_{10.02-SP10}$	$swvl_{21-31.08}$

Таблица Г.1 – Продолжение

Река	Пост	ФФС-1	ФФС-2	ФФС-3
Ай	Веселовка	$swvl_{10d_after_sd_end}$	$melt_{time_ \%}$	$subzero_temp_{mean}$
	Лаклы	$SnowTP$	$swvl_{min_10d}$	$swvl_type_{10d_before_sd_start}$
	Метели	$TPsum_{01.11-SP}$	$swvl_{10d_before_sd_start}$	$snowbreak_{len}$
Самара	Новосергиевка	$thaw_temp_{mean_per_thaw}$	$subzero_temp_{mean}$	$melt_passive_{time_ \%}$
	Елшанка	$swvl_{21-28.02}$	$ThawTP_{per_thaw}$	$winter_temp_{mean}$
Большой Кинель	Азаматово	$subzero_temp_{mean}$	$swvl_{21-31.03}$	$Cv_S_{snow_period}$
	Тимашево	$swvl_{10d_before_sd_start}$	$melt_active_{speed}$	$temp_std_{Smax-T0}$
Сосна	Беломестная	fr_depth_{mean}	$melt_{TC}$	$TPsum_{01.11-SP}$
	Елец	$subzero_temp_{sum}$	$thaw_days_{Cv}$	$temp_std_{T0-SP}$
Ворона	Чутановка	$temp_std_{T0-SP}$	$swvl_type_{day_{max_10d}}$	$Smean_{ESC10-10D}$
	Борисоглебск	$TPsum_{01.02-SP10}$	$temp_std_{T0-SP}$	$len_{Smax-S0}$
Калитва	Кудиновка	$Smean_{Smax-S0}$	$swvl_{21-31.03}$	$thaw_days_{Cv}$
	Погорелов	$subzero_temp_{sum}$	$swvl_type_{21-31.08}$	$swvl_type_{21-28.02}$

Примечание: цвет граф ФФС-1, ФФС-2 и ФФС-3 назначался в соответствии с Рисунок 4.10.