

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ОСАДКОВ И АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2023 г. В. В. Попова*, **

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: valeria_popova@mail.ru*

***e-mail: popova@igras.ru*

Поступила в редакцию 16.02.2022 г.

После доработки 20.09.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Обсуждаются современные тенденции изменений атмосферных осадков и крупномасштабной атмосферной циркуляции, значимые для сезонной структуры и многолетних изменений стока в речных бассейнах средней полосы и севера европейской территории России (ЕТР). С учетом сезонных вариаций и фазового режима проводится анализ региональных и частотно-временных особенностей изменений атмосферных осадков, их связи с крупномасштабной циркуляцией и проявлений в изменениях годовых и средних месячных расходов в бассейнах рр. Северная Двина, Мезень, Ока и Белая. Изменения количества жидких осадков в периоды установления/разрушения снежного покрова коррелируют с температурой воздуха в указанные сезоны. Их связь с продолжающимся потеплением дает основание расценивать их как тенденцию, в отличие от максимальных расходов и объемов весеннего половодья на севере ЕТР, которые в основном определяются вариациями крупномасштабной циркуляции и носят колебательный характер. Полученные регрессионные и спектральные оценки вклада Скандинавской моды в изменчивость годового стока Северной Двины показывают, что определяющим фактором его колебаний является усиление/ослабление зонального переноса, описываемое этой циркуляционной модой в противофазе.

Ключевые слова: атмосферные осадки, твердая и жидкая фаза, многолетняя изменчивость, региональные особенности, речной сток, сезонные аномалии, крупномасштабная атмосферная циркуляция

DOI: 10.31857/S2587556623010144, **EDN:** LUTRNE

ВВЕДЕНИЕ

К началу третьего десятилетия XXI в. потепление климата распространяется на все регионы России и демонстрирует высокие темпы роста температуры во все сезоны.¹ Наиболее значительные изменения, 3,2°C за 45 лет, наблюдаются зимой на европейской территории России (ЕТР); на северо-западе и вдоль арктического побережья они достигают наиболее высоких значений среди регионов России — около 4,5°C за 45 лет. Существенный рост наблюдается и весной, хотя на ЕТР он ниже по сравнению с Сибирью и Дальним Востоком, около 2°C в среднем по территории. Наряду с ростом осадков (Доклад ..., 2021) потепление этих сезонов приводит к изменениям их фазовой структуры и сокращению периода снежной аккумуляции (Попова и др., 1918; Шмакин, 2010). В летний и осенний сезоны потепление запаздывало примерно на 10 лет, но в целом за 1976–2020 гг. демонстрирует высокие темпы —

2,1°C и 2,5°C, а также отличается большим по сравнению с другими сезонами вкладом на фоне межгодовой изменчивости. Последнее говорит об усилении воздействия этих сезонов на увлажнение речных бассейнов и их состояние к началу зимы, особенно на фоне наблюдающейся тенденции к дефициту осадков на юге ЕЧР.²

Изменения термического режима, характеризующиеся частыми оттепелями, уменьшением промерзания почв и сокращением периода залегания снежного покрова, способны существенно изменить сезонную структуру стока. В условиях умеренных широт вклад осадков в формирование аномалий речного стока также может значительно различаться в зависимости от фазового состояния. В связи с этими климатическими изменениями на большей части Европейской территории России отмечается увеличение водности межени и сокращение объема половодья (Георгиевский, Шалыгин, 2012; Фролова и др., 2015a; Dzhamalov

¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

² Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

et al., 2015).³ Аномалии зимнего стока на юге бассейна Верхней Волги в 1980–2005 гг. по данным (Алексеевский и др., 2013) достигали 50–100% (по сравнению с таковыми за предшествующее 30-летие), практически не имея аналогов в XX в.

Нарушение однородности многолетних рядов зимнего стока Волги вследствие повышения температуры зимних месяцев констатируется и другими исследователями (Болгов и др., 2014). Другая сторона этой тенденции может проявляться в снижении рисков экстремальных гидрологических явлений вследствие уменьшения высоты и объемов половодья (Попова и др., 2019; Фролова и др., 2015а).

С начала текущего столетия на большей части ЕЧР тенденция к росту увлажненности и увеличению годового стока сохраняется, хотя и не выходит за пределы межгодовой изменчивости (Второй ..., 2014; Гельфан и др., 2021). Изучение сценарных прогнозов изменений водного режима рек конца XXI в. (Гельфан и др., 2021; Laine et al., 2014) подтверждает выводы Второго оценочного доклада Росгидромета⁴ о вероятном незначительном повышении нормы годового стока для большей части территории России при умеренных сценариях антропогенного потепления в XXI в. Несмотря на закономерный рост осадков, связанный с потеплением климата, аномалии атмосферных осадков отличаются значительной пространственной и временной неоднородностью, связанной с вариациями атмосферной циркуляции (Попова, 2021; Ророва, 2007; Vihma et al., 2016). Внутренняя климатическая изменчивость может быть причиной возникновения неблагоприятных гидрологических ситуаций для экономики и окружающей среды. Примером таких ситуаций может быть 2014 г., отмеченный маловодьем в бассейне Северной Двины (Фролова и др., 2015а)⁵, а также резким снижением водности в бассейне Волги, повлекшим нарушение условий судоходства и его временную отмену на ряде участков⁶.

Основываясь на результатах анализа изменений составляющих водного баланса в крупных речных бассейнах ЕР, исследователи (Григорьев и др., 2018) обращают внимание на простран-

ственную неоднородность изменений речного стока в бассейнах, находящихся в близких климатических условиях, и необходимость ее учета в гидрологических прогнозах. Регионализация изменчивости осадков и толщины снежного покрова и ее связь с циркуляционными модами (Попова, 2021; Ророва, 2007) показывает, что эта неоднородность может быть связана с региональной структурой изменчивости стока твердых осадков и основным определяющим ее фактором – крупномасштабной атмосферной циркуляцией.

Цель данной работы – выявление закономерностей пространственного распределения современных тенденций климатических аномалий ЕТР значимых для увлажнения и речного стока и выявлении ведущих циркуляционных факторов подобных аномалий. Среди задач исследования выделены: изучение региональной структуры аномалий твердых и жидких осадков и ответственных за их формирование мод крупномасштабной атмосферной циркуляции, а также их проявлений в изменчивости речного стока на примере бассейнов Северной Двины и Мезени, а также притоков Волги – Оки и Белой, не испытывающих существенного антропогенного воздействия в верхнем течении.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Месячные суммы жидких и твердых осадков рассчитывались на основе суточных данных об осадках и температуре приземного воздуха из архива ВНИИГМИ МЦД (<http://www.meteo.ru>), полученных из наблюдений на 64 метеостанциях (рис. 1) Европейской России за 1970–2018 гг. Указанные станции прошли предварительный отбор, условием которого была однородность рядов и не более 15% пропусков в наблюдениях. Критерием для определения фазы осадков принималась средняя суточная температура, пороговое значение установлено из результатов моделирования снежного покрова и его верификации для разных физико-географических условий (Шмакин и др., 2009). Осадки учитывались как “жидкие”, если средняя суточная температура превышала +1°C. На основе многолетних рядов месячных осадков рассчитывались сезонные и годовые суммы с учетом твердой и жидкой фазы, а также аномалии от средних значений за 1970–2018 гг., которые затем интерполировались с разрешением 2.5×2.5 градуса, что соответствует плотности сети метеостанций. Были получены многолетние ряды аномалий указанных характеристик осадков в регулярной сетке; на следующем этапе для выявления пространственно-временной структуры и получения объективной основы для районирования изучаемой территории по однородности колебаний осадков проводился анализ эмпирических ортогональных функций (ЭОФ).

³ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.

⁴ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.

⁵ Государственный доклад о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2014 г. М.: НИИ-Природа, 2015. 270 с.

⁶ <https://iz.ru/880522/evgeniipriemskaja/bez-vody-vinovatyeh-schem-sviazanovesennoe-obmelenie-volgi>; Морские вести России, 2016. <http://www.morvesti.ru/news/1679/55690/>.

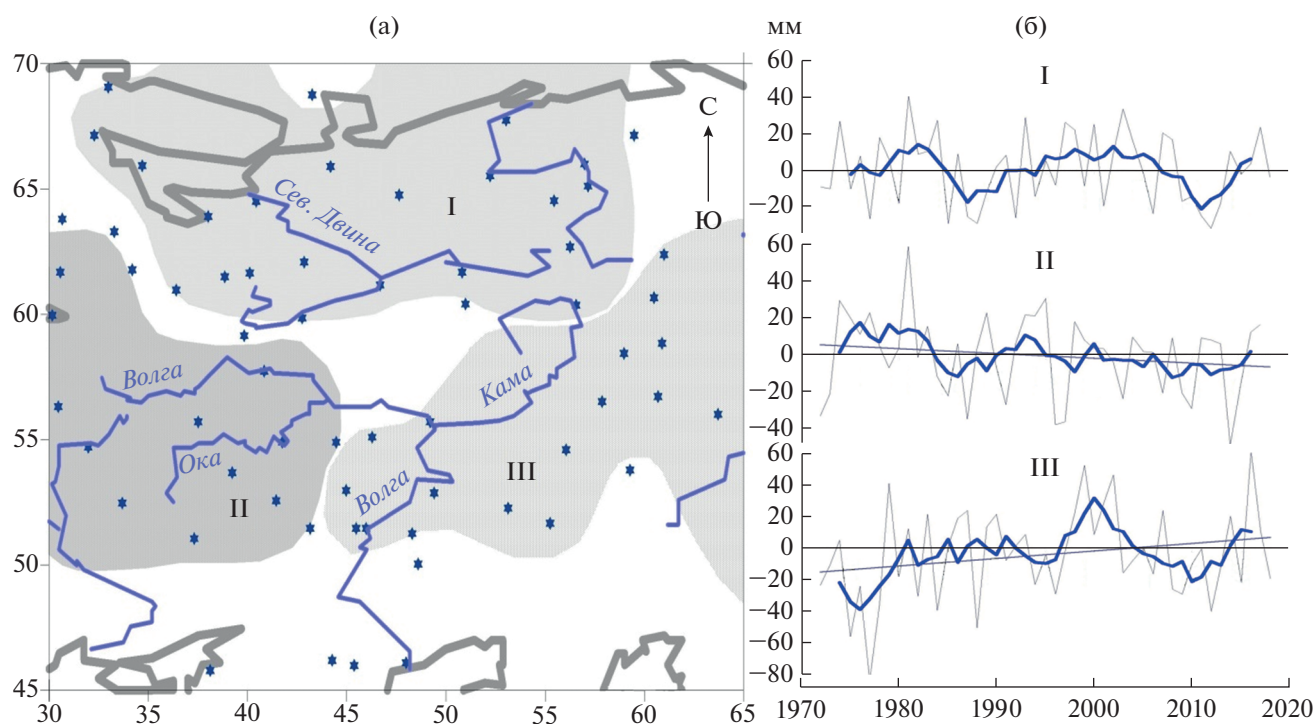


Рис. 1. Районы, однородные по характеру колебаний годовых сумм твердых осадков (заливка, I, II, III — номера районов, звездочками обозначено расположение сети метеостанций) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

Согласно ранее разработанной методики (Попова, 2009), основные критерии для выделения таких районов состоят в следующем: количество районов определяется числом эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) и соответствующих главных компонент (ГК), которые должны описывать не менее 50% общей изменчивости исследуемых временных рядов (1); пространственная локализация района определяется положением очага ЭОФ, в пределах которого корреляция между соответствующей ГК и временными рядами в каждой ячейке регулярной сетки не менее 0.5 (2); корреляция между временными рядами внутри каждого из районов должна быть выше, чем за его пределами (2). Полученные районы в указанных на рис. 1–4 границах, соответствуют перечисленным требованиям (в отличие от узких зон между выделенными районами, которые являются переходными). Далее, путем осреднения по площади выделенных районов были получены многолетние, 1972–2018 гг., ряды сезонных и годовых сумм осадков, отражающие основные тенденции и частотно-временные особенности их изменений на европейской части России.

Для сопоставления аномалий осадков и сезонных аномалий речного стока проводился анализ гидрографов для речных бассейнов: Северная

Двина (Усть-Пинега) и Мезень (Малонисогорская), а также притоки Волги — Ока (в створе Калуга) и Белая (Бирск), не испытывающих существенного антропогенного воздействия в верхнем течении (Георгиади и др., 2013). Осреднение месячных расходов проводилось по десятилетиям за 1971–2019 гг. (1971–1980, 1981–1990, 1991–2000, 2001–2010), а также за 9 лет с начала 2010-х годов (2011–2019). Пропуски в данных, которые присутствовали в рядах наблюдений за расходами Северной Двины в отдельные месяцы в период 2008–2019 г., восстанавливались с использованием данных в створе Абрамково (АИС ГМВО, 2022, <https://gmvo.skniivh.ru/>). Данные средних годовых расходов Северной Двины за 2002–2012 гг., которые использовались для анализа связи с изменениями атмосферной циркуляцией, получены из опубликованных источников (Алексеевский и др., 2015).

Для изучения циркуляционных факторов изменчивости осадков использовались данные из архива *Northern Hemisphere Teleconnection Patterns* (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Рассматривались циркуляционные моды и их многолетние ряды (индексы), значимые для изучаемой территории с точки зрения расположения их центров действия (ЦДА) и влияния на направление переноса воз-

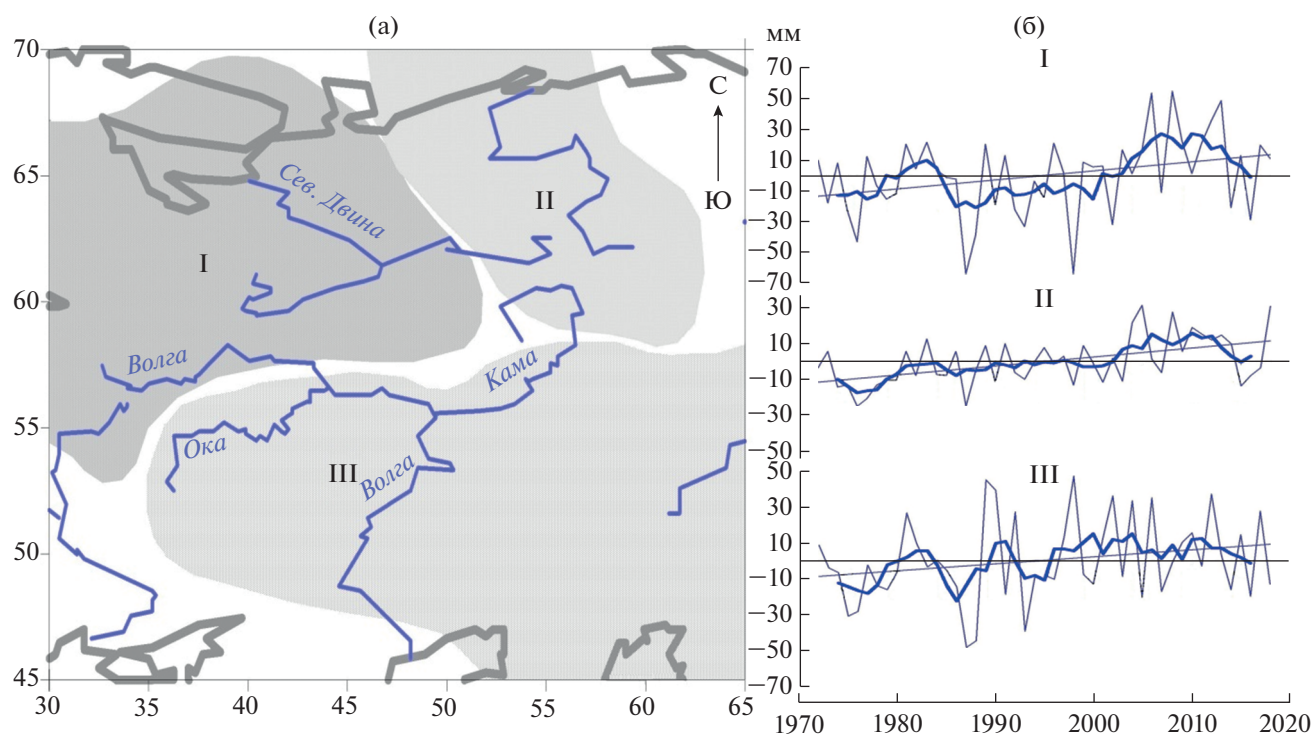


Рис. 2. Районы, однородные по характеру колебаний аномалий сумм жидких осадков за октябрь–декабрь (заливка, I, II, III — номера районов) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

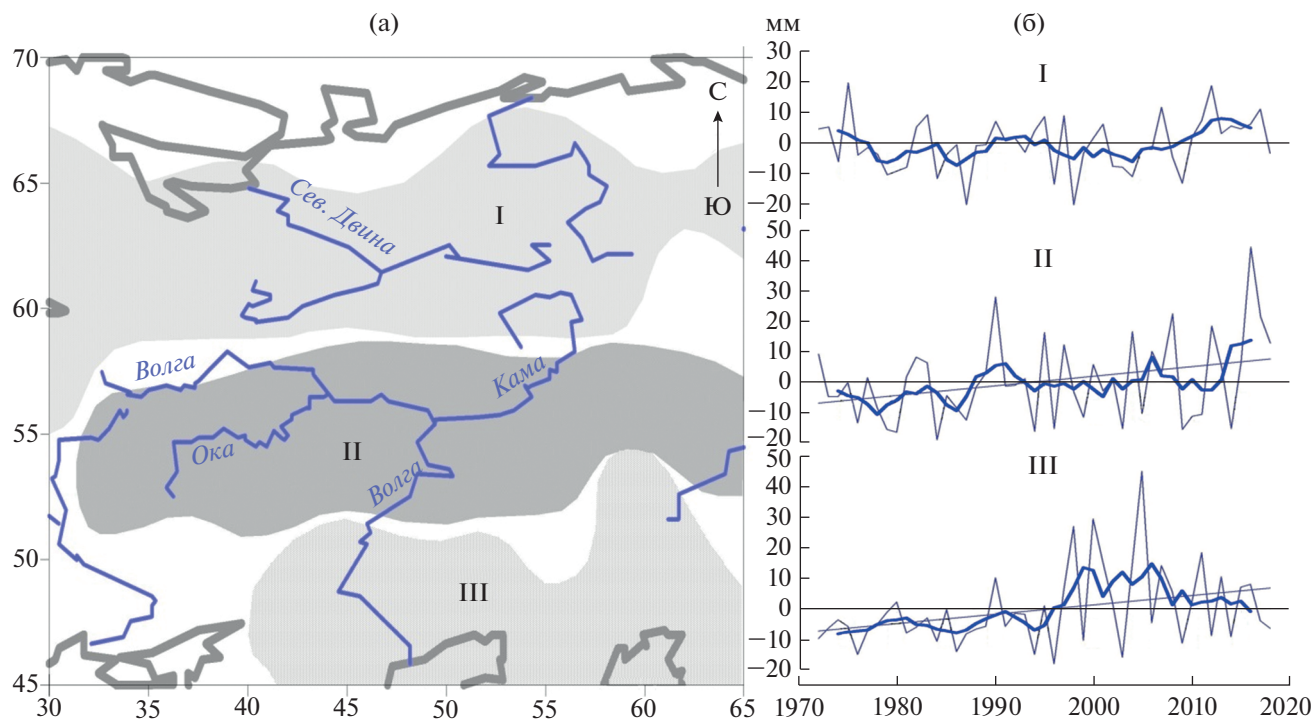


Рис. 3. Районы, однородные по характеру колебаний аномалий сумм жидких осадков за февраль–апрель (заливка, I, II, III — номера районов) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

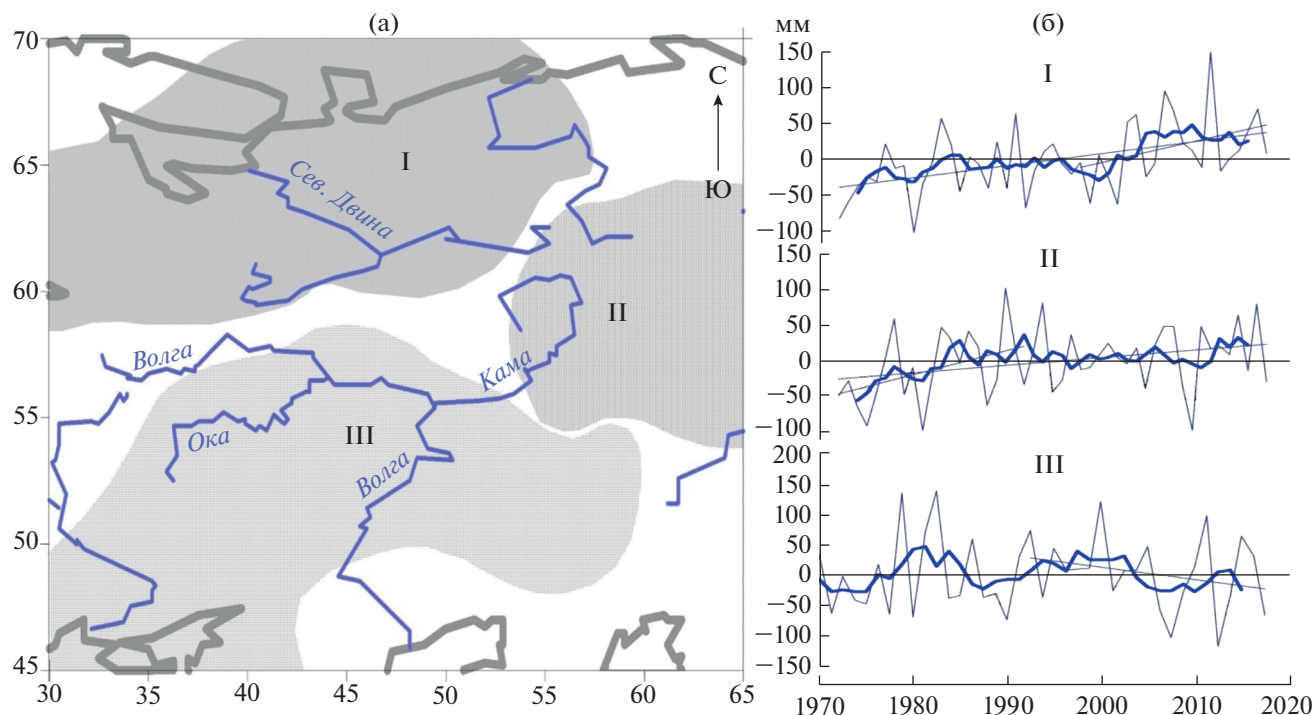


Рис. 4. Районы, однородные по характеру колебаний аномалий сумм жидких осадков за май–сентябрь (заливка, I, II, III – номера районов) (а) и их многолетний ход (б) в среднем по районам за 1980–2018 гг.

Примечание: показаны годовые и 5-летние скользящие средние значения, прямыми линиями обозначены линейные тренды.

душных масс. Анализировалось пространственное распределение корреляции циркуляционных индексов с сезонными осадками, а также регрессионная зависимость годового стока Северной Двины от изменчивости индексов атмосферной циркуляции за 1950–2017 гг. Для получения регрессионной модели стока временные ряды циркуляционных индексов и средних годовых расходов предварительно сглаживались путем 3-летнего скользящего осреднения. Для изучения способности регрессионной модели воспроизводить особенности частотно-временной структуры годового стока Северной Двины проводился анализ спектральных функций (по методу разложения Фурье) наблюдаемого и рассчитанного стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Региональные особенности изменений твердых и жидких осадков на севере Европейской России и их проявление в сезонной структуре речного стока. Анализ эмпирических ортогональных функций и проведенное на его основе районирование изменчивости сумм твердых и жидких осадков (рис. 1–6) демонстрируют особенности пространственного распределения тенденций этих климатических характеристик за последние десятилетия (1972–2018 гг.).

В пределах ЕТР выделяется три района, отличающихся по характеру колебаний годовых сумм твердых осадков (см. рис. 1а), которые условно можно обозначить как север (I), запад (II) и восток (III). Каждый из них представляет собой естественный район, в пределах которого связанность колебаний осадков (в данном случае в твердой фазе) выше, чем за его пределами, осреднение их многолетних рядов в пределах района дает характерный для рассматриваемого района многолетний ход (см. рис. 1б).

Территория ЕТР севернее 60-й параллели, от Белого моря до Урала, представляет собой единый район (I), куда входят бассейны северных рек, включая наиболее крупные – Северную Двину и Печору. Анализ многолетнего хода твердых осадков в районе I указывает на отсутствие линейного тренда (см. рис. 1б); основная изменчивость в этом районе связана с высокочастотными, 2–5-летними колебаниями, а также продолжительными аномалиями – положительными в 1973–1984 гг. (10–40 мм) и 1993–2007 гг. (20–30 мм), и отрицательными в 1985–1992 гг. (около 20 мм) и 2009–2013 гг. (20–30 мм). С этими флуктуациями, периодичностью 20–25 лет, очевидно связан основной вклад в изменчивость твердых осадков на севере ЕР.

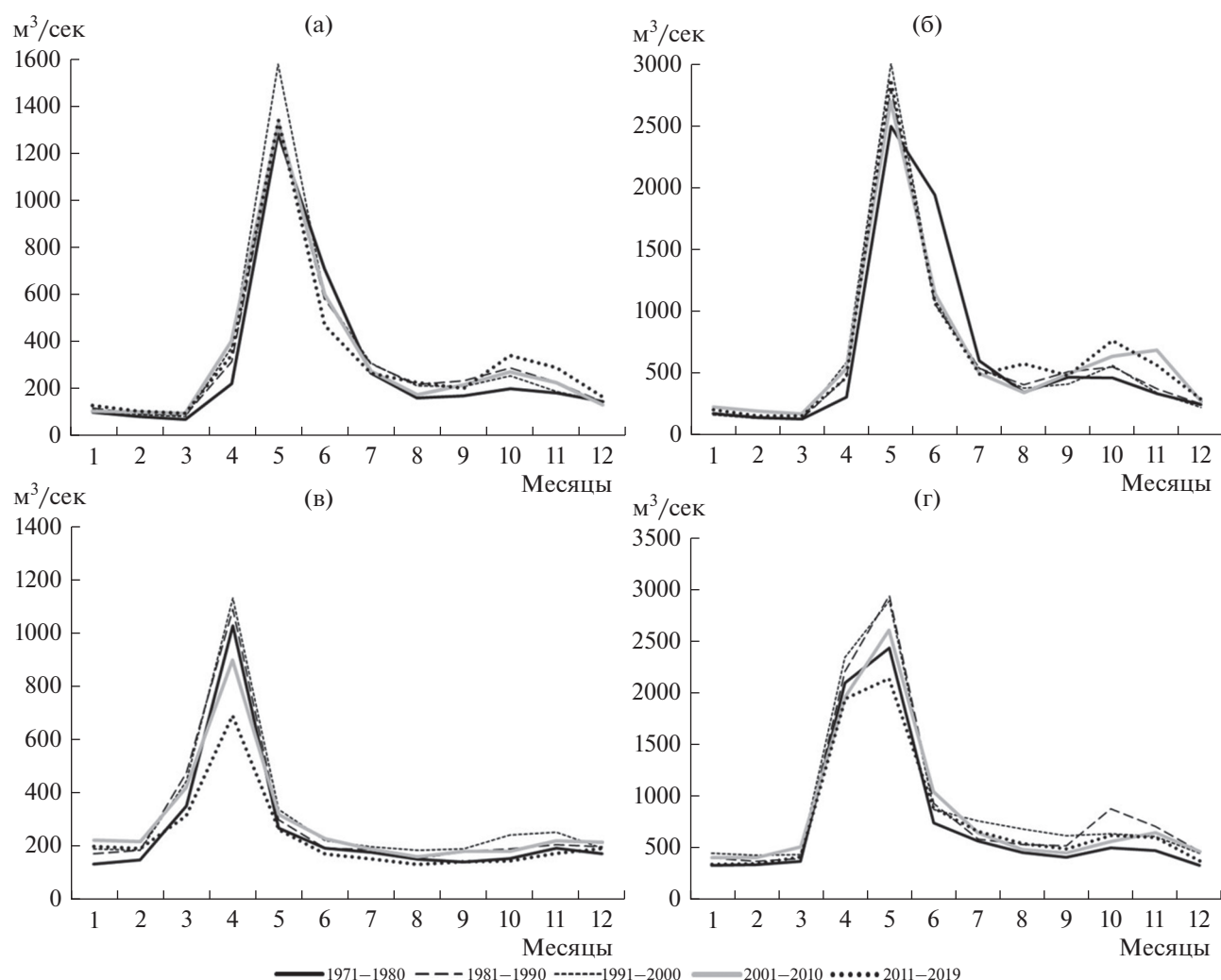


Рис. 5. Годовой ход средних месячных расходов рек, м³/с: (а) Северная Двина (Усть-Пинега)*, (б) Мезень (Малонисогорская)*, (в) Ока (Калуга), (г) Белая (Бирск).

Примечание. Показаны средние расходы за 1971–1980, 1981–1990, 1991–2000 гг., 2001–2010 и 2011–2019 гг. *Пропуски в данных в 2002–2007 гг.

На западе и на востоке средней полосы ЕТР многолетние тренды твердых осадков имеют противоположную направленность. Они не выходят за пределы межгодовой изменчивости (средне-

квадратического отклонения), т.е. статистически не значимы (см. рис. 16, табл. 1), но могут быть чувствительными для природной среды и формирования запасов влаги. В отличие от севера ЕТР

Таблица 1. Стандартное отклонение, σ , и параметры линейного тренда, B и R^2 , атмосферных осадков в твердой, P_{sol} , и жидкой, P_{liq} , фазах в пределах районов* однородных колебаний осадков за 1972–2018 гг.

	P_{sol} , год. сумма			P_{liq} , октябрь–декабрь			P_{liq} , февраль–апрель			P_{liq} , май–сентябрь		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
σ , мм	19	23	29	26	13	23	14	13	10	59	45	49
B , мм/46 лет	—	12	23	20	18	14	—	15	15	39	32	–31
R^2 , %	—	3	5	11	25	5	—	10	11	6	4	3

Примечание. Выделены статистически значимые параметры линейного тренда на уровне $p < 0.05$. *Положение районов для указанных характеристик – P_{sol} , год. сумма; P_{liq} , октябрь–декабрь; P_{liq} , февраль–апрель; P_{liq} , май–сентябрь, указано на рис. 1–4.

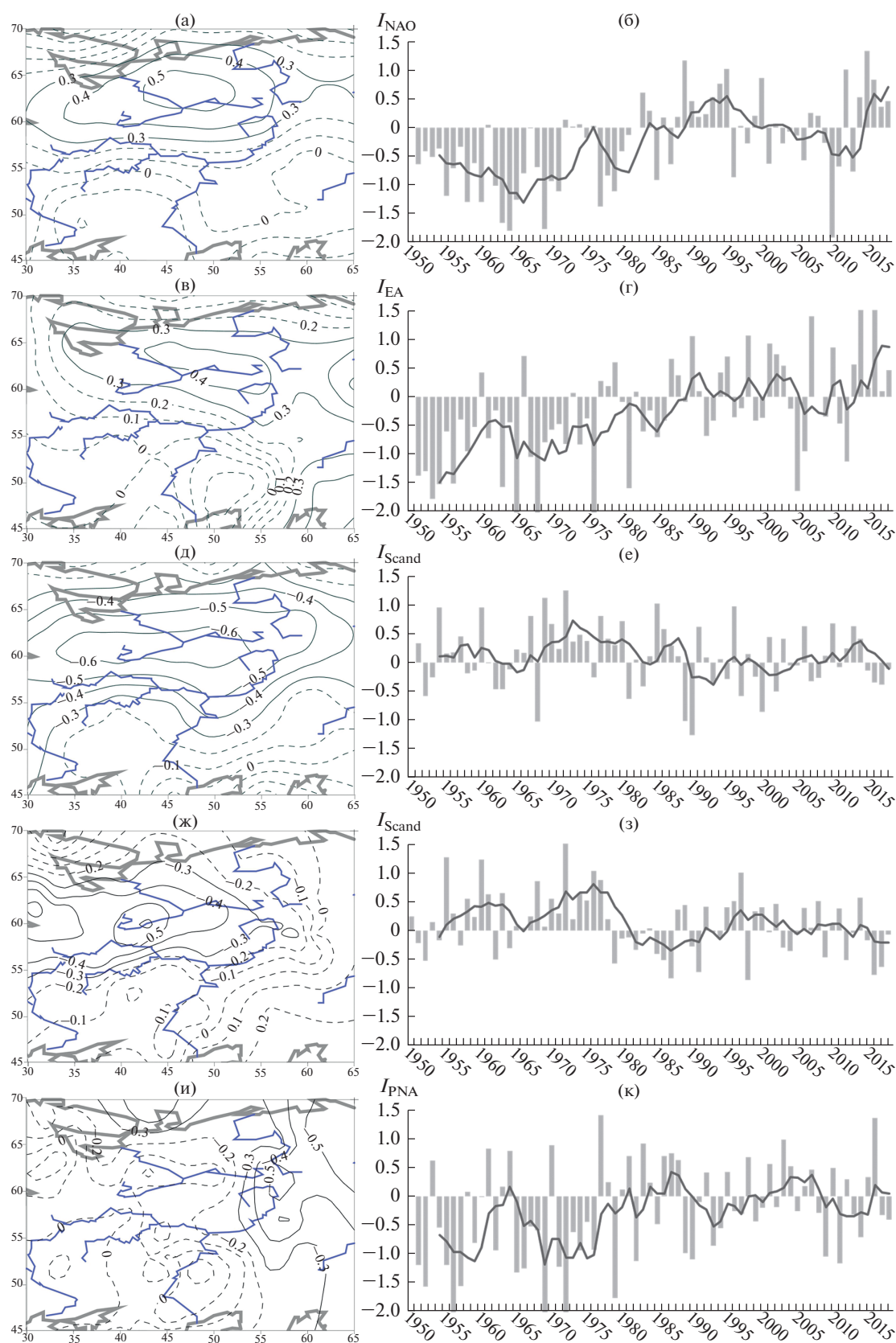


Рис. 6. Коэффициенты корреляции сумм осадков за декабрь–март (а, в, д) и май–октябрь (ж) с циркуляционными индексами NAO (а), EA (в), Scand (д, ж) и многолетние изменения указанных индексов (б, г, е, з). Пунктиром показаны изолинии статистически незначимых коэффициентов корреляции ($p \leq 0.05$).

(район I), в районах II и III основной вклад в изменчивость годовых сумм твердых осадков вносят межгодовые колебания, хотя флуктуации с периодом 20–25 лет достаточно заметны, особенно на востоке, в районе III, с середины 1990-х годов.

На западе, в районе II, который включает бассейны Верхней Волги, наблюдается закономерное в эпоху потепления сокращение осадков в твердой фазе, которое коррелирует с приповерхностной температурой в конце осени и соответствует аномалиям сроков установления снежного покрова (Попова и др., 2018). Рост годовых сумм твердых осадков на востоке ЕТР, около 20 мм за 47 лет, по-видимому, связан с усилением арктических вторжений со стороны Сибири в конце 1990-х — начале 2000-х, т.е. с периодом, так называемого “перерыва в потеплении”. Циркуляционные условия подобных вторжений и их связь с сокращением ледяного покрова Баренцева и Карского морей активно обсуждается в последние годы (Попова, 2020; Семенов, 2016; Mori et al., 2019).

Известно, что на фоне потепления зимнего сезона дефицит твердых осадков может быть обусловлен ростом температуры в переходные сезоны и сокращением периода отрицательных температур, и связан с перераспределением их количества “в пользу” жидких осадков. Анализ тенденций в ходе *жидких осадков в период осенне-зимнего межсезонья, октябрь–декабрь*, иллюстрирует это перераспределение и позволяет оценить его пространственные и временные масштабы (см. рис. 2).

В этом случае, северная половина ЕТР оказывается разделенной на два района, I и II (см. рис. 2а), примерно по 50-му меридиану. На северо-западе, в районе I, куда входят большая часть бассейна Северной Двины, существенный рост жидких осадков в предзимье, около 30 мм с начала 1970-х годов, связан, главным образом, с длительной аномалией с середины 2000-х, с максимумами до 50 мм в 2006, 2008, 2012, 2013 гг. Из-за высокой межгодовой изменчивости доля тренда в общей изменчивости здесь превышает не 10% (см. рис. 2б, табл. 1), в то же время средняя аномалия в 2005–2013 гг. статистически значимо (на уровне $p < 0.05$) отличается от среднего за предшествующие 30 лет. На востоке, в районе II, куда входят бассейн Печоры и верховья Северной Двины и Мезени, в этот период также наблюдается аномалия жидких осадков с максимумом около 30 мм в 2004–2005 гг. Несмотря на то, что в среднем она не превышает 15 мм, на фоне небольшого разброса межгодовых значений тренд (см. табл. 1), 20 мм за 47 лет, вносит существенный вклад, 25%, в общую изменчивость и, в отличие от северо-запада, достигает уровня статистической значимости ($p < 0.05$).

Наличие тесной связи аномалий жидких осадков за октябрь–декабрь с приземной температурой

подтверждает роль потепления осенне-зимнего межсезонья в росте аномалий жидких осадков и сокращении количества осадков, выпадающих в виде снега. На западе, в районе I, связь жидких осадков со средней температурой в октябре–ноябре достигает 0.78, при этом основной вклад вносит ноябрь (коэффициент корреляции 0.68). В районе II, с ростом континентальности на восток, большее влияние на рост жидких осадков оказывают температурные аномалии октября (коэффициент корреляции 0.57), связь жидких осадков со средней температурой за октябрь–ноябрь выше, но незначительно (0.63).

На юге ЕТР, в районе III, который охватывает бассейны Оки, Белой, а также Средней Волги и Дона, существенный рост жидких осадков в период межсезонья наблюдался в первые десятилетия современного потепления. В 1972–2000 гг. он составлял 25 мм, а за 1972–2018 гг. — только 14 мм. Отсутствие тренда жидких осадков на юге ЕТР с начала 2000-х годов, по-видимому, означает переход к режиму выпадения преимущественно жидких осадков (см. рис. 2б).

В период снеготаяния (февраль–апрель), на территории ЕТР выделяются три района, различающихся по типу многолетнего хода и тенденций жидких осадков, которые располагаются почти зонально (см. рис. 3а, б) и показывают, где проявляется влияние весеннего потепления на сокращение осадков в твердой фазе. В первую очередь, это Верхняя Волга и ее среднее течение (район II). Здесь несмотря на высокую межгодовую изменчивость и долю тренда, не превышающую 10%, линейный рост жидких осадков в этот сезон достигает 40% от многолетней нормы. Кроме того, их корреляция с приповерхностной температурой, прослеживается уже с февраля ($r = 0.53$), а в среднем за февраль–март коэффициент корреляции r достигает 0.68. На юге ЕТР, в районе III, распространяющемся на бассейн Дона и нижнее течение Волги, выявляется такой же рост жидких осадков; связь с температурой при этом отсутствует, что объясняется устойчивым преобладанием положительных температур на протяжении всего рассматриваемого периода. На севере (район I), напротив, в период снеготаяния отмечается достаточно тесная связь жидких осадков с приповерхностной температурой в апреле, коэффициент корреляции $r = 0.76$, но линейного роста жидких осадков в течение 1972–2018 гг. здесь не выявлено, продолжительная аномалия, свидетельствующая об увеличении их доли в весенний период, отмечается только в последнем десятилетии.

В региональных тенденциях *осадков теплого периода (май–сентябрь)* также прослеживаются три различающихся между собой типа многолетнего хода (см. рис. 4а, б). Заметные, но из-за высокой межгодовой изменчивости статистически

Таблица 2. Изменения сезонных сумм атмосферных осадков в 2001–2018 гг. относительно 1971–2000 гг. по районам в зависимости от сезона и фазового состояния

Характеристика, период	Осадки, %		
	Район I	Район II	Район III
P_{liq} , октябрь–декабрь	20	12	11
P_{liq} , февраль–апрель	2	5	6
P_{sol} , год. сумма	–3	–7	7
P_{liq} , май–сентябрь	17	0	–21

Примечание. * Положение районов для указанных характеристик осадков показано на рис. 1–4.

незначимые тенденции противоположного знака выделяются на северо-западе и юго-западе территории ЕТР.

На северо-западе, в районе I, выявляется линейный рост осадков, около 14% от нормы за 1977–2018 гг., который распространяется, на большую часть водосборов Северной Двины и Печоры. С начала 1980-х до конца 1990-х годов, в среднем, осадки близки к норме, затем, после 4-летнего периода дефицита, с середины 2000-х до 2017 г. на фоне возросшей изменчивости наблюдаются несколько максимумов осадков до 30–40% от многолетней нормы (см. рис. 4б). Ближе к Центральному Уралу, в районе II, распространяющемся на верховья Северной Двины, Печоры и Камы, примерно в этот период (2000–2014 гг.) после многолетнего роста с начала 1970-х годов наблюдается дефицит осадков с абсолютным минимумом в 2010 г. (см. рис. 4б). В целом, в структуре многолетних колебаний осадков в этом районе четко выделяется низкочастотная флуктуация с периодом около 40 лет.

Обобщение тенденций осадков демонстрирует оценки изменений их характеристик в 2001–2018 гг. относительно предшествующего тридцатилетия 1971–2000 гг. (табл. 2).

Приведенные на рис. 5 годовые гидрографы и их сравнение с многолетними изменениями осадков в регионе (см. рис. 1–4, табл. 2) позволяют установить связь частотно-временные особенностей сезонных осадков, с учетом твердой или жидкой фазы и структуры речного стока в бассейнах Северной Двины (см. рис. 5а) и Мезени (см.

рис. 5б), а также рр. Ока и Белая Волжского бассейна (см. рис. 5в, г) в период 1971–2019 гг.

Анализ вариаций *сезонного хода речного стока*, осредненного по десятилетиям позволяет судить как о колебаниях (от декады к декаде), так и о тенденциях — продолжающихся аномалиях одного знака (табл. 3). К колебаниям, по-видимому, можно отнести рост пиковых расходов в период весеннего половодья Северной Двины, где рост этой характеристики наблюдался в 1991–2000 гг., а затем вернулся к значениям 1971–1980 гг. (см. рис. 5а). В бассейнах Оки и Белой после роста в течение двух десятилетий, 1981–2000 гг. (см. рис. 5в, г), объемы половодья снизились до значений 1971–1980 гг., а в 2011–2019 гг. опустились еще ниже. Учитывая небольшие изменения количества твердых осадков в 2011–2019, в бассейне Оки они показывают отрицательную тенденцию, а в бассейне Белой — положительную (см. рис. 2а, б), существенное падение объемов половодья (16 и 13% соответственно) может быть связано с ростом повторяемости зимних оттепелей и увеличением зимнего стока (см. табл. 3) а также с существенным, более 20%, дефицитом (по отношению к норме за рассматриваемый период) осадков теплого периода, который оказывает большое влияние на состояние речного бассейна к началу зимнего сезона.

На севере, в бассейне Северной Двины, при отсутствии тренда годовых сумм твердых осадков проявляется существенный вклад флуктуаций с периодом около 20–25 лет (см. рис. 1а, б), в частности продолжительный дефицит осадков, в 2008–2013 гг., хотя в целом за 2001–2018 гг. (см. табл. 2) он составляет только 5%. Отметим, что в 2008–2013 гг. он сопровождался существенной аномалией жидких осадков в конце осени — начале зимы (см. рис. 2а, б, табл. 2), что может свидетельствовать о перераспределении твердых осадков “в пользу” жидких и сокращению расходов и объемов стока в пик половодья.

Бассейн Мезени, для которого, согласно рис. 1, характерен тот же многолетний ход осадков, что и в бассейне Северной Двины, отличается самым высоким значением расходов в пик половодья в 1991–2000 гг. (см. рис. 5б), но из-за существенного сокращения расходов в июне общий объем талого стока в этот период падает, а отмеченный

Таблица 3. Изменения средних месячных расходов в речных бассейнах в 2001–2018 гг. относительно 1971–2000 по сезонам

Месячные расходы, %											
Северная Двина			Мезень			Белая			Ока		
X–XII	II–IV	V–VI	X–XII	II–IV	V–VI	X–XII	II–III	IV–V	X–XII	II–III	IV–V
19	20	1	43	18	–9	–2	7	–13	–5	8	–16

рост в мае следует расценивать как реакцию на увеличение темпов снеготаяния, которому, в свою очередь, может способствовать резкое потепление Арктики и близость бассейна к теплому Баренцеву морю⁷.

Увеличение зимнего стока во всех рассмотренных бассейнах имеет характер продолжающейся с начала 1980-х годов тенденции. Внутри сезона рост стока от десятилетия к десятилетию на севере, в бассейнах Северной Двины и Мезени, сдвигается с октября в 1991–2000 гг. на ноябрь в 2001–2019 гг. (см. рис. 5а, б). Средняя аномалия за 2001–2018 гг., по сравнению с 1971–2000 гг., в этих бассейнах составляет около 20% (см. табл. 3) и статистически значима (на уровне $p \leq 0.05$), что позволяет связывать ее с потеплением в конце осени – начале зимы и продолжительной, в течение 2005–2013 гг., аномалией жидких осадков на фоне снижения осадков в твердой фазе (см. рис. 1, 2, табл. 2). На востоке ЕТР, в бассейне р. Белая, после существенного роста в октябре 1981–1990 гг. величина средних месячных расходов несколько уменьшилась и в течение 1991–2019 гг. сохраняется в ноябре примерно на одном уровне (см. рис. 5г). В бассейне Оки, в условиях коротких и мягких зим, с увеличением количества жидких осадков могут быть связаны возросшие среднеемесячные расходы в январе и феврале, которые сохраняются с 1981 г. (см. рис. 5в).

Роль крупномасштабной циркуляции в региональном распределении аномалий осадков и структуре многолетней изменчивости речного стока. Влияние крупномасштабной циркуляции атмосферы определяется направлением влагонесущих потоков и проявляется в пространственном распределении и повторяемости осадков. Зональный перенос атлантической влаги описывается индексом Североатлантического колебания (NAO), вынос теплого и влажного воздуха с южной составляющей связан с Восточно-атлантической циркуляционной модой (ЕА), условия для вторжения сухого арктического воздуха с севера и северо-востока возникают при усилении скандинавского антициклона и описываются Скандинавской модой (Scand). Влияние Тихого океана на территорию ЕР, несмотря на удаленность, обусловлено распространением антициклонического образования, связанного с основными центрами действия Тихоокеанско-Североамериканской моды (PNA) на Сибирь, и нарушением зонального переноса с усилением восточной составляющей в направлении переноса воздушных масс. Оценки вклада PNA в формирование аномалий зимней аккумуляции снега на территории ЕЧР приведены в (Ророва, 2007).

⁷ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

На рис. 6 представлены поля коэффициентов корреляции между аномалиями сумм осадков с декабря по март, а также с июня по октябрь, с индексами перечисленных циркуляционных мод.

Для речных бассейнов высоких и умеренных широт аномалии твердых осадков не только определяют объемы половодья, но и вносят основной вклад в изменчивость годового стока. Поэтому, циркуляционные условия холодного периода, и особенно зимних месяцев, ответственные за формирование снеготаяния, как правило, оказывают наибольшее влияние на изменчивость речного стока. Распределение коэффициентов корреляции сумм твердых осадков за декабрь–март с аномалиями циркуляционных мод представлено на рис. 6. Отметим, что с декабря по март накапливается основной запас воды в снежном покрове, причем по режиму циркуляции и температуры в высоких и умеренных широтах март относится к зимним месяцам.

Область статистически значимой *корреляции зимних осадков с индексом NAO* распространяется на западные и центральные районы севера Европейской России (см. рис. 6а, б), включая водосборы Северной Двины, Мезени, Печоры, а также верхнее течение Камы. Наиболее тесная связь, (с корреляцией более 0.5) выявляется в среднем течении Северной Двины, несколько севернее центра ее водосбора. В многолетнем ходе индекса NAO хорошо выражен тренд, а также низкочастотная составляющая, с периодом около 40 лет. На фоне квазидесятилетних периодичностей четко выделяется рост с конца 1960-х до середины 1990-х годов с продолжительной аномалией с 1988 до 1995 г., сменяющийся обратной тенденцией, за которой после абсолютного минимума в 2010 г. последовал резкий рост, аномалия и рекордное значение индекса 2015 г. (см. рис. 6в).

Влияния *центров действия моды ЕА*, в отличие от NAO распространяется дальше на восток и юго-восток, в целом корреляция слабее, корреляция около 0.5 отмечается только в небольшом очаге в верховьях Вычегды и Камы (см. рис. 6в, г). В многолетнем ходе индекса ЕА, как и в случае NAO, выявляется устойчивый тренд с 1970-х до конца 1990-х годов, вклад квазидесятилетних циклов, а также периодичностей *большого масштаба*, на фоне высокочастотной изменчивости не проявляется. Положительные аномалии наблюдаются в конце 1980-х и в начале 2000-х годов, а также в последние годы, отмеченные рекордными значениями индекса в 2014 и 2016 гг. (см. рис. 6г).

Влияние *циркуляционной моды Scand* и его основного центра действия – антициклона над севером Скандинавии, в изменчивости осадков проявляется наиболее явно, об этом свидетельствует существенная корреляция между этими параметрами, выявленная не только для зимних

месяцев (декабрь—март), но и для теплого периода (июнь—октябрь). Отметим, что в теплое время года связь осадков с крупномасштабной циркуляцией нивелируется внутримассовыми конвективными осадками, что, по-видимому, объясняет отсутствие заметной корреляции осадков теплого периода с другими циркуляционными модами.

Обширная зона тесной отрицательной корреляции зимних осадков (более 0.5, по абсолютной величине) с индексом Scand, простирается севернее 55-ой параллели с запада на восток (см. рис. 6д, е). Несмотря на то, что со Скандинавской модой, в ее положительной фазе, связано усиление межширотного обмена и вторжение арктического воздуха на юг, вплоть до субтропиков, на территорию ЕЧР он чаще переносится со значительной восточной составляющей из Сибири. Отсюда, пространственное распределение аномалий осадков, связанных с этой циркуляционной модой, имеет зональный характер, как и в случае аномалий NAO, когда оно связано с усилением западного переноса. Ее сильное влияние отмечается в бассейне Северной Двины, где отмечается отрицательная корреляция, ниже -0.6 , в бассейнах Печоры, Камы и Верхней Волги оно также достаточно заметно.

В многолетнем ходе прослеживаются существенные различия в структуре изменчивости Скандинавской моды. В 1950–2000 гг. основной вклад вносят межгодовые колебания и флуктуации от 7 до 15 лет, с периодом положительных аномалий с середины 1960-х до 1980-х годов, а также в середине 1980-х годов, а с начала 1990-х годов изменчивость существенно снижается, основной вклад вносят межгодовые колебания и небольшой тренд до середины 2010-х годов. Интересно, что в случае теплого периода многолетний ход индекса Scand (см. рис. 6е) также демонстрирует существенные изменения структуры колебаний с переломом около 1990-х годов — период положительной фазы, с максимумами в конце 1950-х — начале 1960-х и в середине 1970-х годов, сменяется на отрицательную в 1980–1990 гг., некоторый подъем к концу 1990-х и нисходящий тренд с минимумом в 2016 г. (см. рис. 6з). Корреляция между аномалиями Scand и суммами осадков в этот сезон (см. рис. 6ж) достаточно четко проявляется в западной части бассейна Северной Двины, а также затрагивает Верхнюю Волгу и истоки Камы.

Область корреляции зимних осадков с модой PNA, в противофазе, выходит со стороны Полярного Урала и ограничена небольшой территорией, но она включает в себя верховья крупнейших рек северной части ЕТР — Северной Двины, Печоры и Камы (см. рис. 6и). Благодаря близости к Уральскому хребту и обилию возвышенностей, эта территория является местом климатического максимума снегозапасов (Шмакин, 2010), что де-

лает ее важнейшей стокообразующей областью. В свою очередь это означает, что аномалии зимних осадков в ее пределах способны вносить значительный вклад в изменчивость стока перечисленных рек. Многолетний ход индекса PNA, как и Scand (см. рис. 6к), демонстрирует неоднородность — до начала 1980-х наблюдается высокая межгодовая изменчивость с флуктуациями (около 10 и более лет) и преобладанием отрицательной фазы (с минимумами в середине 1950-х, в конце 1960-х и начале 1970-х годов). С начала 1980-х годов колебания PNA происходят возле нулевого значения, низкочастотная составляющая (с периодом более 10 лет) сохраняется, но общая изменчивость существенно сокращается.

Тенденции крупномасштабной циркуляции в многолетней изменчивости речного стока. Влияние атмосферной циркуляции, в частности наиболее значимых для рассматриваемой территории циркуляционных механизмов на распределение осадков на территории ЕТР, проиллюстрированное рис. 6, очевидно оказывает на речной сток суммарное влияние. При этом, в аномалиях стока ожидаемо проявляется роль циркуляционной моды, наиболее тесно связанной с аномалиями осадков в пределах того или иного водосбора. Примером является вклад Скандинавской моды в изменчивость осадков на водосборе Северной Двины, проявления которого отчетливо прослеживаются в колебаниях годового стока после фильтрации высокочастотной составляющей путем 3-летнего скользящего осреднения (рис. 7а). Многолетние изменения индекса Scand, осредненного за теплый период (июнь—октябрь) и зимние месяцы (январь—март), которые оказывают влияние на изменения осадков в бассейне Северной Двины (см. рис. 6е, з), но и объясняют тенденции и продолжительные аномалии годового стока, с учетом их корреляции в противофазе (см. рис. 7а).

Регрессионные оценки указывают на статистически значимый вклад индекса Scand, за декабрь—март и июнь—октябрь. Они суммарно объясняют 33% изменчивости стока (табл. 4). Тем не менее, сравнение многолетних изменений стока, полученного из данных наблюдений, и рассчитанного по регрессионной модели с включением индекса Scand за указанные сезоны, показывает, что колебания Скандинавской моды хорошо описывают низкочастотные и квазидесятилетние флуктуации, включая смену тенденций, в 1970-х и 1990-х годах, и маловодье середины 1970-х годов (рис. 7б). Гораздо хуже воспроизводятся пики водности в 1953 и 1954 гг., а также в 1990-х годах, когда они, вероятно, связаны с положительной фазой NAO (см. рис. 6а, б), но согласно регрессионным оценкам, вклад индекса NAO в целом за рассматриваемый период статистически незначим. Многолетние колебания моды PNA, описы-

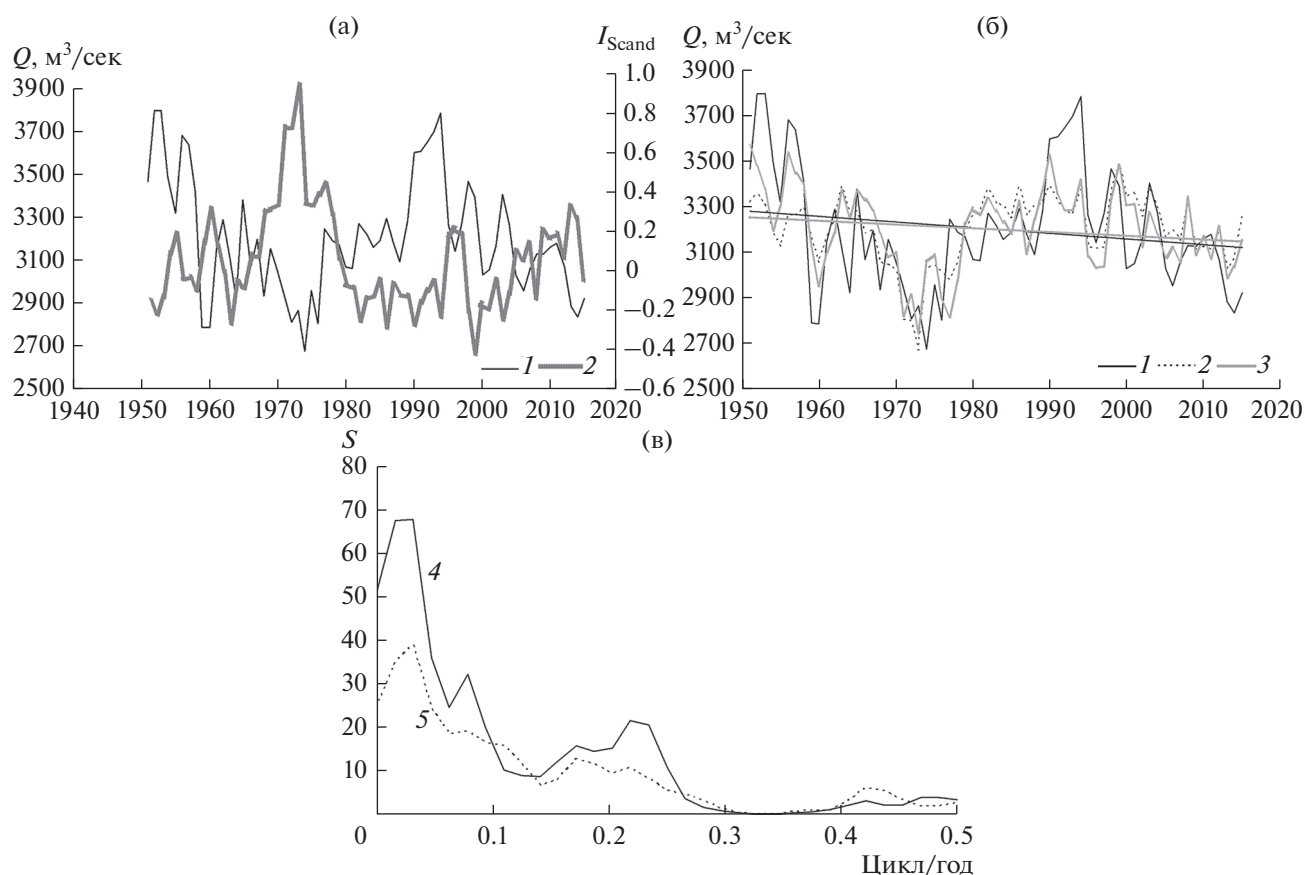


Рис. 7. Вклад крупномасштабной атмосферной циркуляции в изменчивость годового стока Северной Двины. а — Годовой сток Северной Двины по данным наблюдений, 1, и многолетний ход индекса Scand (в среднем за январь—март и июнь—октябрь), 2; б — годовое сток Северной Двины по данным наблюдений, 1, и рассчитанный на основе регрессионной зависимости с учетом индексов Scand (декабрь—март и июнь—октябрь), 2, а также с учетом индекса PNA (декабрь—март), 3; в — функции спектральной плотности годового стока Северной Двины (после 3-летней фильтрации) по данным наблюдений, 4, и рассчитанные на основе регрессионной зависимости с индексами Scand и PNA, 5. Показаны (а, б) 3-летние скользящие средние значения; прямыми линиями (б) показаны линейные тренды.

вающей, подобно Scand, ослабление зонального переноса и проявляющейся в поле зимних осадков (см. рис. би, к), напротив, вносят статистически значимый вклад (около 12%) в низкочастотную и квазидесятилетнюю изменчивость стока (см. табл. 4). Включение индекса PNA увеличивает долю

объясненной изменчивости до 45% и позволяет точнее описать увеличение водности Северной Двины в 1950-х годах и ее падение в 1960 г. (см. рис. 7б), флуктуации с периодом около 30–35 лет, а также нисходящий тренд годового стока за 1951–2015 гг.

Таблица 4. Параметры множественной регрессионной зависимости годового стока Северной Двины от индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции за 1950–2015 гг.

Циркуляционный индекс	B	St. Error	R (накопленный)	$R^2\%$ (накопленная и индивидуальная)		t	p
$Scand_{DJFM}$	–310	80	0.47	22	22	–3.87	0.02
$Scand_{JJAS}$	–281	87	0.57	34	12	–3.21	0.03
PNA_{DJFM}	–199	53	0.67	45	11	–3.75	0.03

Примечания. B — коэффициент регрессии; St. Error — стандартная ошибка; R — коэффициент корреляции; R^2 — доля объясненной изменчивости; t — критерий Стьюдента; p — уровень статистической значимости.

Несмотря на относительно небольшую величину объясненной изменчивости, полученная регрессионная модель дает достаточно точное воспроизведение структуры изменчивости наблюдаемого стока. Сравнение спектров (рис. 7в) колебаний годового стока Северной Двины, полученных из наблюдений и рассчитанных по регрессионной модели с включением индексов Scand (за декабрь—март и июнь—октябрь) и PNA (за декабрь—март), в том и другом случае показывает максимум спектральной функции в области периодов около 35–40 лет (или частоты 0.02–0.03 цикл/год), а также локальное ее увеличение в области периодов 5–6 лет (или частоты 0.17–0.22). Это приводит к выводу о том, что вариациями крупномасштабной циркуляции, в частности циркуляционными модами, ответственными за ослабление зональной циркуляции и усиление межширотного обмена, можно объяснить структуру изменчивости стока Северной Двины в 1951–2015 гг. с характерными периодичностями 35–40 и 5–6 лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Анализ региональных и частотно-временных особенностей изменчивости атмосферных осадков, проведенный с учетом их сезонных вариаций, фазового режима и связей с крупномасштабной циркуляцией, позволяет диагностировать их проявления в изменениях годовых и средних месячных расходов в речных бассейнах, а также сделать выводы о современных тенденциях осадков и крупномасштабной атмосферной циркуляции, значимых для сезонной структуры и многолетних изменений речного стока на ЕТР.

В основу анализа положена регионализация изменчивости годовых и сезонных сумм твердых и жидких осадков, включая жидкие осадки в период установления и разрушения снежного покрова, выполненная с применением разложения по эмпирическим ортогональным функциям, а также полученные для каждого из выделенных районов типы многолетнего хода осадков. Положение выделенных районов, в пределах которых колебания осадков связаны, варьирует от сезона к сезону, но их число для всех рассмотренных случаев остается постоянным и не превышает трех (при условии, что соответствующие им типы многолетнего хода объясняют не менее 50% общей изменчивости осадков в пределах каждого района). Очевидно, это характеризует масштабы пространственной связанности аномалий осадков и отражает их пространственную структуру, обусловленную особенностями атмосферной циркуляции (Попова, 2007, 2021).

Анализ частотно-временной структуры изменчивости осадков показывает, что для всех сезонов, независимо от фазы осадков, преобладаю-

щая доля связана с высокочастотной составляющей, т.е. с межгодовой изменчивостью, на фоне которой многолетние тенденции, т.е. тренды за 1972–2018 гг., как правило, статистически незначимы. Тем не менее на севере ЕТР, в бассейне Северной Двины, Мезени и Печоры, где доля линейного роста жидких осадков в конце осени — начале зимы составляет 10–25%, эти изменения оказываются достаточными для перераспределения фазового состава осадков, и как следствие — для формирования аномалий зимнего и объемов весеннего талого стока. Это подтверждается анализом осредненного по десятилетиям сезонного стока Северной Двины и Мезени, где с 1981 г. аномалии стока в октябре приобретают характер тенденции, причем после 2001 г. наблюдается максимальный с 1971 г. рост стока в октябре и не отмечавшаяся в предшествующие десятилетия (в случае стока Мезени, статистически значимая на уровне $p < 0.05$) аномалия в ноябре. В (Фролова и др., 2015б) этот период отмечается как крайне маловодный (с минимальным, менее 50% от среднего многолетнего, значением объема половодья в 2006 г.) и заметным, около недели, сокращением продолжительности половодья.

Южнее, потепление и рост жидких осадков в конце осени — начале зимы не менее чувствительны для гидрологического режима, но основной рост зимнего стока в бассейнах Оки и Белой происходил в 1981–2000-х годах (по данным Фроловой и др. (2015б) в бассейне Оки он оценивается в 40–60%) и сохранялся в течение зимы. В 2001–2019 гг. тенденция сохраняется, но с незначительным ростом, что указывает на переход к режиму частых оттепелей.

Тесная корреляция аномалий жидких осадков в октябре—декабре с температурой (ее максимум, 0.63–0.78, в зависимости от широты и континентальности наблюдается в ноябре или октябре) указывает на их связь с потеплением осени (Попова и др., 2018) и позволяет расценивать эти аномалии как тенденцию. Добавим, что 2014 г. был отмечен снижением водности⁸ Северной Двины и Волги, которому предшествовала не только малоснежная зима 2014 г., но и 5-летний период дефицита осадков в твердой фазе на фоне роста жидких осадков в конце осени — начале зимы.

Рост жидких осадков в феврале—апреле, который на юге и в средней полосе замечен с конца 1980-х годов, на севере — в последнее десятилетие, и их тесная корреляция с температурой приземного воздуха, свидетельствует о связи с потеплением периода снеготаяния. На севере корреляция достигает максимума в апреле (0.76), а в средней полосе прослеживается уже с конца зи-

⁸ Государственный доклад о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2014 г. М.: НИИ-Природа, 2015. 270 с.

мы, достигая максимума в феврале—марте (0.68). Рост талого стока в начале сезона снеготаяния, в апреле в бассейнах Северной Двины и Мезени и в марте в бассейне Оки, который наблюдается в течение нескольких последних десятилетий с начала 1980-х годов, также следует расценивать как тенденцию, связанную с потеплением и сокращением сроков разрушения устойчивого снежного покрова (Попова и др., 2018).

Разнонаправленные тенденции годовых сумм твердых осадков — сокращение на западе и рост на востоке бассейна Волги, в весеннем стоке в Оки и Белой (в среднем по десятилетиям) практически не проявляются в многолетнем ходе максимальных расходов весеннего паводка (в среднем по десятилетиям). Рост весеннего стока в том и другом бассейне отмечался в 1981—2000 гг., с начала 2000-х годов он существенно сократился, что может быть связано с ростом повторяемости зимних оттепелей на фоне продолжающегося потепления⁹, а также с существенным, до 20%, дефицитом осадков теплого периода, который оказывает большое влияние на состояние речного бассейна к началу зимнего сезона. Учитывая высокие темпы летнего и осеннего потепления в южной половине ЕТР¹⁰, их влияние на состояние речных бассейнов в предзимний период можно расценивать как тенденцию, но этот вопрос требует дополнительного изучения. На севере, в бассейнах Северной Двины и Мезени, изменение средних месячных расходов воды в пик половодья, носит, скорее, колебательный характер, связанный с 20—25-летними флуктуациями твердых осадков; после существенного роста в 1990-х, в 2001—2019 гг. выраженных тенденций не наблюдается. В бассейне Мезени, расположенном ближе к теплеющему Баренцеву морю, в 1991—2000 гг. этот показатель был выше по сравнению с 1971—1980 гг., но из-за существенного сокращения расходов в июне увеличения талого стока не наблюдалось, а отмеченный рост видимо следует отнести к влиянию потепления Арктики на сокращение сроков снеготаяния. Оценки температурных трендов зимы и весны в этом районе показывают одни из наиболее высоких темпов потепления на территории России¹¹.

Анализ пространственного распределения корреляций зимних сумм атмосферных осадков с индексами атмосферной циркуляции свидетельствует, что их аномалии в бассейнах Северной Двины, Печоры, а также Камы и Средней Волги, тесно связаны с аномалиями давления над севе-

ром Скандинавского полуострова, описываемыми индексом Скандинавской моды и ответственными за ослабление зональной циркуляции и усиление интенсивности арктических вторжений на севере Евразии. Влияние этой моды прослеживается и в теплый период, наиболее четко оно проявляется в бассейне Северной Двины, особенно на водосборах ее левых притоков. Регрессионные оценки вклада Скандинавской моды (за теплый период и зимний сезон) в изменчивость годового стока Северной Двины, наряду с анализом спектральных функций наблюдаемого стока и рассчитанного на основе связи с циркуляционными индексами, показывают, что определяющим фактором формирования его аномалий в области периодичностей 5—6 и 35—40 лет является усиление/ослабление зонального обмена, описываемое этой циркуляционной модой в противофазе. В формировании указанных периодичностей участвуют отмеченные выше колебания твердых осадков с периодом около 20—25 лет, но в результате совокупного вклада осадков, а также испарения и инерционных процессов перераспределения влаги внутри бассейна в колебаниях годового стока они, по-видимому, преобразуются в более длительные флуктуации.

Подводя итог обсуждению полученных результатов, можно прийти к следующим заключениям.

— Изменения количества жидких осадков в периоды установления/разрушения снежного покрова коррелируют с температурой воздуха в указанные сезоны, и несмотря на отсутствие статистической значимости трендов, на всей территории ЕТР, включая северные бассейны Северной Двины и Мезени, оказываются достаточными для перераспределения фазового состава осадков и увеличения зимнего стока и объемов весеннего стока в начале половодья. Рост этих аномалий с начала 2000-х годов и связь с потеплением позволяет расценивать их как тенденцию.

— В росте максимальных расходов и объемов весеннего половодья Северной Двины и Мезени проявляются флуктуации накопленных за зиму твердых осадков с периодичностью около 20—25 лет, которые в основном определяются вариациями крупномасштабной циркуляции. Южнее на западе и на востоке Волжского бассейна, в бассейне Оки и Белой, сокращение объемов весеннего половодья с 2000-х годов связано с рядом факторов, в числе которых переход зим в режим частых оттепелей и рост зимнего стока. Определенный вклад может вносить снижение осадков теплого периода, который оказывает большое влияние на состояние речного бассейна к началу зимнего сезона. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

— Полученные регрессионные и спектральные оценки вклада Скандинавской моды в изменчи-

⁹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

¹⁰ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

¹¹ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М., 2021. 104 с.

вость годового стока Северной Двины показывают, что определяющим фактором его аномалий с периодичностью 5–6 и 35–40 лет является усиление/ослабление зонального переноса, описываемое этой циркуляционной модой в противофазе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы госзадания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009) и при поддержке РФФИ и БРФФИ (грант № 20-51-00001).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность М.В. Сидоровой и А.Г. Георгиади за предоставленные данные.

FUNDING

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009) and was supported by the RFBR and BRFFI (grant no. 20-51-00001).

ACKNOWLEDGEMENTS

The author expresses gratitude to M.V. Sidorova and A.G. Georgiadi for the hydrological observations data provided.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России. 2015. № 1. С. 14–31.
- Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Иголина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
- Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях стока реки Волги // Водное хозяйство России. 2013. № 4. С. 4–19.
- Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Гл. 2 / отв. ред. С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России // Водное хозяйство России. 2018. № 4. С. 36–47.
<https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-4-3>
- Попова В.В. Современные изменения температуры приземного воздуха на севере Евразии: региональные тенденции и роль атмосферной циркуляции // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 6. С. 59–69.
- Попова В.В. Вклад аномалий ледяного покрова Баренцева и Карского морей в изменение режима циркуляции и температуры Северной Евразии с середины 1990-х годов // Лёд и Снег. 2020. № 60 (3). С. 409–422.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030048>
- Попова В.В. Современные изменения климата в крупных речных бассейнах на западе России: региональная структура и связь с глобальными тенденциями // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2021. С. 94–103.
<https://doi.org/10.26170/KFG-2021-13>
- Попова В.В., Бабина Е.Д., Георгиади А.Г. Климатические факторы изменчивости стока Волги во второй половине XX–начале XXI вв. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 63–72.
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>
- Попова В.В., Турков Д.В., Насонова О.Н. Оценки современных изменений снегозапасов в бассейне Северной Двины по данным наблюдений и моделирования // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 238–253.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421020082>
- Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. 2018. № XXII (4). С. 65–75.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(65-75\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75))
- Семенов В.А. Связь аномально холодных зимних режимов на территории России с уменьшением площади морских льдов в Баренцевом море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 257–266.
<https://doi.org/10.7868/S000235151603010X>
- Фролова Н.Л., Гельфан А.Н., Киреева М.Б., Рец Е.П., Телегина Е.А. Анализ экстремальных гидрологических явлений в пределах бассейнов равнинных рек Европейской территории России // Научное обеспечение реализации “Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.”. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015 а. С. 51–57.
- Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // Водное хозяйство России. 2015б. № 4. С. 4–20.
- Шмакин А.Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лёд и Снег. 2010. Т. 1. № 1. С. 43–57.

- Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 69–79.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Telegina E.A. Winter Runoff Variations in European Russia // Wat. Res. 2015. Vol. 42. № 6. P. 758–765.
- Laine A., Nakamura H., Nishii K., Miyasaka T. A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models // Clim. Dyn. 2014. № 42. P. 2745–2761.
- Mori M., Kosaka Y., Watanabe M., Nakamura H., Kimoto M. A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling // Nature Clim. Change. 2019. Vol. 9. № 2. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0379-3>
- Vihma T., Screen J., Tjernström M., Newton B., Zhang X., Popova V., Deser C., Holland M., Prowse T. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts // J. of Geophys. Res.: Biogeosciences. 2016. Vol. 121. № 3. <https://doi.org/10.1002/2015JG003132>
- Popova V. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes // Int. J. Climatol. 2007. Vol. 27. P. 1721–1733.

Current Trends of the Regime of Precipitation and Atmospheric Circulation over the River Basins in European Russia

V. V. Popova*, **

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: valeria_popova@mail.ru

**e-mail: popova@igras.ru

The current trends of changes in precipitation and large-scale atmospheric circulation, significant for the seasonal structure and long-term changes in runoff in river basins in the mid and in the north of European Russia, are discussed. Taking into account seasonal variations and the phase regime, the analysis of spatial and frequency-temporal features of precipitation changes is carried out, their connection with large-scale circulation, as well as manifestations in the changes in annual and average monthly discharge in the river basins Severnaya Dvina, Mezen, Oka, and Belaya rivers. Changes in the amount of liquid precipitation during the snow cover onset/offset seasons are correlated with the air temperature in these seasons, and despite the lack of statistical significance of trends, are sufficient for the redistribution of the phase composition of precipitation and, as a consequence, for the formation of anomalies of winter runoff and the growth of spring runoff at the period of the beginning of flood as well. The connection of the liquid precipitation anomalies during the transition seasons the ongoing warming allow as to consider them as a trend, in a contrast to the anomalies of maximum spring discharge and of spring flood volumes in the north of European Russia, which are mainly caused by variations of large-scale circulation and rather to have a fluctuation feature. The obtained regression and spectral estimates of the contribution of the Scandinavian mode to the annual runoff variability in the Severnaya Dvina basin show that the leading factor of its anomalies is the strengthening/weakening of the westerly transport described by this circulation mode in the opposite phase.

Keywords: precipitation, solid and liquid phase, multi-year variability, regional features, river runoff, inter-seasonal anomalies, large-scale atmospheric circulation

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river flow of the Volga basin. *Voda: Khimiya Ekologii*, 2013, no. 4, pp. 3–12. (In Russ.).
- Alekseevskii N.I., Magritskii D.V., Mikhailov V.N. Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for nature management in the deltas of the rivers of the Russian Arctic. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2015, no. 1, pp. 14–31. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Modern changes in the minimum runoff in the rivers of the basin of the Volga river. *Meteorol. Gidrol.*, 2014, no. 3, pp. 75–85. (In Russ.).
- Frolova N.L., Gelfan A.N., Kireeva M.B., Rets E.P., Telegina E.A. Analysis of extreme hydrological phenomena within the basins of lowland rivers of the European territory of Russia. In *Nauchnoe obespechenie realizatsii "Vodnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 g."* [Scientific Support for the Implementation of the "Water Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2020"]. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2015, pp. 51–57.
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Agafonova S.A., Evstigneev V.M., Efremova N.A., Povalishnikova E.S. Intra-annual distribution of the flow of lowland rivers of the European territory of Russia and its change. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2015, no. 4, pp. 4–20. (In Russ.).
- Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigorev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. The impact of climate change on the annual and maximum

- flow of Russian rivers: assessment and forecast. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36–79. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Zaitseva I.S., Kashutina E.A., Barabanova E.A. Climatic and anthropogenic factors in long-term changes in the flow of the Volga River. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2013, no. 4, pp. 4–19. (In Russ.).
- Georgievsky V.Yu., Shalygin A.L. Hydrological regime and water resources. In *Metody otsenki posledstviy izmenenii klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem. Glava 2* [Methods for Assessing the Consequences of Climate Change for Physical and Biological Systems. Chapter 2.]. Semenov S.M., Ed. Moscow: Rosgidromet, 2012, pp. 53–58.
- Grigorev V.Yu., Frolova N.L., Dzhamalov R.G. Changes in the water balance of large river basins of the European part. *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2018, no. 4, pp. 36–47. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-4-3>
- Izvestiya*, <https://iz.ru/880522/evgeniia-priemskaya/bez-vody-vinovatyie-s-chem-svazano-vesennnee-obmele-nie-volgi> Internet resources, 2019.
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Telegina E.A. Winter Runoff Variations in European Russia. *Water Res.*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 758–765.
- Laine A., H. Nakamura, K. Nishii, and T. Miyasaka. A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models. *Clim. Dyn.*, 2014, no. 42, pp. 2745–2761.
- Mori M., Kosaka Y., Watanabe M., Nakamura H., Kimoto M. A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, no. 2.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0379-3>
- Morskie vesti Rossii, <http://www.morvesti.ru/news/1679/55690/>
- Popova V.V. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes. *Int. J. Climatol.*, 2007, vol. 27, pp. 1721–1733.
- Popova V.V. Modern changes in surface air temperature in the North of Eurasia: regional trends and the role of atmospheric circulation. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2009, no. 6, pp. 59–69. (In Russ.).
- Popova V.V., Shiriaeva A.V., Morozova P.A. Changes in the characteristics of snow cover on the territory of Russia in 1950–2013: regional features and connection with global warming. *Kriosfera Zemli*, 2018, no. 22 (4), pp. 65–75. (In Russ.).
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4\(65-75\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75))
- Popova V.V., Babina E.D., Georgiadi A.G. Climatic Factors of the Volga Runoff Variability in the Second Half of 20th – Early 21st Centuries. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 4, pp. 63–72. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>
- Popova V.V. Contribution of ice cover anomalies in the Barents and Kara seas to the circulation and temperature regimes of Northern Eurasia since the mid-1990s. *Led i Sneg*, 2020, vol. 60, no. 3, pp. 409–422. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030048>
- Popova V.V. Modern climate changes in large river basins in Western Russia: regional structure and relation to global trends. In *Klimaticheskie izmeneniya i sezonnaya dinamika landshaftov. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Climatic Changes and Seasonal Dynamics of Landscapes. Materials of the All-Russia Scientific and Practical Conference]. Yekaterinburg, 2021, pp. 94–103.
<https://doi.org/10.26170/KFG-2021-13>
- Popova V.V., Turkov D.V., Nasonova O.N. Estimates of recent changes in snow storage in the river Northern Dvina basin from observations and modeling. *Led i Sneg*, 2021, vol. 61, no. 2, pp. 206–221. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2076673421020082>
- Semenov V.A. Connection of abnormally cold winter regimes in Russia with a decrease in the area of sea ice in the Barents Sea. *Izv. Akad. Nauk, Fizika Atmosfery i Okeana*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 257–266. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S000235151603010X>
- Shmakin A.B. Climatic characteristics of the snow cover of Northern Eurasia and their changes in recent decades. *Led i Sneg*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 43–57. (In Russ.).
- Shmakin A.B., Turkov D.V., Michailov A.Yu. Simulation of snow cover Model of snow cover taking into account the layered structure and its seasonal evolution. *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 69–79. (In Russ.).
- Vihma T., Screen J., Tjernström M., Newton B., Zhang X., Popova V., Deser C., Holland M., Prowse T. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts. *J. Geophys. Res.: Biogeosci.*, 2016, vol. 121, no. 3.
<https://doi.org/10.1002/2015JG003132>