

УДК 556.3: 553.583

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-6-147-155

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Сергей Олегович Гриневский¹✉, Вадим Юрьевич Григорьев²,
Сергей Павлович Поздняков³, Владимир Алексеевич Лехов⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sogrinev@mail.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vadim308g@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sppozd@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; v.lekhov@gmail.com

Аннотация. В статье на основе данных многолетних наблюдений за речным стоком анализируется влияние различия климатических условий Европейской территории России на пространственную неоднородность подземного стока и его современных климатических изменений. Различие структурно-гидрогеологического строения Московского и смежных артезианских бассейнов определяет разный характер климатической изменчивости подземного стока в их границах, которая проявляется также и в его доле в соотношении с общим речным стоком. Вместе с тем, пространственные различия современных климатических изменений подземного и минимального речного стока обусловлены неоднородностью ландшафтных условий речных бассейнов, а структурно-гидрогеологический фактор при этом имеет подчиненное значение.

Ключевые слова: подземный сток, ресурсы подземных вод, изменение климата, артезианский бассейн

Для цитирования: Гриневский С.О., Григорьев В.Ю., Поздняков С.П., Лехов В.А. Климатические закономерности формирования подземного стока на Европейской территории России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 6. С. 147–155.

CLIMATIC PATTERNS OF GROUNDWATER FLOW IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

Sergey O. Grinevskiy¹✉, Vadim Yu. Grigoriev², Sergey P. Pozdniakov³,
Vladimir A. Lekhov⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sogrinev@mail.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vadim308g@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sppozd@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; v.lekhov@gmail.com

Abstract. The article analyzes the influence of differences in climatic conditions of the European territory of Russia on the spatial heterogeneity of groundwater flow and its modern climatic changes based on long-term observations of river flow. It was found that the difference in the hydrogeological structure of the Moscow and adjacent artesian basins determines the different nature of climatic variability of groundwater flow within their boundaries, which is also manifested in its proportional ratio to the total river flow. At the same time, spatial differences in modern climatic changes in groundwater flow and minimum river flow are due to the heterogeneity of landscape conditions in river basins, while structural and hydrogeological factors are of minor importance.

Keywords: groundwater flow, groundwater resources, climate change, artesian basin

For citation: Grinevskiy S.O., Grigoriev V.Yu., Pozdniakov S.P., Lekhov V.A. Climatic patterns of groundwater flow in the European part of Russia. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 6: 147–155. (In Russ.).

Введение. Изучение условий формирования ресурсов пресных подземных вод, формирующихся в зоне интенсивного водообмена на площади артезианских бассейнов, было и остается актуальной задачей в связи с все нарастающей интенсивностью их использования для питьевого и хозяйственно-бытового водообеспечения. Для Европейской территории России (ЕТР) крупные научные обобщения пространственного распределения естественных ресурсов подземных вод в виде карт подземного стока СССР [Карта..., 1982], Центральной и Восточной Европы [Карта..., 1981] и Нечерноземной зоны РСФСР [Всеволожский и др., 1984] были выполнены в начале

1980-х годов. В этих работах для оценки подземного стока использовался гидролого-гидрогеологический метод, основанный на расчленении гидрографов рек и выделении в них подземной составляющей [Куделин, 1960]. Такой подход не учитывает разгрузку подземных вод эвапотранспирационными процессами на участках с неглубоким залеганием уровня грунтовых вод и предполагает среднегодовое равенство естественных ресурсов подземных вод и подземного стока в реки в масштабе крупных речных бассейнов, в границах которых происходит полное дренирование подземных вод верхней части зоны интенсивного водообмена. Пространственная

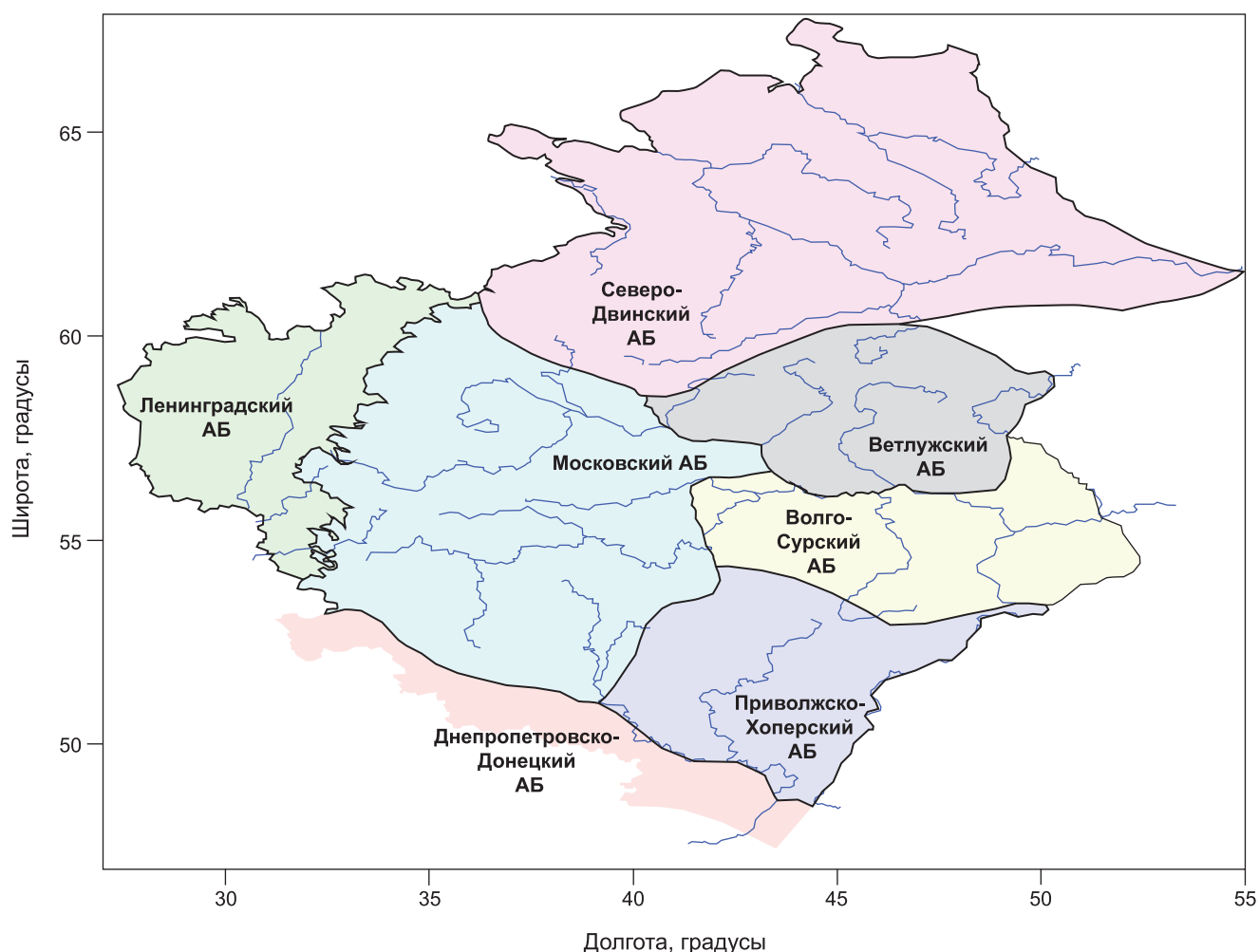


Рис. 1. Московский и смежные артезианские бассейны (АБ), по [Челидзе и др., 2015]

неоднородность подземного стока на этих картах отражает различия гидрогеологического строения и мощности зоны интенсивного водообмена, при этом влияние существенно разных климатических условий ЕТР прослеживается только в минимальных значениях подземного стока в самых южных регионах.

В связи с развитием методов дистанционного зондирования Земли и пространственного реанализа метеоданных в последние десятилетия для изучения климатических закономерностей формирования водного баланса на региональном и глобальном уровнях [Li, et al., 2013; Greve, et al., 2020 и др.] широко используется водно-энергетический подход (метод) М.И. Будыко [Будыко, 1956], который позволяет связать слой суммарного испарения и суммарного (речного) стока на площади водосборного бассейна со слоем осадков P и потенциальной эвапотранспирацией ET_0 , которая характеризует энергию, потенциально доступную на эвапотранспирационные процессы в данных климатических условиях. Такой подход может быть применен и к анализу климатических закономерностей формирования подземной составляющей речного стока, что является целью настоящих исследований. В последние годы появились публикации, в которых анализируется региональная климатически-обусловленная доля инфильтрацион-

ного питания подземных вод в осадках в зависимости от индекса аридности (ET_0/P) [Berghuijs, et al., 2024]. Учитывая, что подземный сток в зоне активного водообмена формируется в основном за счет инфильтрационного питания, то в его региональной изменчивости также должна прослеживаться климатическая составляющая, связанная с различием осадков и потенциальной эвапотранспирации.

Кроме того, многочисленные публикации, основанные на анализе пространственно-временных закономерностей стока рек России, показывают, что с конца 1970-х годов под влиянием происходящих климатических изменений на ЕТР нарушилась многолетняя стационарность режима речного стока с разными тенденциями в его характеристиках [Водные..., 2008; Гельфан и др., 2021; Фролова и др., 2022]. Для большей части ЕТР отмечается статистически значимый рост минимального стока рек, характеризующего их подземное питание [Болгов и др., 2014; Джамалов и др., 2016; Научно-прикладной..., 2021]. При этом возникает вопрос, насколько однородны наблюдаемые климатические изменения подземного стока в различных структурно-гидрогеологических регионах ЕТР, представленных Московским и смежными артезианскими бассейнами (АБ) (рис. 1).

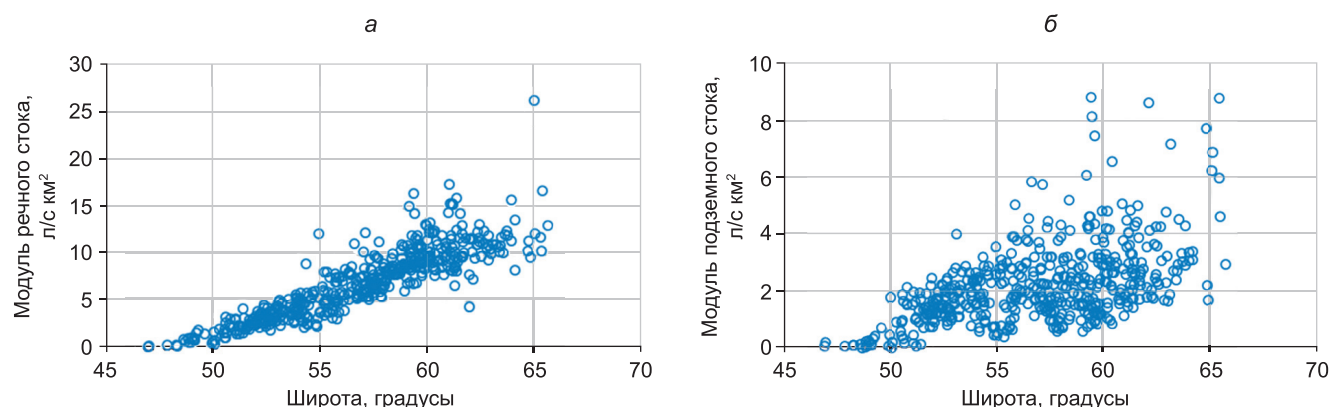


Рис. 2. Широтная изменчивость среднееголетних значений модуля стока: а — годового речного, б — подземного

Таким образом, основной целью настоящих исследований является региональный анализ климатических закономерностей пространственной неоднородности подземного стока и его современных изменений на территории ЕТР в границах Московского и смежных АБ.

Материалы и методы исследования. Для анализа использованы суточные данные наблюдений за речным стоком на гидрологических постах Гидрометслужбы, включающие расходы рек по 538 постам за период с 2008 по 2022 гг. и по 283 постам за период до 2008 г.

По многолетним гидрологическим данным были рассчитаны годовые и среднееголетние расходы и модули общего речного стока и минимальные 30-суточные величины летней и зимней межени за различные периоды. На основе полученных данных проведено расчленение годовых гидрографов речного стока с выделением его подземной составляющей, которое выполнено по упрощенной методике, полагая, что среднегодовое подземное питание реки (подземный сток в реку) соответствует среднему из минимальных 30-суточных расходов летнего и зимнего периодов.

В качестве климатических характеристик рассматриваемой территории использованы среднееголетние значения годовых сумм осадков и испаряемости за период 1981–2010 гг. из базы данных проекта CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas), где они рассчитаны путем реанализа данных наблюдений по международной сети метеостанций с пространственным разрешением 30 угловых секунд [Karger, et al., 2017].

Результаты исследований и их обсуждение. Полученные результаты показывают, что среднееголетние модули речного стока имеют четко выраженную широтную изменчивость, определяющуюся, главным образом, различием климатических условий рассматриваемой территории (рис. 2, а). В то же время климатическая (широтная) изменчивость модулей подземного стока (рис. 2, б) выражена гораздо слабее, что объясняется существенным влиянием структурного геолого-гидрогеологического строения артезианских бассейнов, а также особенностями

гидрогеологических условий и различной глубиной дренирования речных водосборов разного порядка (площади), в которых формируется подземный сток.

Для дальнейшего анализа были выделены речные бассейны, на площади которых интегрально происходит дренирование всего разреза зоны интенсивного водообмена, поскольку только в этом случае модуль подземного стока в реку может являться показателем суммарного инфильтрационного питания и естественных ресурсов подземных вод. Такие речные бассейны рассматриваются как ключевые (репрезентативные) с замкнутым балансом инфильтрационного водообмена поверхностных и подземных вод в их границах.

Обоснование (выбор) таких речных водосборов, для всей рассматриваемой территории Московского и смежных АБ проведено дифференцированно, в границах 29-ти гидрологических районов, включающих водосборные площади бассейнов рек 1–2-го порядков, что обусловлено как региональными различиями гидрогеологического строения и условий формирования подземного стока разных гидрологических районов, так и их макро-неоднородностью на площади каждого артезианского бассейна. Далее для каждого из 29-ти выделенных гидрологических районов анализировались зависимости среднееголетнего модуля подземного стока от площади водосбора, которые имеют следующие закономерности [Владимиров, 1976; Пашковский, 2001] (рис. 3).

Изменчивость модулей минимального (подземного) стока наблюдается до определенной, «критической» (по В.А. Владимирову) площади речного бассейна F^0 , после которой значения модуля практически не меняются. Это означает, что при площади речного бассейна больше F^0 , его речная сеть полностью дренирует подземные воды зоны интенсивного водообмена, и последующее изменение модуля подземного стока может происходить только при смене физико-географических и гидрогеологических условий. Таким образом, значение модуля подземного стока M^0 , при $F \geq F^0$ характеризует суммарное инфильтрационное питание и ресурсы подземных вод, формирующееся на площади речного бассейна (за вычетом разгрузки эвапотранспирацией с уровня

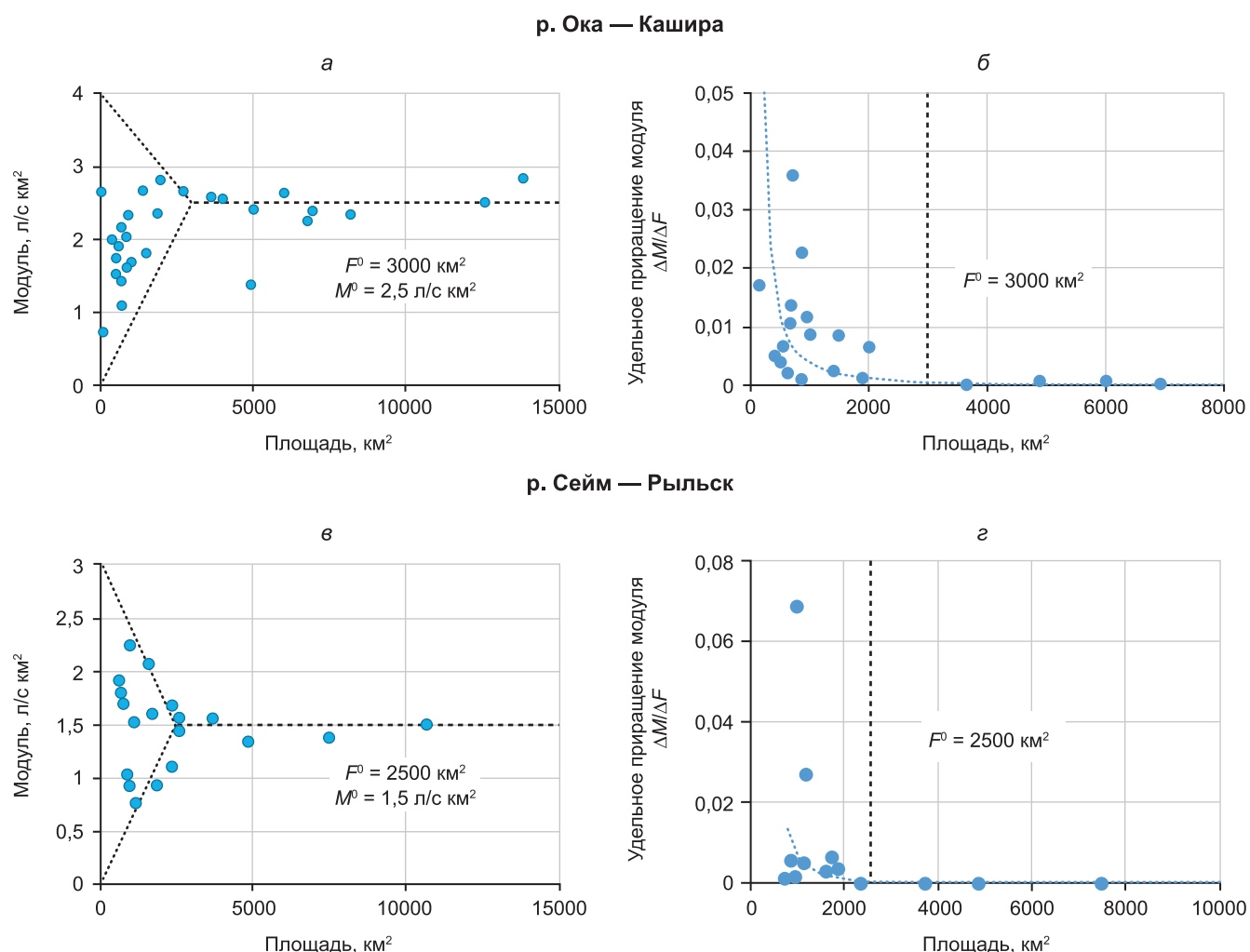


Рис. 3. Зависимости: модуля подземного стока (а, в) и удельного приращения модуля подземного стока (б, г) от площади водосбора на примере бассейнов: р. Ока — Кашира (а, б) и р. Сейм — Рыльск (в, г)

грунтовых вод на участках его неглубокого залегания). При этом F^0 можно считать минимальной представительной площадью бассейна, в котором среднееголетнее суммарное питание равно суммарной разгрузке подземных вод.

Изменения модуля подземного стока на малых речных водосборах (площадью менее критической) $M \neq M^0$ вызваны двумя основными факторами.

Значения $M < M^0$ (рис. 3, а) обусловлены *неполным дренированием гидрогеологического разреза*, при котором только часть суммарного питания на площади бассейна формирует местный подземный сток к ближайшим рекам, а другая часть поступает в нижние горизонты разреза и формирует глубокие «ветви» стока к более крупным дренам, эрозионный врез которых ниже. Детальный анализ такого деления подземного стока на местную и глубокую составляющие, проведенный нами ранее для верхней части бассейна р. Днепр на основе геофильтрационного моделирования, показал, что доля глубокого питания на площади малых водосборов, не поступающего в местную речную сеть, может достигать 80 % [Гриневский и др., 2016].

Значения $M > M^0$ (рис. 3, в) связаны с *межбассейновым регулированием подземного стока*, когда в речную сеть бассейна по глубокой ветви подземного стока поступает подземное питание из другого бассейна, и в этом случае суммарная разгрузка подземных вод оказывается выше их инфильтрационного питания на площади водосбора.

Для более однозначного определения минимальной представительной площади F^0 проведен анализ удельного (на единицу площади) приращения модуля подземного стока $\Delta M / \Delta F$ (в абсолютных величинах) для ранжированных по площади бассейнов в границах гидрологического района (рис. 3, б, г).

Полученные таким образом значения F^0 для разных гидрогеологических районов (таблица) составляют 2–5 тыс. км² в Московском, Днепро-Донецком и Ленинградском бассейнах, 5–6 тыс. км² — в Ветлужском, Волго-Сурском и Приволжско-Хоперском бассейнах и 3–8 тыс. км² — в Северо-Двинском бассейне («границные» гидрологические районы отнесены к АБ, куда входит большая часть их площади). Такие существенные различия значений F^0 обусловлены структурно-гидрогеоло-

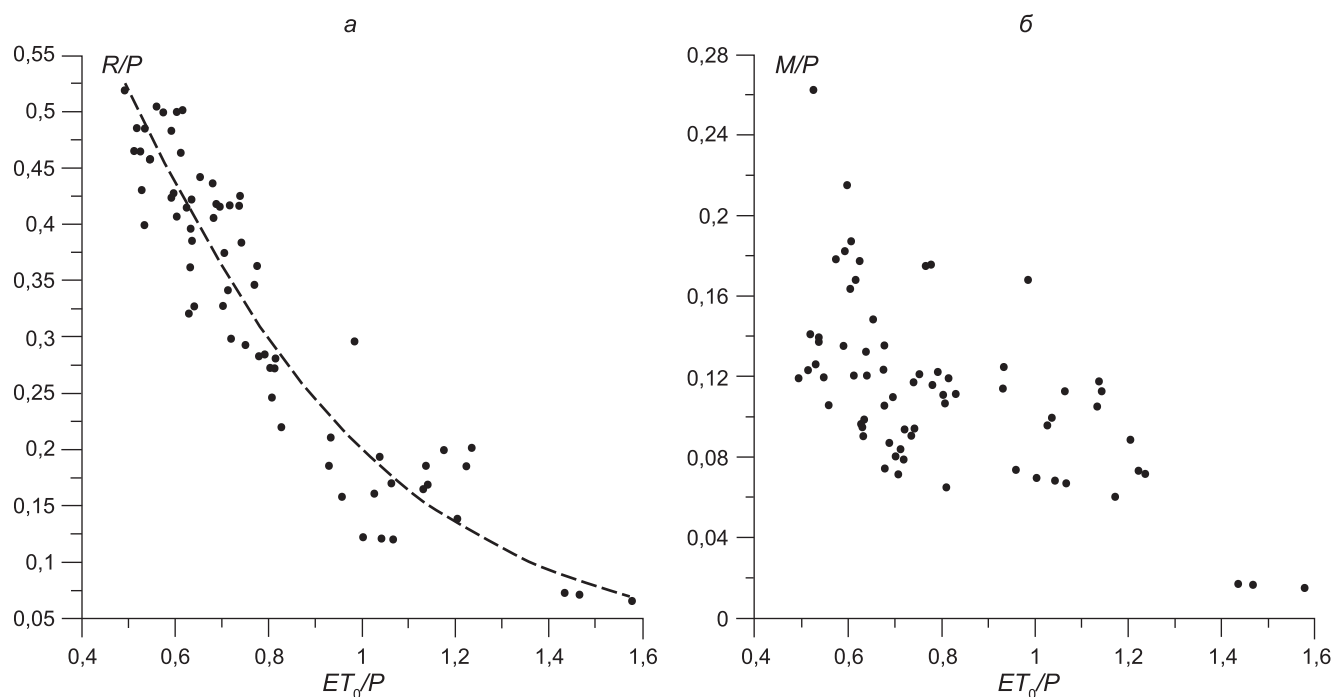


Рис. 4. Связь с индексом аридности (ET_0/P) доли от осадков: *а* — слоя речного стока (R/P) и ее аппроксимация, *б* — слоя подземного стока (M/P)

гическими особенностями строения артезианских бассейнов, определяющими разную глубину зоны интенсивного водообмена в их границах [Всеволожский и др., 1984], что требует отдельного анализа за рамками настоящих исследований.

Таким образом в 29-ти гидрологических районах выделено 69 репрезентативных речных бассейнов площадью $F \geq F^0$, характеризующихся среднееголетними значениями модуля (слоя) речного R и подземного M стока за период 2008–2022 гг. Их анализ показывает «климатическую обусловленность» общего речного стока на рассматриваемой территории, при которой его различия удовлетворительно описываются известной модификацией уравнения М.И. Будыко [Zhang, et al., 2004] в зависимости от средних значений слоя осадков P и потенциальной эвапотранспирации ET_0 из базы данных CHELSA при ландшафтном коэффициенте $\omega = 3,8$ (рис. 4):

$$\frac{R}{P} = \left[1 + \left(\frac{ET_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega} - \frac{ET_0}{P}.$$

Значения среднееголетнего модуля подземного стока в границах гидрологических районов и в репрезентативных бассейнах существенно различаются — от 0,25 л/с км² до 6 л/с км² (рис. 5). При этом, несмотря на то, что минимальные значения модуля характерны для южных бассейнов, а максимальные — для северных, однозначная широтная зональность величин модуля подземного стока на рассматриваемой территории не прослеживается. Это подтверждает неоднозначная связь доли слоя подземного стока от осадков M/P с индексом

аридности ET_0/P (рис. 4, б), что обусловлено существенным влиянием различия гидрогеологического строения репрезентативных бассейнов на формирование подземного стока. Вместе с тем, в границах отдельных артезианских бассейнов «климатическая обусловленность» модулей подземного стока выражена более однозначно (рис. 6, а). При этом следует отметить существенно разный характер связи доли слоя подземного стока от осадков с индексом аридности в артезианских бассейнах, который проявляется в различии аппроксимирующих ее экспоненциальных кривых. Это позволяет говорить о том, что климатические факторы оказывают различное влияние на формирование подземного стока в границах артезианских бассейнов в зависимости от их структурно-гидрогеологического строения.

Этот вывод также подтверждает характер климатической изменчивости коэффициентов подземного стока (доли подземного стока в речном M/R), которая по-разному проявляется в различных артезианских бассейнах (рис. 6, б). Если в Московском, Днепровско-Донецком, Волго-Сурском и Ветлужском артезианских бассейнах прослеживается увеличение коэффициента подземного стока с ростом индекса аридности территории, то в остальных бассейнах коэффициенты подземного стока уменьшаются. При этом какая-либо связь характера этих зависимостей с широтным положением артезианских бассейнов отсутствует.

Таким образом, различие структурно-гидрогеологического строения определяет не только степень влияния климатических факторов на формирование подземного стока, но и направленность этого влияния, определяя различные региональные

Т а б л и ц а

Значения минимальной представительной площади речных бассейнов и среднемноголетнего модуля подземного стока гидрологических районов Московского и смежных артезианских бассейнов

Артезиан-ский бассейн	Гидрологиче-ский район	Мини-мальная площадь, F^0 , тыс. км ²	Средний мо-дуль подзем-ного стока, M^0 , л/с км ²
Ветлужский	Вятка	6,0	2,3
	Ветлуга	5,0	1,5
	Унжа	5,0	2,0
Волго-Сурский	Сура	6,0	2,0
	Нижняя Волга, правобережье	5,0	1,5
	Нижняя Волга, левобережье	6,0	1,0
	Кама, правобережье	6,0	3,0
Приволжско-Хоперский	Дон, ст. Раздорская	5,0	0,25
	Хопер	6,0	1,25
Днепровско-Донецкий	Днепр, Десна	5,0	2,5
	Сейм	2,5	1,5
Московский	Дон, ст. Казанская	4,0	2,0
	Молога, Рыбинское вдхр	4,0	4,0
	Кострома	2,0	2,0
	Ока, Кашира	3,0	2,5
	Ока, Половское	3,0	3,9
	Ока, Горбатов	5,0	2,5
	Ока, Муром	5,0	2,0
Ленинград-ский	Великая, Западная Двина	4,0	2,0
	Луга, Нева левобережье	2,5	2,9
	Нева, правобережье	2,0	3,75
Северо-Двинский	Мезень	8,0	3,0
	Вычегда	8,0	3,0
	Пинега	7,0	2,5
	Вага	5,0	2,0
	Сухона	7,0	3,0
	Юг	8,0	2,75
	Золотица, Сояна	3,0	6,0
	Онега	4,0	4,0

климатические тенденции соотношения подземной и поверхностной составляющих суммарного стока.

Анализ влияния современных климатических изменений на характеристики минимального стока проведен на основе сопоставления среднемноголетних значений минимальных 30-сут расходов летней и зимней межени за периоды 1950–1979 и 1980–

2022 гг. Его результаты показывают, что однозначно проявляющиеся на ЕТР с 1980-х годов тенденции увеличения среднегодовой температуры воздуха и снижения скорости ветра при менее однозначном росте годовых сумм осадков [Grinevskiy, et al., 2021] вызвали преимущественное увеличение модуля подземного стока, несмотря на существенно разные климатические условия территории (рис. 7, а), что в целом согласуется с результатами предшествующих оценок [Болгов и др., 2014; Фролова и др., 2022].

В средних значениях на площади всех артезианских бассейнов произошло относительно равномерное увеличение среднемноголетних модулей минимального подземного стока (рис. 7, б); при этом максимально, до 80 % — в Приволжско-Хоперском бассейне, а минимально, на 25 % — в Северо-Двинском. Так же по всем бассейнам, за исключением Северо-Двинского, рост минимального зимнего стока превышает увеличение летнего. Эти данные соответствуют выводам, что современные климатические изменения на ЕТР обуславливают увеличение питания подземных вод преимущественно в зимний период [Grinevskiy, et al., 2021].

В то же время, несмотря на такие схожие региональные климатические изменения средних величин минимального стока, вариация их изменчивости по отдельным водосборным бассейнам существенно выше (рис. 7, а; 8). Так же неоднозначным является соотношение климатических изменений минимального зимнего и летнего стока, которое наиболее существенно различается в границах Волго-Сурского, Приволжско-Хоперского и Днепровско-Донецкого артезианских бассейнов (рис. 8). Это, вероятно, связано с ландшафтными различиями отдельных водосборов, при которых однонаправленные климатические изменения по-разному проявляются в процессах формирования общего водного баланса и инфильтрационного питания подземных вод в зависимости от ландшафтных условий [Grinevskiy, et al., 2021].

Выводы и заключение. Проведенный анализ влияния климатических условий на среднемноголетние показатели подземного стока европейской территории России позволяет сделать следующие основные выводы.

Несмотря на существенные различия климатических условий Европейской территории России (ЕТР), характеризующиеся полуаридными условиями недостаточного увлажнения на юге ($ET_0/P > 1,5$) и гумидными с избыточным увлажнением на севере ($ET_0/P < 0,6$), широтная климатическая изменчивость подземного стока выражена слабо. Она гораздо заметнее проявляется в границах отдельных артезианских бассейнов, характеризующихся единым структурно-гидрогеологическим строением зоны интенсивного водообмена. При этом различие гидрогеологического строения артезианских бассейнов определяет и разный характер климатической изменчивости подземного стока в их границах, кото-

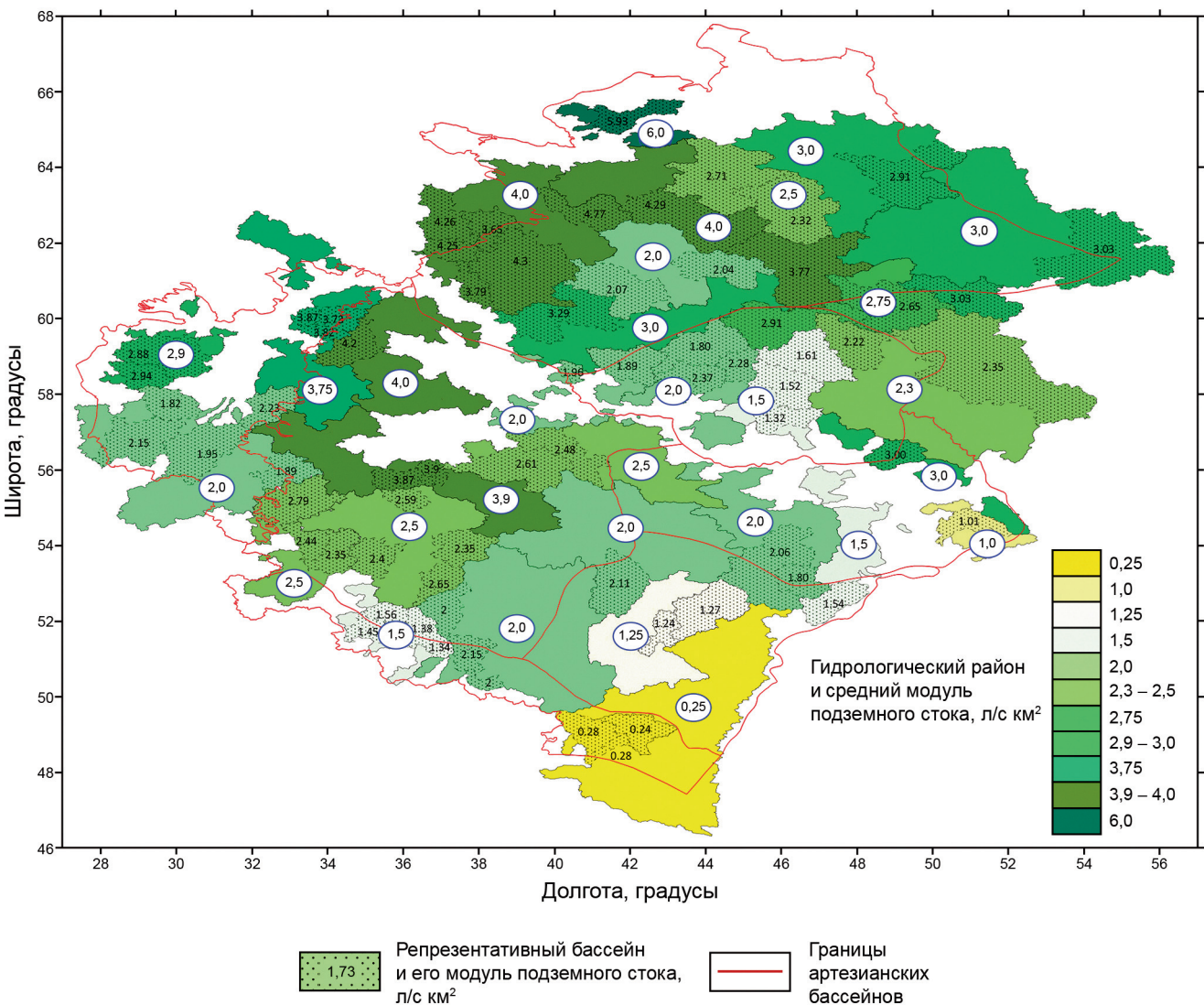


Рис. 5. Гидрологические районы и репрезентативные бассейны со среднеголетними значениями модуля подземного стока

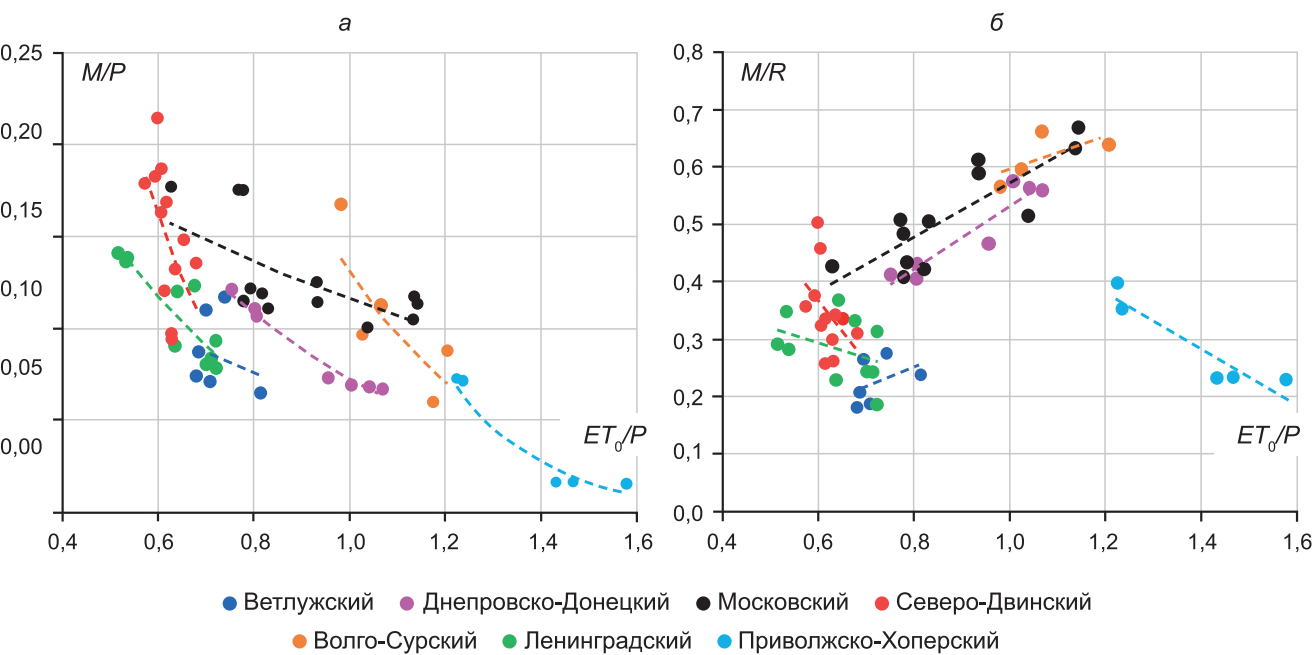


Рис. 6. Связь доли подземного стока от осадков (M/P) (а) и доли подземного стока в речном (M/R) (б) с индексом аридности (ET_0/P) и ее экспоненциальная (а) и линейная (б) аппроксимация

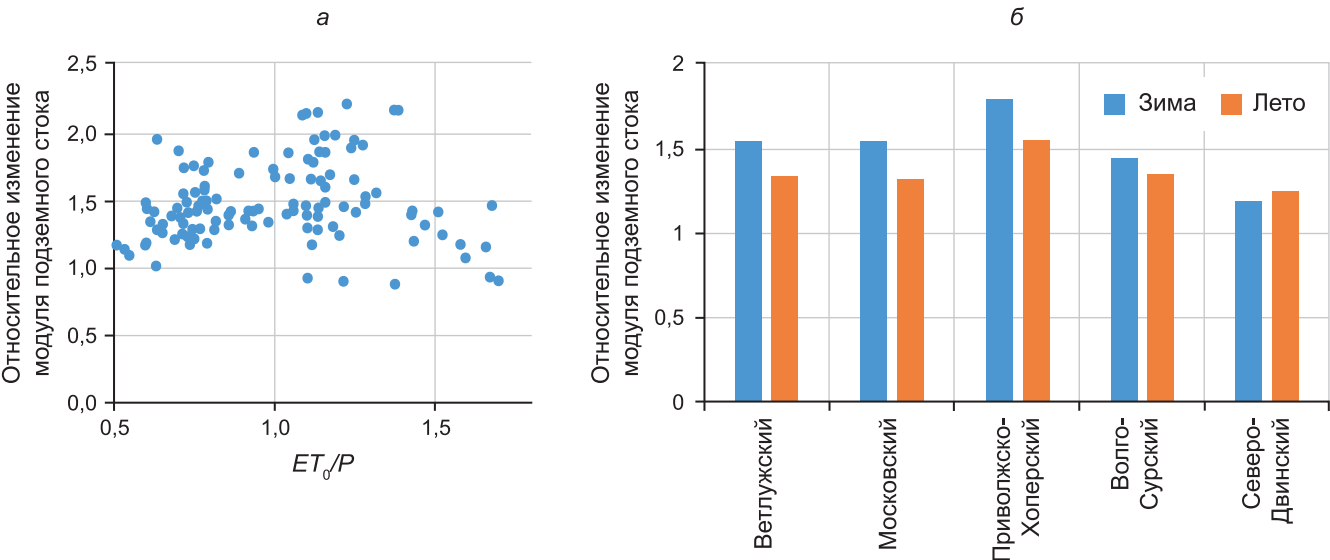


Рис. 7. Относительное изменение среднегогодового модуля стока периода 1980–2022 гг. по сравнению с периодом 1950–1979 гг.: а — подземного в зависимости от индекса аридности; б — средних значений летней и зимней межени на площади артезианских бассейнов

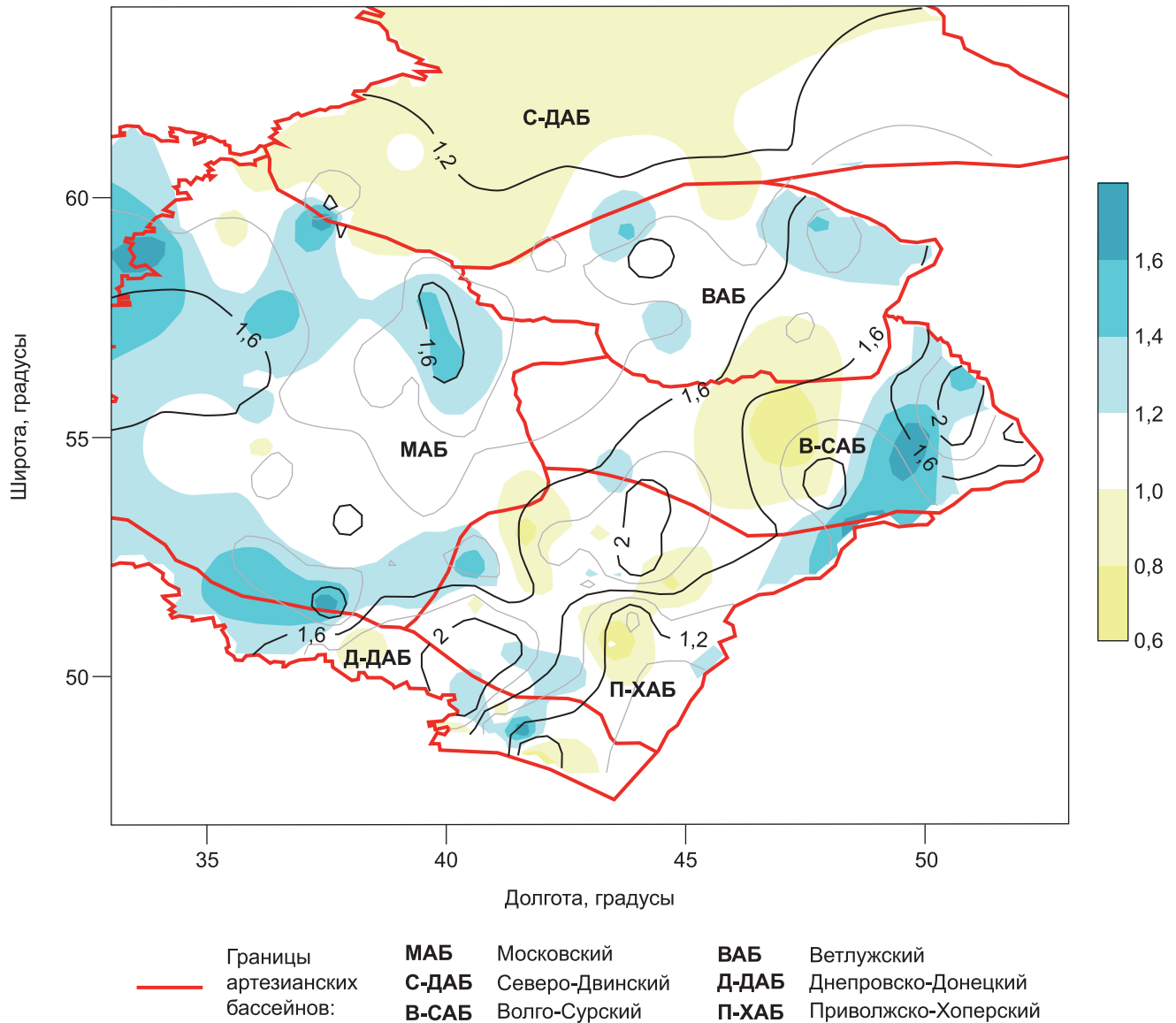


Рис. 8. Изменение среднегогодовых минимальных модулей стока за период 1980–2022 по сравнению с 1950–1979 гг. Изолинии — относительное увеличение подземного стока; цветовая шкала — отношение увеличения зимнего стока к летнему

рая проявляется также и в его доле в соотношении с общим речным стоком. Анализ этой связи требует дополнительного изучения и является направлением дальнейших исследований.

В то же время относительно однородные современные изменения климатических условий на ЕТР, наблюдаемые с 1980-х годов, вызвали практически равномерное региональное увеличение среднего модуля подземного стока на площади разных по структурно-гидрогеологическому строению артезианских бассейнов. При этом в границах речных бассейнов климатические изменения годового подземного стока, а также минимального стока летней

и зимней межени существенно различаются, что обусловлено, вероятно, ландшафтной неоднородностью водосборов. Из этого можно сделать вывод, что ландшафтные условия на поверхности речных бассейнов оказывают определяющее влияние на процессы перестройки водного баланса, формирование инфильтрационного питания и подземного стока под влиянием климатических изменений, а структурно-гидрогеологический фактор при этом имеет подчиненное значение.

Финансирование. Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-17-00102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. и др. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.

Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 255 с.

Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.

Всеволожский В.А., Долгополов В.В., Зекцер И.С. и др. Карта подземного стока Нечерноземной зоны РСФСР (за исключением Калининградской области, горной части Урала и Зауралья). Масштаб 1 : 1 500 000. М., 1984.

Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В. и др. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундамент. приклад. климатология. 2021. Т. 7, № 1. С. 36–79.

Гринеvский С.О., Иванова Я.В., Сафонов А.О. Оценка естественных ресурсов подземных вод на основе гео-гидрологического моделирования инфильтрационного питания // Известия вузов. Геология и разведка. 2016. № 5. С. 45–52.

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Бугров А.А. и др. Оценка возобновляемых водных ресурсов Европейской части России и пространственно-временной анализ их распределения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 18–31.

Карта подземного стока Центральной и Восточной Европы. Масштаб 1:1 500 000. Л.: ВСЕГЕИ, 1981.

Карта естественных ресурсов подземных вод СССР (подземного стока зоны интенсивного водообмена). Масштаб 1:7 500 000 / Под ред. И.С. Зекцера, О.В. Попова. М.: ГУГК, 1982.

Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1960. 343 с.

Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных

характеристик стока рек Российской Федерации / Под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО «РИАЛ», 2021. 190 с.

Пашковский И.С. Взаимосвязь подземных и поверхностных вод в окружающей среде. II конференция пользователей и партнеров «Геолинка», Москва, 29–31 мая 2001 г. М.: ИНФОКОМ-ГЕО, 2001. С. 36–40.

Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Куреева М.Б. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: Обзор публикаций. 1 Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. № 3 (49). С. 251–269.

Челидзе Ю.Б., Барон В.А., Пугач С.Л., Кокорева С.В. Общее гидрогеологическое районирование как основа системного картографирования, изучения, использования и оценки состояния подземных вод России // Разведка и охрана недр. 2015. № 5. С. 41–49.

Berghuijs W.R., Collenteur R.A., Jasechko S., et al. Groundwater recharge is sensitive to changing long-term aridity // Nature of Climate Change. 2024. № 14. P. 357–363.

Grinevskiy S.O., Pozdniakov S.P., Dedulina E.A. Regional-Scale Model Analysis of Climate Changes Impact on the Water Budget of the Critical Zone and Groundwater Recharge in the European Part of Russia // Water. 2021. № 13. С. 428.

Greve P., Burek P., Wada Y. Using the Budyko framework for calibrating a global hydrological model // Water Resour. Res. 2020. 56. e2019WR026280. <https://doi.org/10.1029/2019WR026280>

Karger D.N., Conrad O., Böhner J., et al. Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas // Scientific Data. 2017. № 4. 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>

Li D., Pan M., Cong M., et al. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework // Water Resour. Res. 2013. 49. doi: 10.1002/wrcr.20107

Zhang L., Hickel K., Dawes W.R., et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration // Water Resour. Res. 2004. 40. 02502. doi: 10.1029/2003WR002710

Статья поступила в редакцию 13.05.2025,
одобрена после рецензирования 23.05.2025,
принята к публикации 26.12.2025