Р.Г. Джамалов
д-р геол.-мин. наук
академик РАЕН
профессор
Институт водных проблем РАН
заведующий лабораторией
dzhamal@aqua.laser.ru

Н.Л. Фролова
д-р геогр. наук
МГУ им М.В. Ломоносова
географический факультет
доцент кафедры гидрологии
frolova_nl@mail.ru

Е.А. Телегина
Институт водных проблем РАН
научный сотрудник

Е.П. Рец
канд. геогр. наук
Институт водных проблем РАН
научный сотрудник

Максимальные и минимальные значения современного подземного стока как показатель естественных ресурсов подземных вод*

Рассмотрены особенности пространственно-временной изменчивости величины стока основных бассейнов рек ЕЧР за период зимней межени, когда питание реки осуществляется преимущественно подземными водами. Дана оценка изменений, происходящих в минимальных, средних и максимальных значениях стока в период зимней межени на фоне климатических изменений последних десятилетий

Peculiarities of spatial-temporal variability of the magnitude of the flow of major river basins ECHR for the period of winter low water when the river is mainly groundwater. The estimation of changes in the minimum, average and maximum values of runoff during winter low water on the background of climatic changes of the last decades

Ключевые слова: естественные ресурсы подземных вод, глубина промерзания, зимний сток, минимальный месячный сток
Keywords: natural groundwater resources, freezing depth, winter runoff, minimum monthly runoff

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-05-00341) и НФ № 14-17-00700

Скорость роста среднегодовой температуры приземного воздуха за период 1976–2012 гг. для России в среднем составляет 0,43 °С/10 лет, что более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель для глобальной температуры. Среднегодовое повышение температуры превысило норму за 1961–1990 гг. на 1,07 °С. Теплое лето 2011–2012 гг. способствовало увеличению в среднем на 10–15% толщины сезонно-талого слоя (СТС) мерзлых пород почти на всей территории России. При этом европейский север России характеризуется наибольшим приростом СТС за период наблюдений (около 2 см/год) и его абсолютными максимумами за весь период наблюдений (1,4–1,6 м) [4, 5].

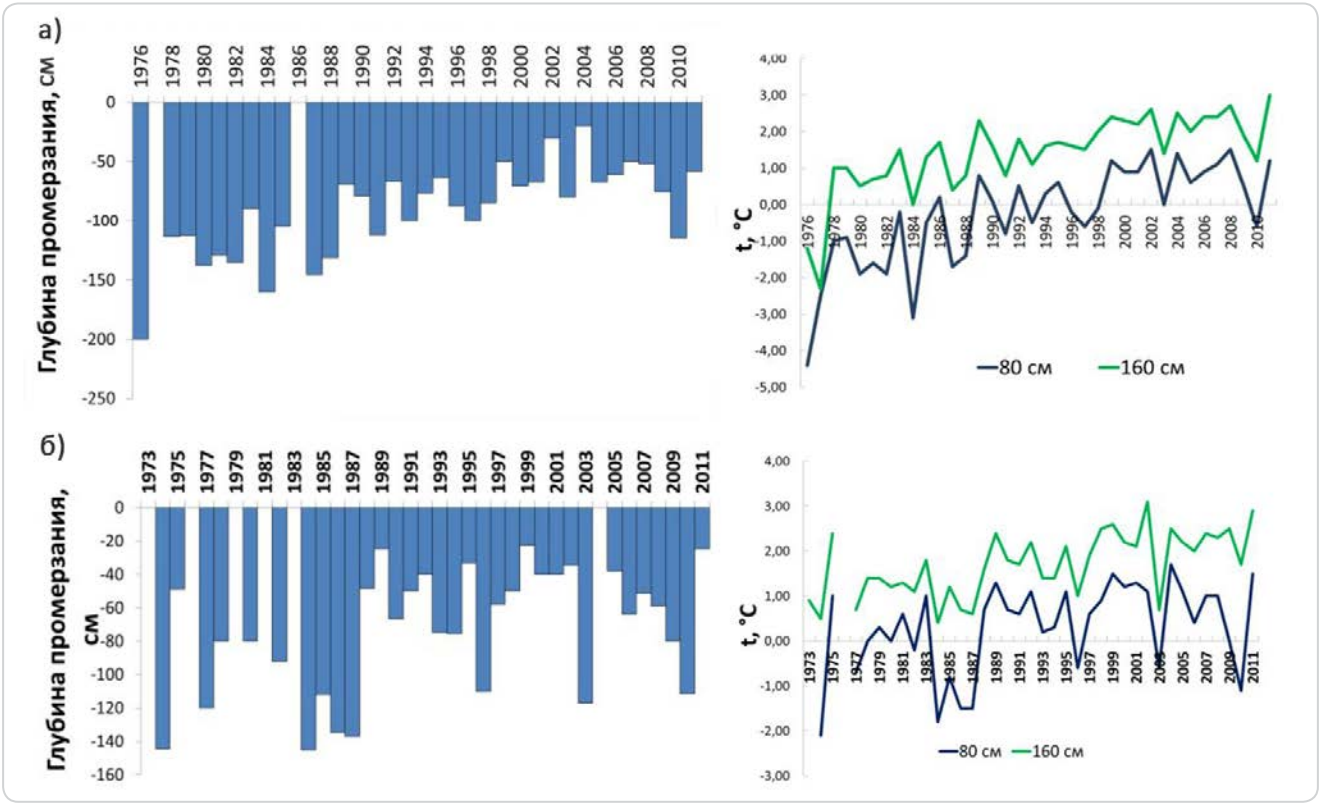
Уменьшение глубины промерзания пород зоны аэрации за многолетний период отмечается практически во всех природных зонах Европейской части России (ЕЧР). По данным агрометеорологических станций можно судить о многолетней динамике суточных температур почвы на различных горизонтах и об общей тенденции сокращения суммарной глубины промерзания почвогрунтов.

Наблюдения на метеостанциях за изменением минимальной температуры почвы на горизонтах 80 и 160 см позволяют выделить ряд постов на территории европейской России, для которых характерно повышение температуры почвы на горизонтах ниже 60 см и, как следствие, уменьшение глубины промерзания за период с 1985 по 2005 гг. (***рис. 1***).

За 1976–2012 гг. установлено увеличение годовых сумм атмосферных осадков на ЕЧР (+0,8 мм/мес./10 лет). Избыток зимних осадков (до 180% нормы) наблюдался в северо-западных и центральных областях ЕЧР. Увеличение количества осадков в холодное полугодие статистически достоверно.

Следует отметить, что для регионов ЕЧР в течение последних десятилетий число дней с устойчивым снежным покровом значительно меньше, чем в среднем за предшествующие десятилетия (1936–1976). В среднемноголетнем разрезе по-прежнему наблюдается увеличение максимальной за зиму высоты снежного покрова в центральных областях европейской России. Прослеживаемая тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова в северной и южной половине ЕЧР во многом зависит от особенностей оттепелей в течение снежного периода. Общий рост приземной температуры воздуха обусловлен, прежде всего, многолетним ее повышением в области отрицательных значений. С другой стороны, для холод-

Рис. 1.
Слева – изменение глубины промерзания; справа – изменение минимальной температуры почвы за зимний период на горизонтах 80 и 160 см; а – пост в среднем течении Волги (Сергач–Пьяна); б – пост в бассейне Дона (Елец–Сосна)



ного сезона характерно многолетнее увеличение периода с положительными температурами воздуха, которое влияет на рост жидких осадков за него, что должно снижать величину снегозапасов.

На водосборе Дона снегозапасы характеризуются весьма большой изменчивостью. Это обусловлено наличием жидких осадков, сильным влиянием оттепелей, которые имеют большую повторяемость, особенно в лесостепной и степной зонах. Здесь тенденция к увеличению зимних осадков подтверждается наличием значимых возрастающих трендов по критерию Спирмена [6] (для 35 метеостанций из 57). Для всего бассейна Дона наблюдается увеличение количества жидких и твердых осадков холодного периода с коэффициентом линейного тренда для зимних осадков в среднем 15–20 мм/10 лет (***рис. 2***) [3].

Анализ изменения температуры воздуха и осадков за последние 25–35 лет свидетельствует о том, что этот период был не только самым теплым, но и самым влажным за время инструментальных наблюдений. Однако региональные тренды изменения температуры и осадков могут проявляться на фоне более длительных колебаний циклического характера с периодом в несколько десятилетий. Поэтому нельзя с уверенностью утверждать именно о наличии тренда, а не определенной фазы циклических колебаний.

Анализ влияния климатических вариаций на современные условия формирования ресурсов и режима поверхностных и подземных вод регионов ЕЧР выполнен с учетом информационной базы данных гидрометеорологических наблюдений.

Анализ региональных особенностей изменения зимнего стока рек ЕЧР

Пространственная и временная изменчивость параметров зимнего стока рек ЕЧР рассмотрена на примере бассейнов основных рек – Печоры, Мезени, Онеги, Северной Двины, Волги, Дона. Большое разнообразие условий формирования минимального зимнего стока этих бассейнов обусловлено различием сроков и продолжительности зимней межени. Наблюдаемое увеличение зимнего стока связано с направленной изменчивостью формирующих его факторов. Это связано, прежде всего, со «смягчением» температурного режима зим, увеличением количества оттепелей, которые ведут к пополнению стока за счет талых и дождевых вод на территории России после 1975 г. [5].

Анализ изменений характеристик зимнего стока выполнен с 1975 по 2010 гг. по отношению к периоду 1940–1975 гг., а также отдельно

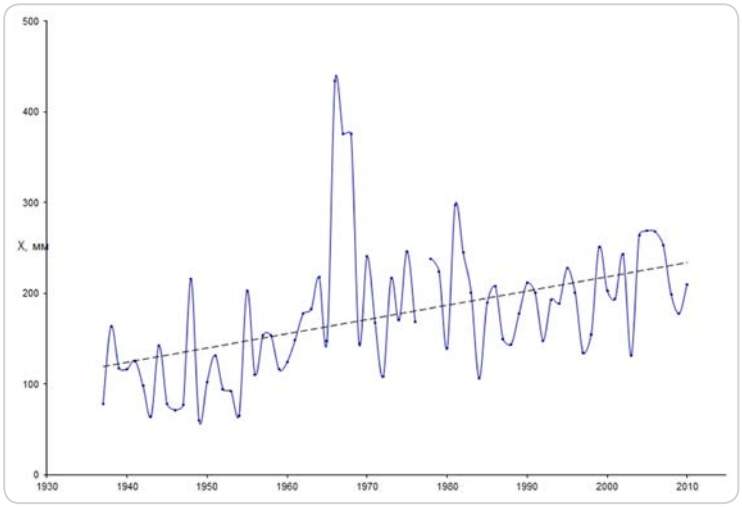
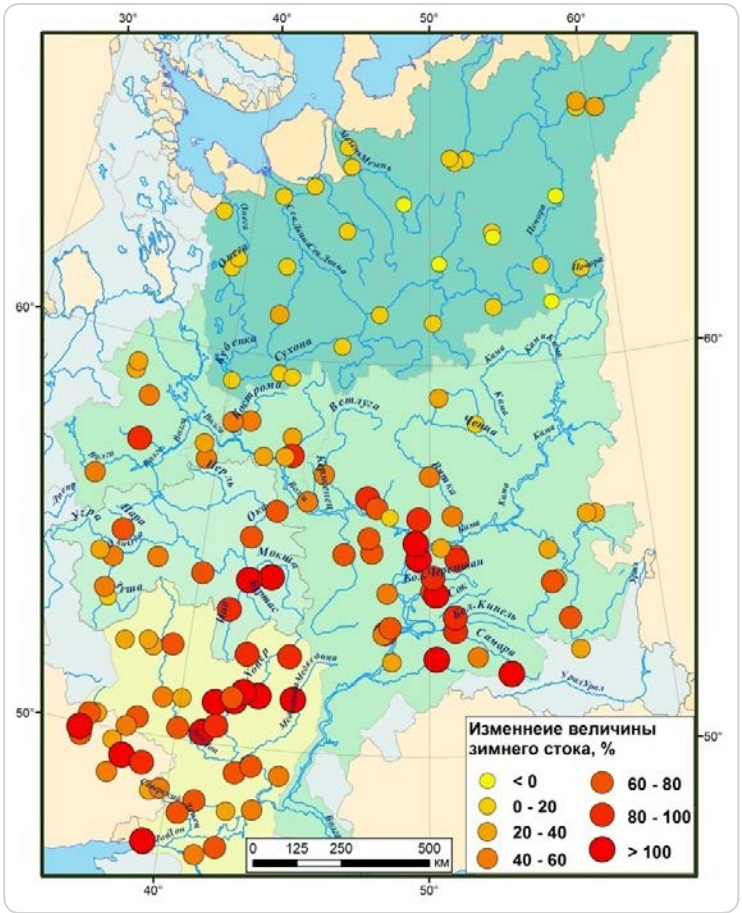


Рис. 2.
Сумма осадков за ноябрь-март (Анна – бассейн Битюга)

Рис. 3.
Изменение величины зимнего стока рек Северного края, бассейна Волги и Дона за период 1975–2010 гг. по сравнению с 1940–1974 гг. (%)



для этих двух периодов. Увеличение меженных зимних расходов речных вод приводит к уменьшению объемов и максимальных расходов весеннего половодья в связи с частичным оттаиванием почв зоны аэрации во время оттепелей. В результате водность рек и уровень подземных вод в холодный сезон увеличиваются [2].

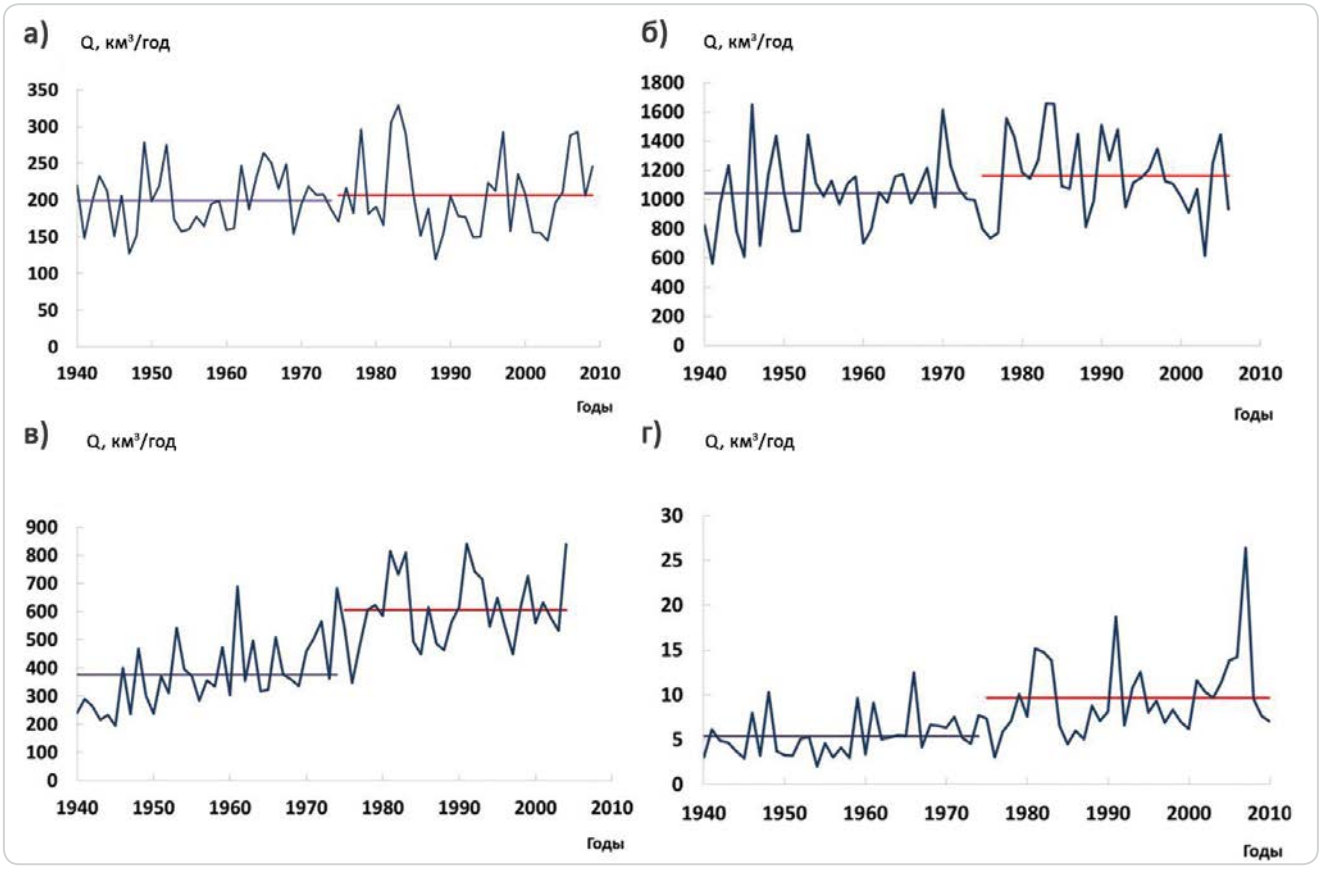
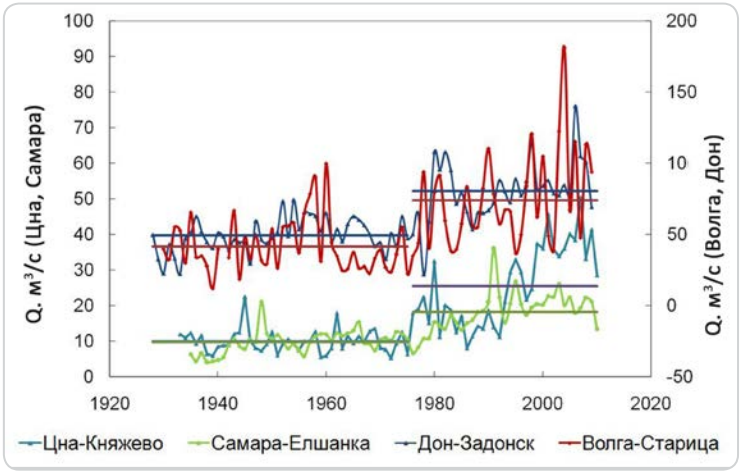


Рис. 4.
Многолетнее изменение среднего за зимнюю межень расхода воды (м³/с): а – Мезень–Малонисогорская; б – Северная Двина–Усть-Пинега; в – Ока–Калуга; г – Битюг–Бобров. Выделены средние значения стока за зимнюю межень до (красная линия) и после (зеленая линия) 1975 г.

Рис. 5.
Многолетние колебания минимальных месячных расходов воды зимней межени на реках ЕЧР



За холодный сезон года для большей части европейской территории России принято считать период с ноября по март. Однако на некоторых реках южной ее части половодье может начаться и в феврале. Для рек Северного края зимняя межень может затянуться до апреля-мая. Кроме того, для бассейнов рек Дона и Волги иногда отмечаются высокие значения стока в ноябре и декабре, которые связаны с запоздалыми или продолжающимися осенними паводками и не связаны с зимними оттепелями. В связи с этим границы различных характеристик зимней межени проводилось по величинам среднемесячных расходов воды. Период формирования зимней межени состоял из 2 частей: периода истощения стока, вплоть до месяца с минимальным среднемесячным значением расхода, и периода постепенного увеличения стока после этого минимума.

Для анализируемых 140 гидрологических постов за каждый год исследуемого периода с 1940 по 2010 гг. выделены границы зимней межени и получена ее продолжительность, за которую по данным среднемесячных расходов рассчитывался средний за зимнюю межень расход воды и объем стока. Для гидрологических постов изменение величины зимнего стока рассчитывалось по среднемесячным значениям расходов воды в процентах за период с 1975 по 2010 гг. по сравнению с периодом 1940–1974 гг. По полученным данным производилась оценка пространственно-временной изменчивости величины зимнего стока и его основных характеристик.

По условиям формирования и особенностям пространственного различия в изменении величины зимнего стока анализируемые бассейны

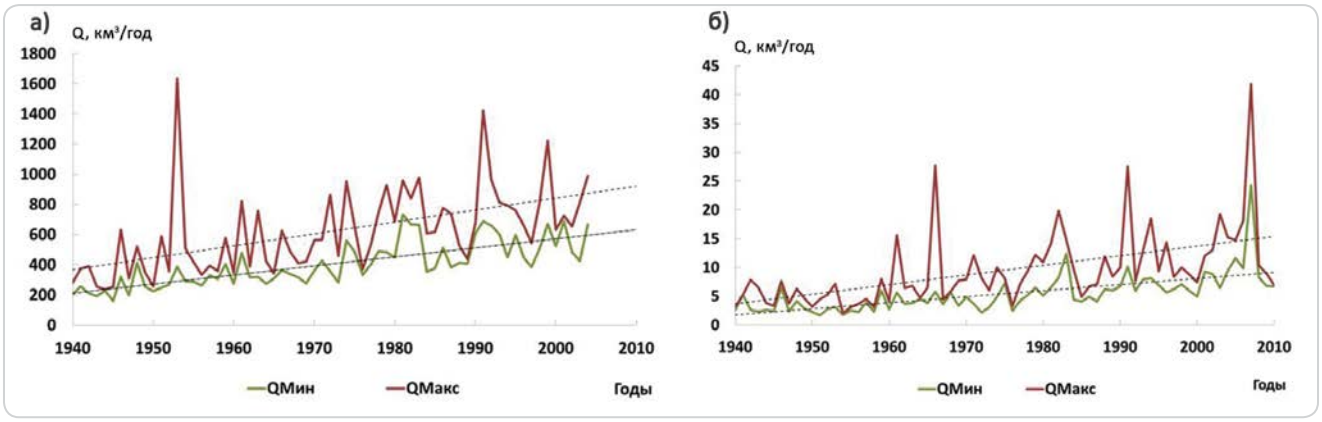
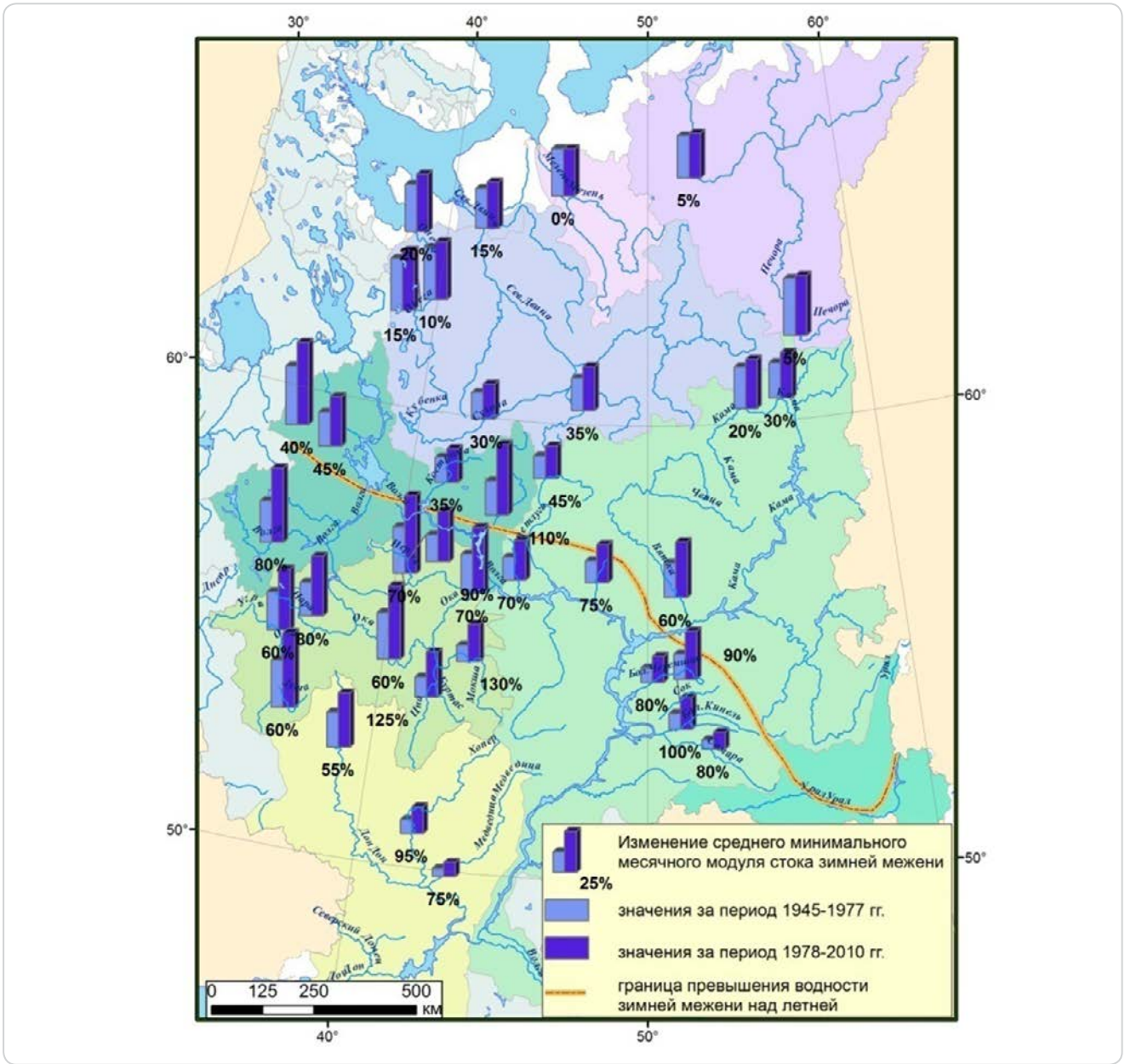


Рис. 6.

Многолетнее изменение минимального месячного за зимнюю межень расхода воды и максимального месячного расхода на начало зимнего периода (м³/с): а – Ока–Калуга; б – Битюг–Бобров

Рис. 7.

Распределение изменения минимального месячного модуля стока зимней межени рек ЕЧР в 1978–2010 гг. по сравнению с 1945–1977 гг.



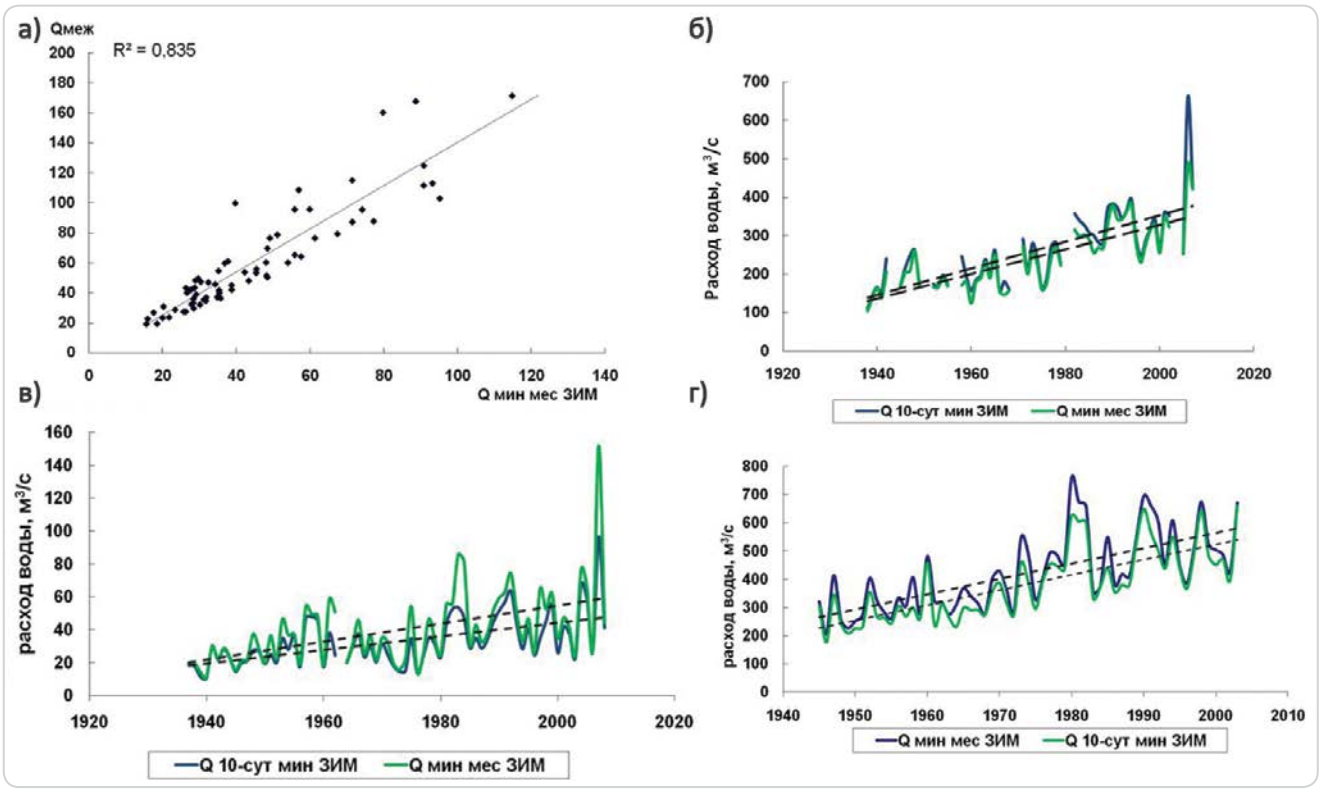
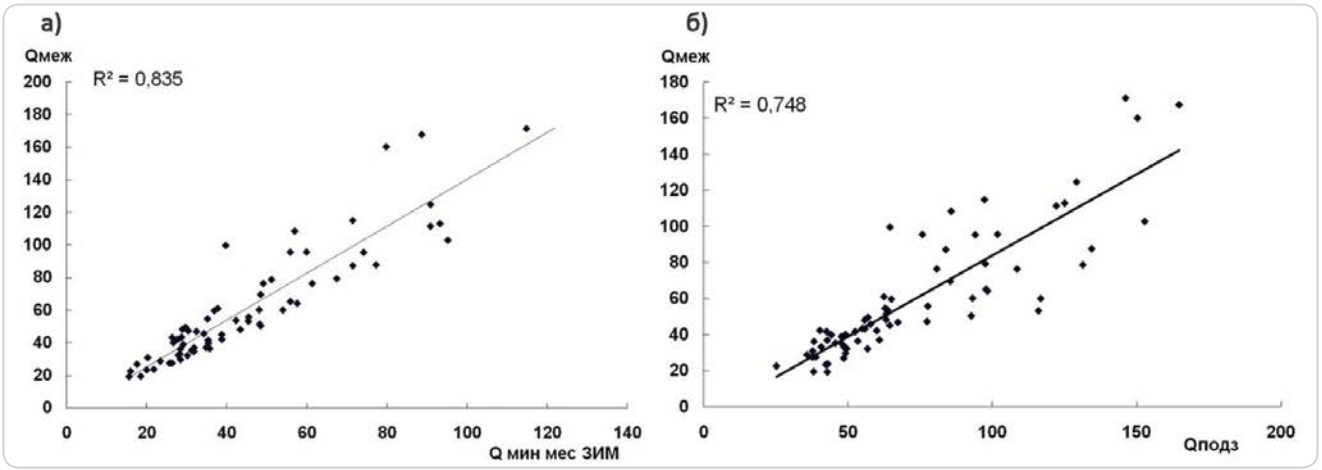


Рис. 8.
Сопоставление многолетних колебаний характеристик минимального месячного и минимального 10-суточного расхода воды рек: а – Унжа–Кологрив; б – Вятка–Вятские поляны; в – Молога–Устюжна; г – Ока–Муром

Рис. 9.
Связь величины стока за зимнюю межень: а – с минимальным месячным расходом за нее; б – с величиной подземного стока (на примере поста Унжа–Кологрив)



ЕЧР можно разделить на три части: 1 – реки Северного края (Онега, Мезень, Печора, Северная Двина); 2 – бассейн Волги (верхняя Волга, нижняя Волга, бассейн Камы, бассейн Оки); 3 – бассейн Дона.

Расчеты показали, что более чем на 95% постов наблюдается повышение величины зимнего стока, т.е. положительный тренд в его изменении. Для 82% постов рек бассейна Волги и Дона и для 43% рек Северного Края этот тренд оказался значимым по критерию Спирмена. Для рек бассейна Дона увеличение водности за зимний период с 1975 г. по 2010 г. составило от 20 до 100% и более, для рек бассейна Волги – от 10 до 100 и более процентов, а для рек Северного края характерное повышение не превышает 30% (***рис. 3***).

В зависимости от климатической зоны, в которой располагается исследуемый бассейн реки, изменчивость стока за зимнюю межень выражена в большей или меньшей степени. Чем южнее находится водосбор реки, тем ярче выражены изменения, происходящие в водном режиме реки (***рис. 4***).

Для водохозяйственных целей помимо оценок средних величин стока за зиму важны оценки основной гидрологической характеристики, лимитирующей возможность забора воды из реки – минимального среднемесячного расхода. Амплитуда колебаний зимних расходов определяется изменчивостью их максимальных и минимальных значений в течение холодного сезона. Под продолжительностью истощения зимнего стока понимается период между датами наступления максимального расхода воды и последующего за ним минимального расхода или полного прекращения стока. Интенсивность истощения зимнего стока определяется отношением амплитуды зимней межени на продолжительность периода истощения и отражает среднее за сезон суточное уменьшение расхода воды в реке. Эти характеристики истощения зимнего стока определяются как зональными, так и азональными факторами. Более 80% рассмотренных гидрологических постов за период после 1975 г. имеют положительный тренд не только для среднего зимнего стока, но и для среднемесячного минимального и максимального стока за зимнюю межень (***рис. 5, 6***). Это, прежде всего, связано с тем, что наблюдавшееся в последние десятилетия потепление сказывается на динамике снеготаяния и активности эпизодического протаивания зоны аэрации, что, в свою очередь, способствует более интенсивному питанию подземных и почвенных вод талыми водами и в результате приводит к снижению максимальных (весенних) расходов рек.

Как и в случае с увеличением среднего расхода воды за зимний период, наиболее интенсивно изменения минимального и максимального месячного расхода за зимнюю межень происходят в центральных и южных областях европейской территории России (***рис. 7***).

Многолетние колебания минимального месячного расхода воды зимней межени достоверно отражают временную динамику минимальной водности рек в период зимней межени. Это доказано сопоставлением многолетних колебаний минимальных месячных расходов воды с многолетними колебаниями минимальных 30-суточных, 10-суточных расходов воды (***рис. 8***). Они практически повторяют друг друга на всех исследованных реках ЕЧР. Таким образом, интенсивный рост минимальных месячных расходов воды, наблюдающийся со второй половины 1970-х гг., обусловлен увеличением именно базисного, подземного питания, а не учащением числа случаев прохождения паводков в минимальный по водности месяц года (***рис. 9***).

Выводы

Значимое увеличение стока за зимний период для рек бассейна Дона и Волги вызвано, прежде всего, смещением дат установления зимней межени и участившимся числом оттепелей в это время, а также увеличением количества жидких осадков за счет сокращения твердых осадков. Это, в свою очередь, обуславливает уменьшение запаса воды в снежном покрове и, как следствие – понижение стока за месяцы половодья.

Зональность в увеличении величин как зимних, так и минимальных, и максимальных месячных расходов прослеживается с юга на север ЕЧР, что обусловлено ландшафтно-климатическими факторами в сочетании с особенностями геолого-геоморфологического строения водосборов и их гидрогеологическими условиями. Установленные вариации зимнего стока свидетельствуют об изменениях естественных ресурсов подземных вод, которые в региональном масштабе оцениваются по величинам меженного стока рек. Именно зимний сток и его минимальные значения могут служить нижним пределом использования водных ресурсов на территории данного водосбора, что следует учитывать при планировании размещения водоемких производств.

Литература

1. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб. 2008. 598 с.
2. Георгиевский В.Ю. Изменение стока рек России и водного баланса Каспийского моря под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления. Автореф. дисс… д-ра геогр. наук, СПб. ГГИ. 2005. 39 с.
3. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. Современные водные ресурсы и режим стока рек бассейна Дона // Водные ресурсы. 2012. Т. 40. № 6. С. 573–584.
4. Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2012 г. М. 2013. 86 с.
5. Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2011 г. М. 2012. 83 с.
6. Христофоров А.В. Теория вероятностей и математическая статистика. М. 1988. 131 с.
7. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Бабкин В.И., Балонишникова Ж.А. Проблемы формирования и оценки изменений водных ресурсов и водообеспеченности России / Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 23–33.