

ГЛАВА 2

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

В. Ю. Георгиевский, А. Л. Шалыгин

ВВЕДЕНИЕ

Основой для исследований и оценок реакции стока на изменения климата на территории России являются данные многолетних наблюдений на гидрологической сети Росгидромета. В настоящее время наблюдения за стоком рек производятся на 2170 гидрологических постах.

По данным многолетних наблюдений определяются основные расчетные гидрологические характеристики: годовой сток и его внутригодовое распределение, сезонный, максимальный и минимальный сток.

Оценка этих гидрологических характеристик на перспективу всегда относилась к числу наиболее актуальных проблем в научной гидрологии. Она непосредственно связана с решением важнейших практических задач по планированию водообеспечения хозяйственных объектов и населения, развитию гидроэнергетики, обоснованию крупных водохозяйственных мероприятий по регулированию стока, его внутрибассейновому и территориальному перераспределению и др.

На протяжении XX в. были разработаны и к настоящему времени используются практически во всех странах мира методы оценки гидрологических характеристик, основанные на применении теории вероятностей. Эти методы разработаны на основе изучения закономерностей многолетних колебаний стока и базируются на гипотезе стационарности гидроклиматических условий в прошлом и обозримом будущем. Правомочность этой гипотезы подтверждалась результатами исследований колебаний стока рек мира, имеющих

наиболее длительные ряды наблюдений до последней четверти XX в.

Однако с учетом современных реалий водохозяйственной практики, увеличивающихся требований к надежности оценки будущих параметров гидрологического режима водных объектов, последних достижений науки в области теории климата и влагооборота применительно к речным бассейнам необходимо дополнительно рассмотреть ряд важнейших вопросов. Они имеют ключевое значение в проблеме прогнозной оценки гидрологических характеристик на перспективу в условиях заметно меняющегося климата.

В настоящее время правомочность концепции стационарности многолетних колебаний гидрометеорологических величин поставлена под сомнение в связи с усилившимися в последние десятилетия XX в. и начале XXI в. процессами глобального потепления. Очевидно, что происходящие изменения климата уже привели в ряде крупных регионов к существенным изменениям водного режима рек.

Учитывая достоверность произошедшего потепления и большую вероятность его продолжения в течение нынешнего столетия, необходимо отметить, что проблема оценки современных и ожидаемых климатообусловленных изменений водных ресурсов и водного режима перешла из разряда общих теоретических в совершенно практические.

Ниже рассмотрен комплекс вопросов, связанных с диагностикой современных и ожидаемых изменений речного стока на примере бассейна р. Волга.

ИСХОДНАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Речной сток

В соответствии с ранее разработанной в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) Росгидромета методологией (Водные ресурсы..., 2008), основой диагноза современных изменений речного стока является комплексный статистический анализ динамики годового, весеннего, летне-осеннего и зимнего стока средних рек, а также его внутригодового распределения. Выбор в качестве объектов исследований средних рек очевиден, поскольку динамика их стока определяется прежде всего климатическими факторами, а их бассейны являются репрезентативными для соответствующих физико-географических зон.

Выбор створов производился с учетом следующих условий.

1. Для объективной количественной оценки возможных направленных изменений годового и сезонного стока рек использовались ряды с продолжительностью наблюдений 55 лет и более и отсутствием или минимальным числом пропусков в наблюдениях.

2. При анализе изменений стока и его внутригодового распределения под влиянием климатических факторов не использовались данные по створам, выше которых имеются водохранилища сезонного или многолетнего регулирования.

В случаях, если водосбор крайне необходим для исследований, а его гидрологический режим нарушен влиянием хозяйственной деятельности, предварительно производилась ретрансформация (приведение к естественным условиям) рядов характеристик стока.

С учетом соблюдения перечисленных выше условий был подготовлен архив данных о месячном стоке 79 рек, расположенных в бассейне Волги и на сопредельных территориях (рис. 2.1). По большинству рек архив содержит

данные за период по 2007 или 2008 г. включительно.

Данные о месячном стоке средних рек с естественным водным режимом послужили информационной основой для оценки гидрологических последствий потепления последних десятилетий.

Данные воднобалансовых наблюдений

Анализ текущих изменений гидрологического режима в бассейне р. Волга на основе данных стандартной гидрологической сети позволяет выполнить оценку происходящих изменений стока воды рек бассейна в условиях потепления климата. Однако для понимания процессов изменений во всей системе влагооборота на водосборах и физически обоснованного моделирования стока воды необходимо оценить изменения и других компонентов водного баланса, определяющих формирование стока: испарения с поверхности почвы и воды, изменения содержания воды в почвогрунтах и грунтовых водах. Для решения этой задачи к анализу были привлечены материалы наблюдений специализированной сети воднобалансовых станций Росгидромета, где осуществляется наиболее полный комплекс гидрометеорологических наблюдений за элементами водного баланса и определяющими их факторами.

Непосредственно в рассматриваемом бассейне расположена Подмосковная воднобалансовая станция (зона смешанных лесов). Кроме того, в районах, примыкающих к средней и нижней частям бассейна р. Волга, действуют Валдайский филиал ГГИ (ВФ ГГИ), Нижнедевицкая воднобалансовая станция (НД ВБС) и воднобалансовая станция Каменная Степь. Они являются репрезентативными соответственно для условий лесной зоны южной тайги, лесостепной и степной зон. Период наблюдений на воднобалансовых станциях составляет 50—60 лет и более (с конца 1940-х — начала

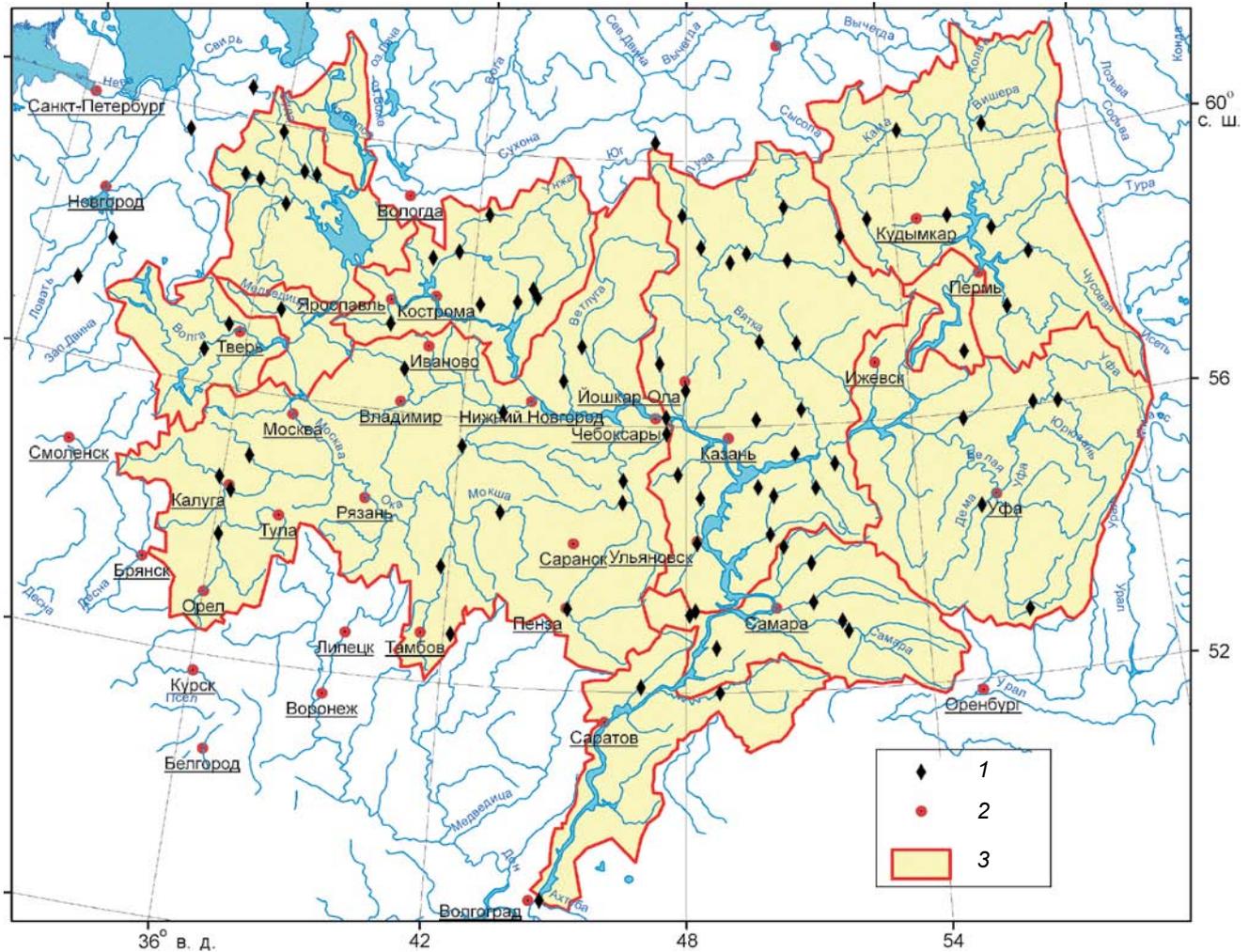


Рис. 2.1. Схема расположения гидрологических постов в бассейне р. Волга, данные которых использовались для статистического анализа многолетних изменений стока. 1 — гидрологический пост; 2 — центр субъекта РФ; 3 — граница водосборов водохранилищ Волжско-Камского каскада.

1950-х годов). К сожалению, в 1990-х годах многие важные объекты на воднобалансовых станциях были закрыты, а некоторые виды наблюдений полностью прекращены. Тем не менее сохранившиеся в настоящее время виды наблюдений позволяют проанализировать общие тенденции изменения влагооборота на водосборах, а также оценить параметры и протестировать физико-математические модели процессов формирования стока воды в условиях изменяющегося климата.

Механизм влияния изменений климата на водный режим рек наиболее детально был

проанализирован по результатам наблюдений на Подмосковной воднобалансовой станции, расположенной непосредственно в бассейне р. Волга, за период от начала наблюдений в 1946 г. до 2008—2009 гг., а также по результатам наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции. Эти станции имели наиболее удачную “гнездовую” систему размещения объектов наблюдений (т. е. систему “вложенных” водосборов от начального звена гидрографической сети до более крупных водосборов, дренирующих основной региональный горизонт грунтовых вод).

По материалам этих станций и ВФ ГГИ созданы архивы данных по отдельным объектам и пунктам наблюдений, привлекаемых к анализу изменений влагооборота. Эти архивы включают в себя информацию за период производства наблюдений о следующих величинах: атмосферные осадки, температура воздуха, сток воды, испарение с поверхности воды и почвы, влагозапасы в почве в слое 1 м, уровни грунтовых вод, промерзание и оттаивание почвогрунтов.

СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТООБУСЛОВЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА РЕК

Методология оценки и примеры расчетов

С учетом того, что проблема нарушения однородности и стационарности многолетних рядов гидрологических характеристик имеет принципиальное значение для обоснования возможных подходов к оценке будущих параметров стока рек, в ГГИ были выполнены исследования статистической структуры временных рядов годового, сезонного и месячного стока 79 средних рек бассейна р. Волга (рис. 2.1). Статистический анализ многолетних изменений водности этих рек проводился в четыре этапа.

На первом этапе для оценки интенсивности происходящих изменений водности рек и их статистической значимости были выполнены расчеты трендов месячного и сезонного стока для всего расчетного периода 1946—2007 гг. Для всех рядов годового, сезонного и месячного стока рассчитывали линейные тренды методом наименьших квадратов. Оценку статистической значимости трендов проводили в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе И. И. Поляка (1975). Для принятия гипотезы о наличии линейного тренда использован 95%-ный уровень значимости.

На втором этапе выполнялся статистический анализ рядов месячного, сезонного и годового стока с целью выявления возможных резких изменений (переломов во временном ходе) в многолетних колебаниях водности, вызванных климатическими факторами. В результате анализа колебаний стока рассматриваемых рек было установлено, что со второй половины 1970-х годов на реках бассейна и сопредельных территорий отмечается фаза повышенной водности, характеризующаяся прежде всего существенным увеличением меженного стока. Для иллюстрации этого явления в качестве примера на рис. 2.2 и 2.3 представлены графики изменения зимнего и летне-осеннего стока рек, расположенных в разных частях бассейна Волги, по которым имеются ряды наблюдений наибольшей длины.

Для дальнейшего анализа было выделено два периода: 1946—1977 гг., в течение которого не отмечалось направленных изменений водности, и 1978—2007 гг., в течение которого произошло существенное увеличение стока меженных месяцев.

На третьем этапе оценивались изменения годового и месячного стока рек за период 1978—2007 гг. по отношению к периоду 1946—1977 гг. Данные расчетов по 79 рекам в дальнейшем использовались для районирования территории бассейна Волги по характеру современных изменений сезонного и годового стока, а также его внутригодового распределения.

На четвертом этапе была выполнена оценка однородности годовых, сезонных и месячных рядов стока по критериям Стьюдента и Фишера (Свод правил..., 2004). Для оценки однородности дисперсий и средних значений по критериям соответственно Фишера и Стьюдента временной ряд разбивался на две подвыборки: 1946—1977 и 1978—2007 гг. Нарушение однородности устанавливалось при 95%-ном уровне значимости.

Для анализа пространственного распределения происходящих изменений стока, их направленности и интенсивности с помощью

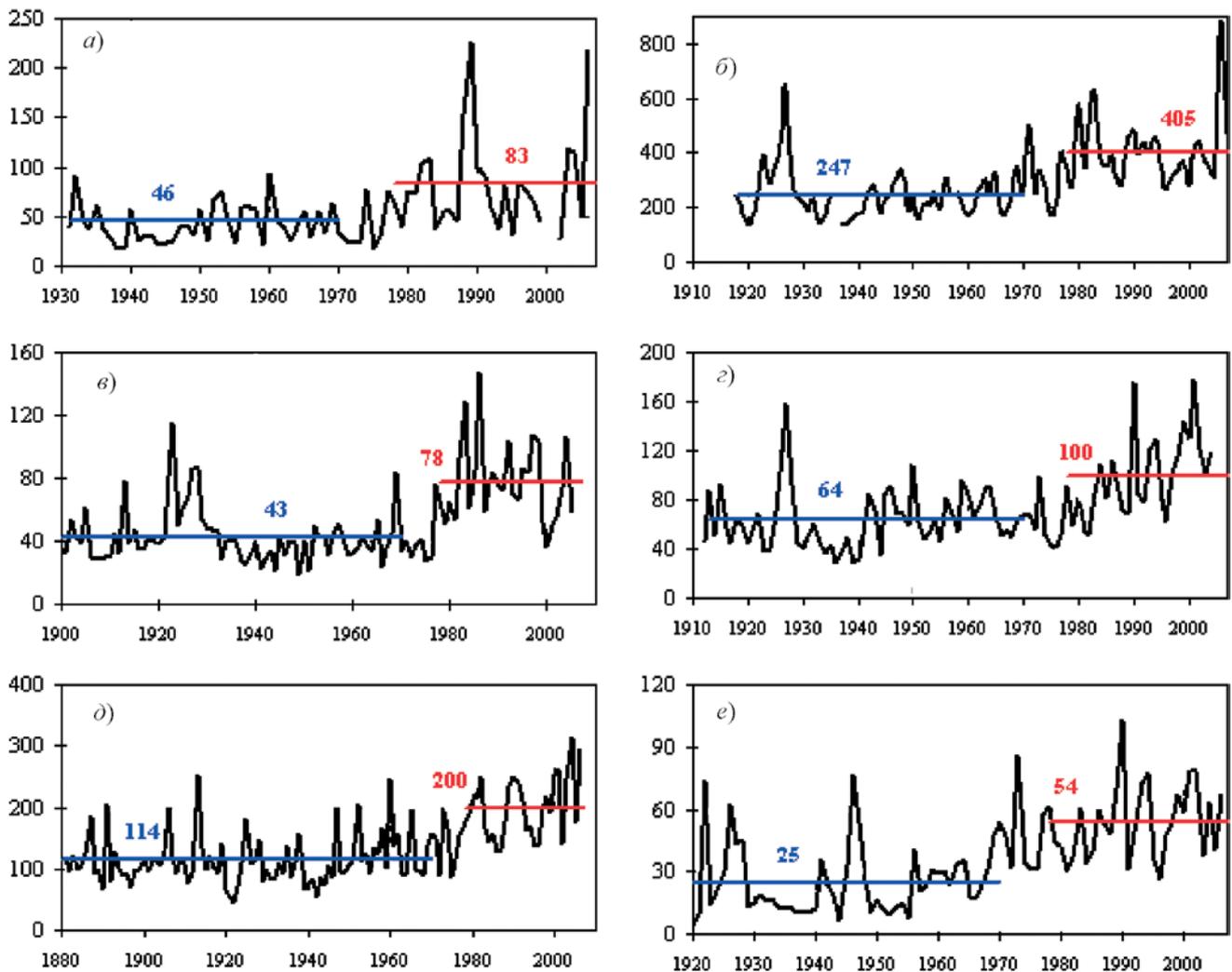


Рис. 2.2. Изменения зимнего стока ($\text{м}^3/\text{с}$) рек бассейна р. Волга. Горизонтальными отрезками показаны средние значения за периоды до (синий цвет) и после 1977 г. (красный цвет). а) р. Молога — г. Устюжна; б) р. Вятка — г. Вятские Поляны; в) р. Унжа — г. Макарьев; г) р. Уфа — с. Верхний Суян; д) р. Ока — г. Калуга; е) р. Белая — г. Стерлитамак.

ГИС-ArcGIS были построены карты-схемы следующих характеристик:

- аномалий годового и сезонного стока рек за период 1978—2007 гг. по отношению к предшествующему периоду 1946—1977 гг. с оценкой их значимости по критерию Стьюдента;
- отношений дисперсий годового и сезонного стока за два рассматриваемых периода с оценкой однородности по критерию Фишера;
- значений линейных трендов годового и сезонного стока за 1946—2007 гг. по отноше-

нию к среднему стоку за этот период, а также значимости этих трендов.

Отметим, что расчетные значения характеристик стока отнесены на картах-схемах к центрам тяжести соответствующих водосборов. На рис. 2.4—2.11 приведены перечисленные выше карты-схемы, дающие наглядное представление о современных изменениях характеристик годового и сезонного стока в бассейне р. Волга.

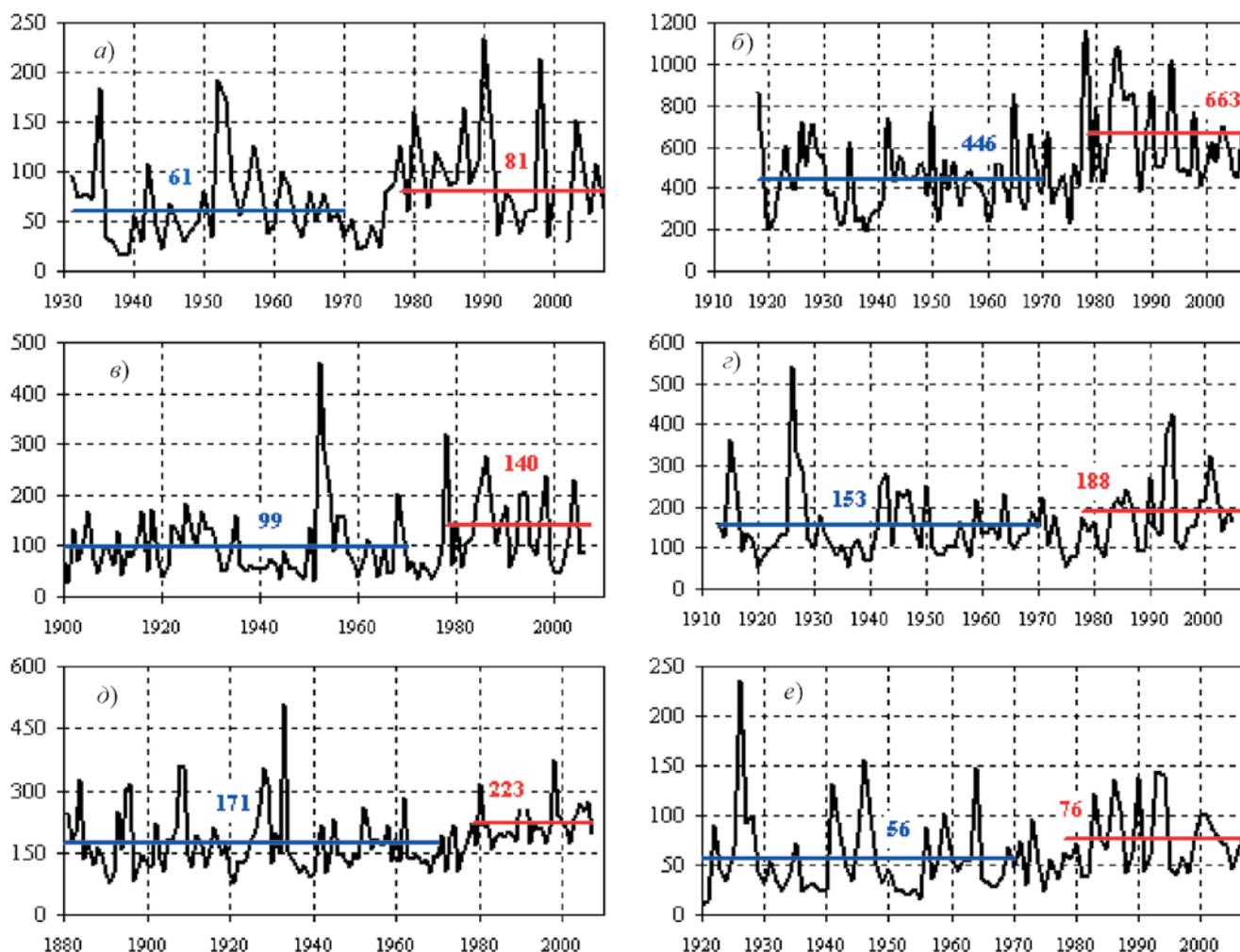


Рис. 2.3. Изменения летне-осеннего ($\text{м}^3/\text{с}$) рек бассейна р. Волга. Горизонтальными отрезками показаны средние значения за периоды до (синий цвет) и после 1977 г. (красный цвет). а) р. Молога — с. Устюжна; б) р. Вятка — г. Вятские Поляны; в) р. Унжа — г. Макарьев; г) р. Уфа — с. Верхний Суян; д) р. Ока — г. Калуга; е) р. Белая — г. Стерлитамак.

Результаты анализа изменений годового и сезонного стока

Годовой сток

Как видно на рис. 2.4, в 1978—2007 гг. на всей территории бассейна наблюдалось увеличение годового стока. Для рек, бассейны которых расположены севернее 56° с. ш., увеличение водности составляет в среднем 20—40 мм, а для бассейнов, расположенных южнее, — от 5 до 15 мм. В целом за период 1946—2007 гг. на реках бассейна Волги преобладают положительные тренды годового стока. Что касает-

ся изменчивости годового стока, то в 1978—2007 гг. на реках северной части бассейна отмечается увеличение дисперсии по отношению к предшествующему периоду, а на реках южной части — ее уменьшение (рис. 2.5).

Следует отметить, что результаты оценок однородности рядов годового стока по выборочным средним и дисперсиям пока не дают оснований говорить о наличии направленных изменений в характере многолетних колебаний водных ресурсов рек бассейна Волги, так как на большинстве рек они происходят пока в пределах естественной изменчивости.

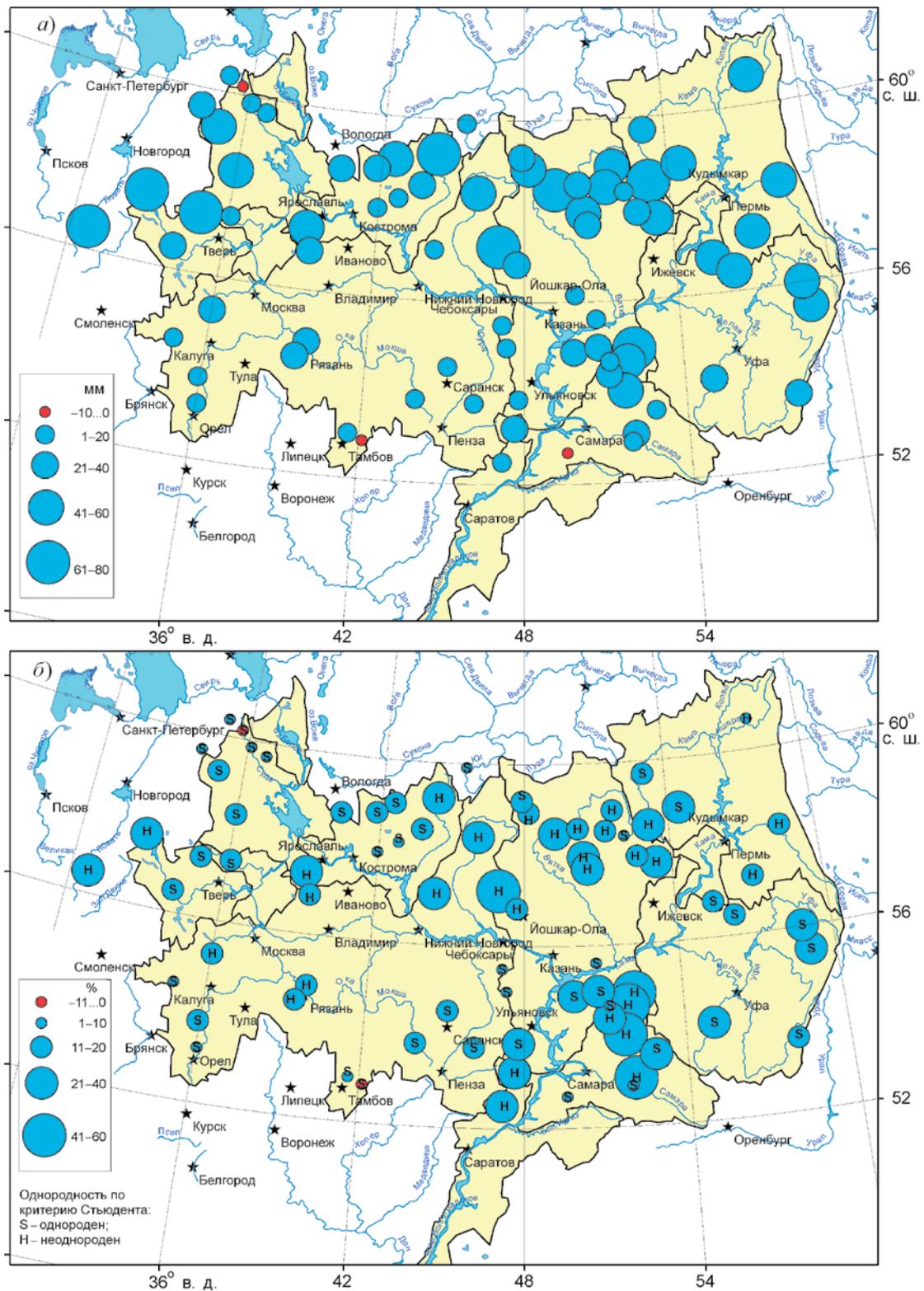


Рис. 2.4. Абсолютные (мм; а) и относительные (%; б) изменения среднего годового стока в бассейне р. Волга за период 1978—2007 гг. по отношению к периоду 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Стьюдента.

Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы

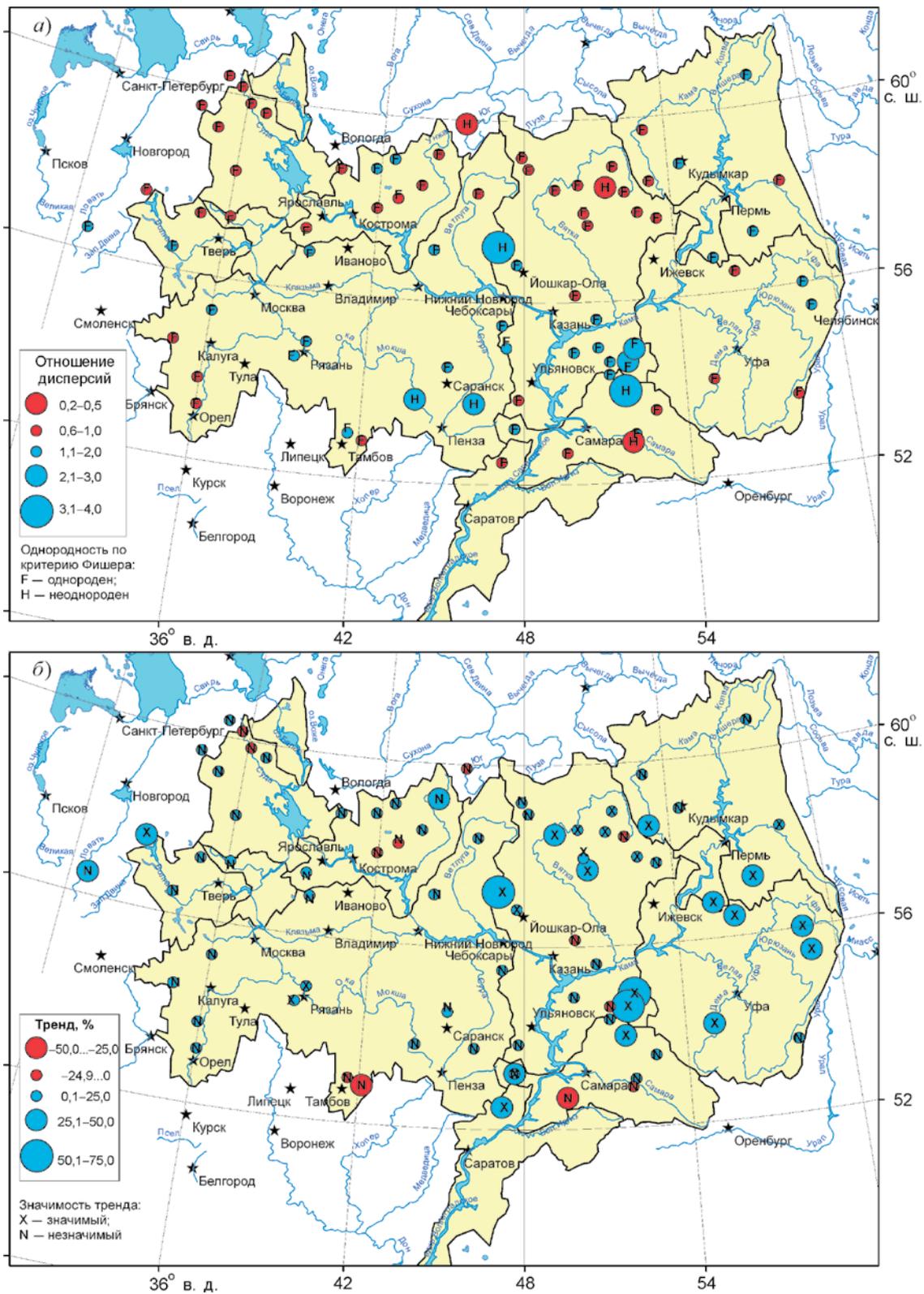


Рис. 2.5. Изменения статистических параметров годового стока в бассейне р. Волга: а) отношение дисперсий в периоды 1978—2007 и 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Фишера; б) тренды за период 1946—2007 гг. и их значимость.

Весенний сток

Для современных изменений весеннего стока характерно его увеличение в бассейнах Камы, Унжи и Ветлуги. На остальной части водосбора Волги весенний сток уменьшается (рис. 2.6). Направленность линейных трендов стока половодья соответствует отмеченным выше изменениям (рис. 2.7). На большинстве рек бассейна дисперсия весеннего стока уменьшается в последние десятилетия.

Наряду с оценками изменений весеннего стока был выполнен анализ максимальных расходов воды половодья. Характерные графики многолетних изменений максимальных расходов воды весеннего половодья незарегулированных рек бассейна, расположенных в разных природных зонах, показаны на рис. 2.12. Для рек северо-западной части бассейна, большая часть водосборов которых находится в лесной зоне южной тайги, типичен незначительный положительный тренд максимальных расходов весеннего половодья (р. Ветлуга) или фактическое его отсутствие (реки Молома и Вятка). При этом необходимо отметить, что с 1980-х годов здесь не наблюдалось очень больших максимальных расходов весеннего половодья, а изменчивость этой характеристики стока на большинстве рек уменьшилась.

Заметное увеличение максимальных расходов весеннего половодья наблюдается только на самых северных и северо-восточных реках таежной зоны с более суровым климатом, где отмечается увеличение количества зимних осадков (реки Унжа и Кама).

На реках лесостепной и степной зон наблюдается нарастающая тенденция к уменьшению максимального весеннего стока, менее заметная в зоне смешанных лесов (р. Кострома) и более отчетливая для рек, частично или полностью протекающих в полуаридных зонах (реки Ока и Большая Кинель). Здесь произошло двукратное уменьшение максимальных весенних расходов воды.

Летне-осенний сток

Увеличение летне-осеннего стока отмечается для всего бассейна р. Волга. Наиболее значительное увеличение стока летне-осенней межени наблюдается в южной части лесной зоны бассейна, а также в лесостепной и степной зонах. Здесь сток рек в 1978—2007 гг. был больше, чем в предшествующий период, в среднем на 50—100% (рис. 2.8); также отмечается преобладание положительных значимых трендов (рис. 2.9). За исключением р. Унжа и самых северных притоков р. Вятка везде увеличилась изменчивость летне-осеннего стока (рис. 2.9). Следует отметить, что в большей части рассмотренных рядов летне-осеннего стока отмечается неоднородность по критерию Стьюдента. Для большинства рек также выявлены значимые положительные тренды.

Зимний сток

На всех рассматриваемых 79 реках бассейна р. Волга в 1978—2007 гг. произошло значительное увеличение водности в зимний сезон (рис. 2.10). Оно составляет 50—150% по отношению к значению за 1946—1977 гг. При этом на 74 реках установлены значимые положительные тренды, а на 67 реках по критерию Стьюдента выявлено нарушение однородности рядов зимнего стока. Резко по отношению к предшествующему многолетнему периоду увеличилась дисперсия стока рек в холодный период года (рис. 2.11). Значимая неоднородность по дисперсии (критерий Фишера) отмечена на 52 реках.

Месячный сток

Для более детального анализа внутригодового распределения стока были выполнены исследования изменений месячного стока рек. На рис. 2.13 приведены обобщенные по 79 гидрологическим постам данные об оценке значимости трендов, однородности по среднему и дисперсии месячных рядов стока. Как видно на рис. 2.13а, в многолетних значениях

Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы

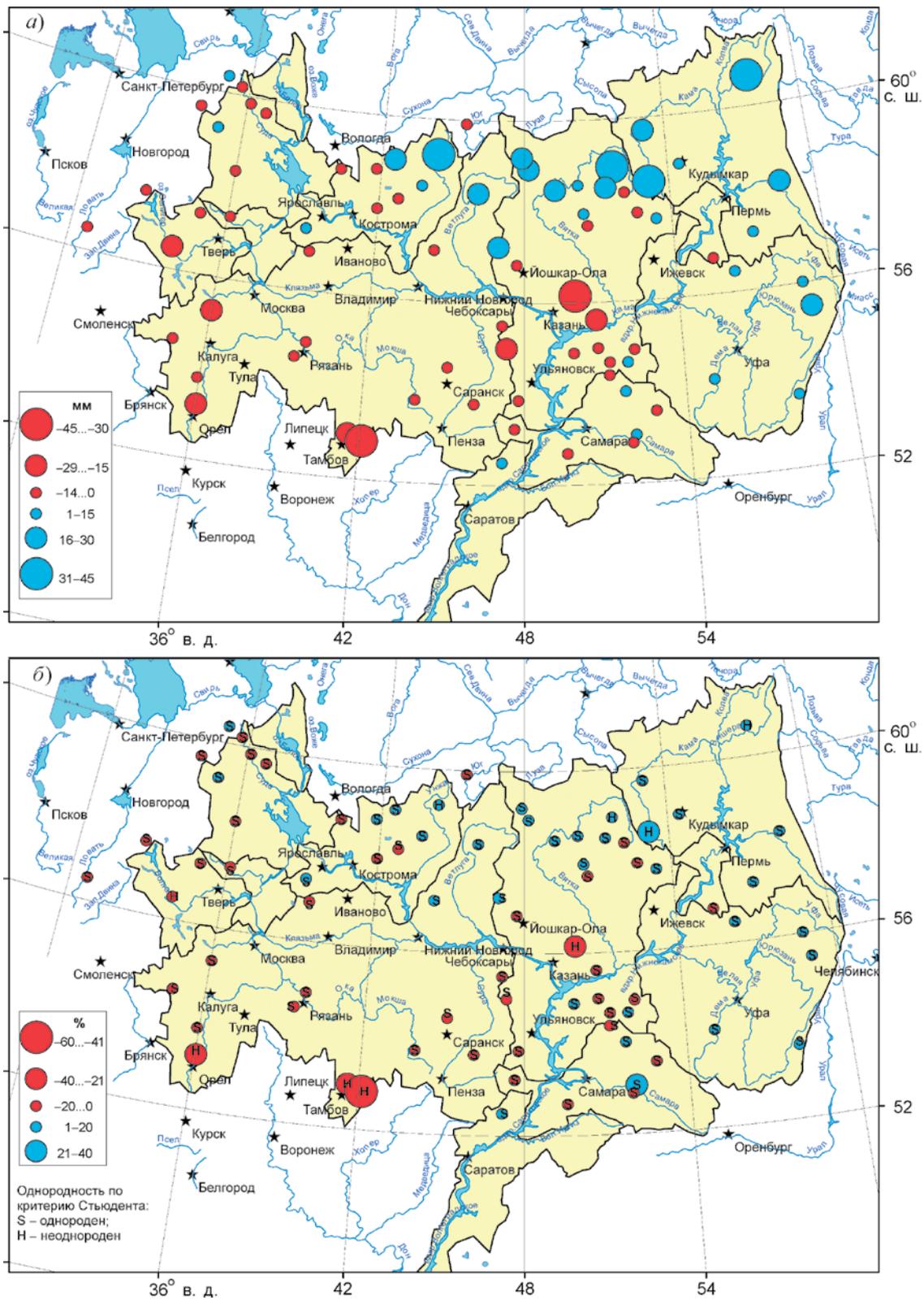


Рис. 2.6. Абсолютные (мм; *a*) и относительные (%; *б*) изменения весеннего стока в бассейне р. Волга за период 1978—2007 гг. по отношению к периоду 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Стьюдента.

Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы

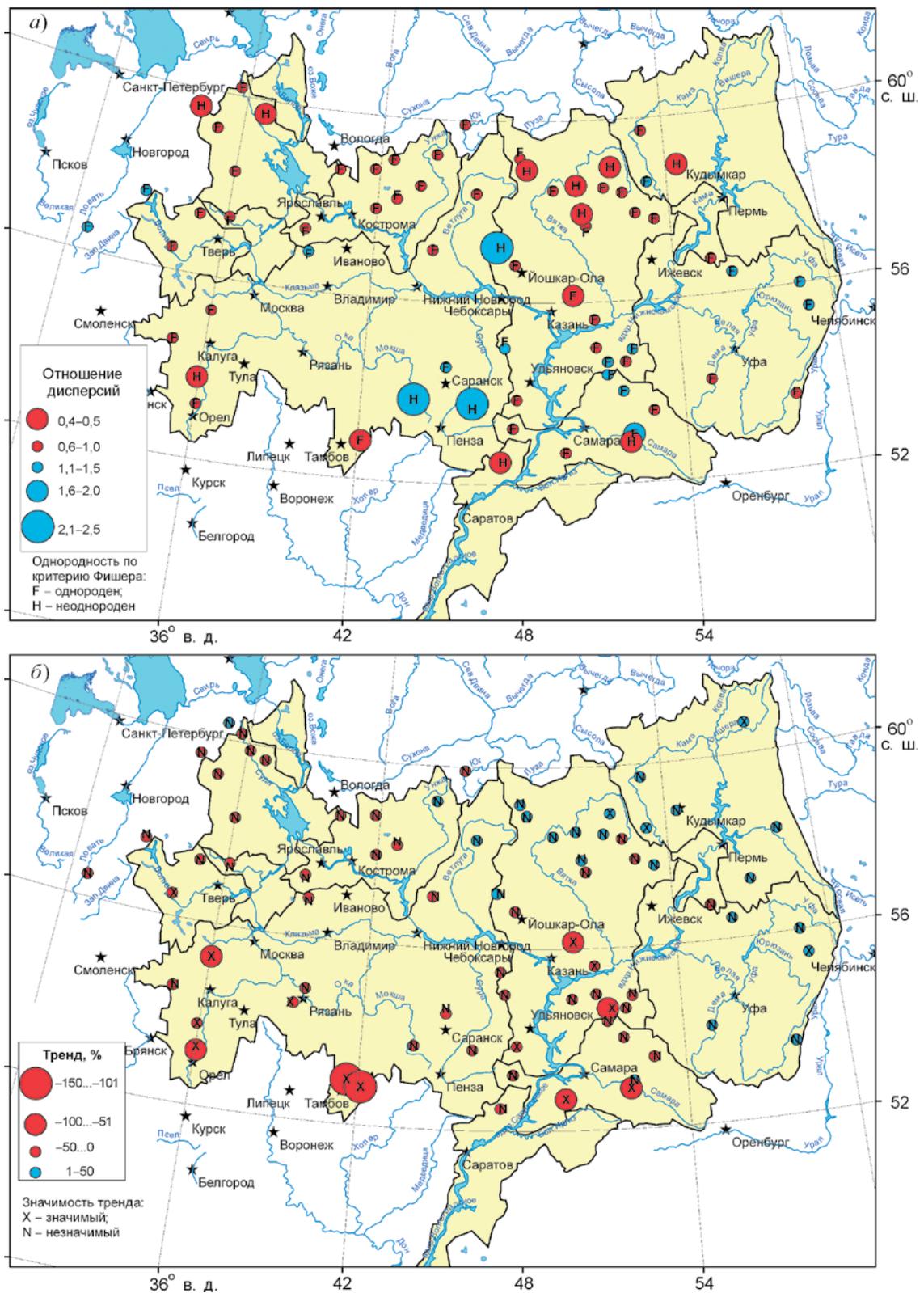


Рис. 2.7. Изменения статистических параметров весеннего стока в бассейне р. Волга: *а)* отношение дисперсий в периоды 1978—2007 и 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Фишера; *б)* тренды за период 1946—2007 гг. и их значимость.

Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы

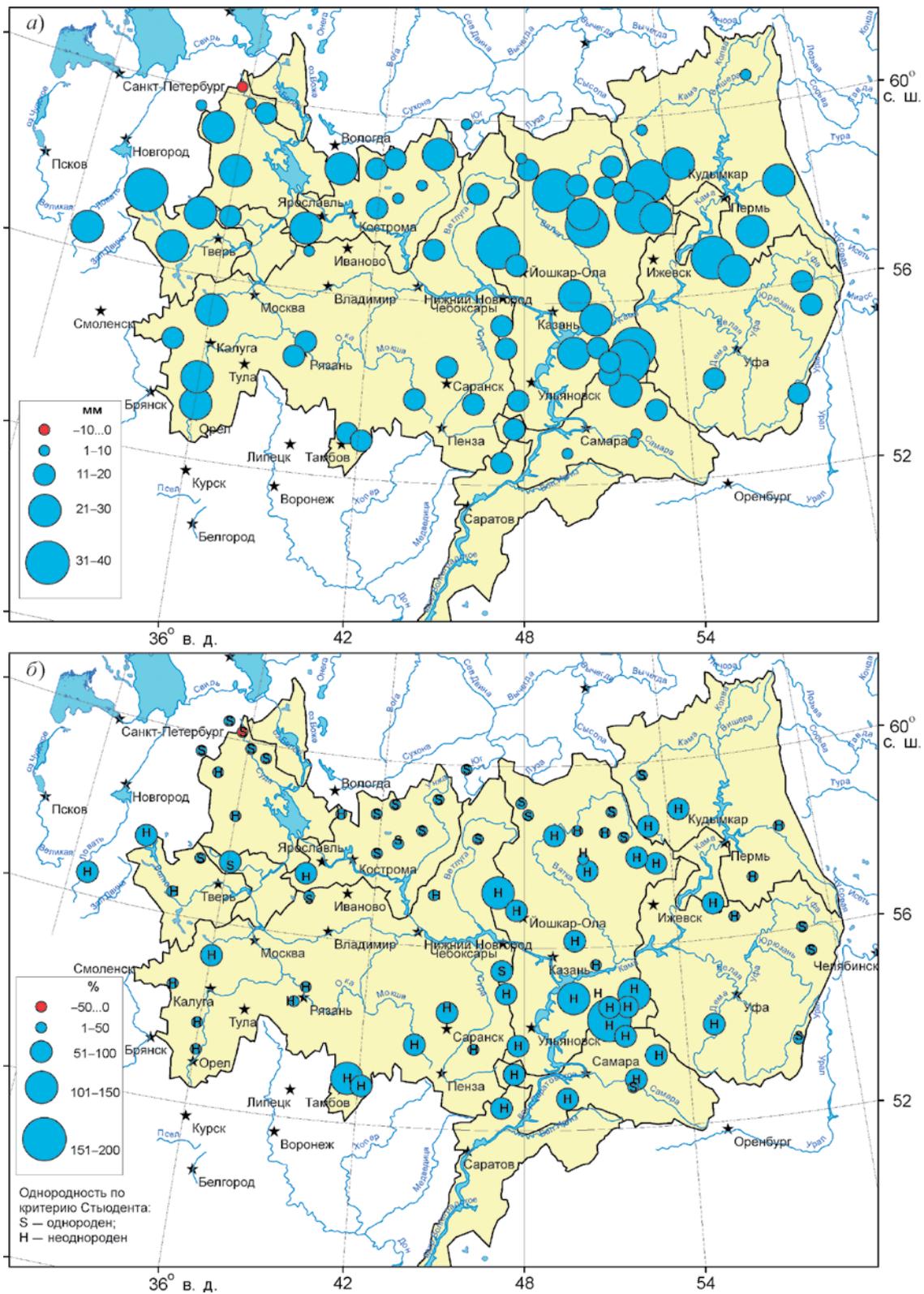


Рис. 2.8. Абсолютные (мм; *а*) и относительные (%; *б*) изменения летне-осеннего стока в бассейне р. Волга за период 1978—2007 гг. по отношению к периоду 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Стьюдента.

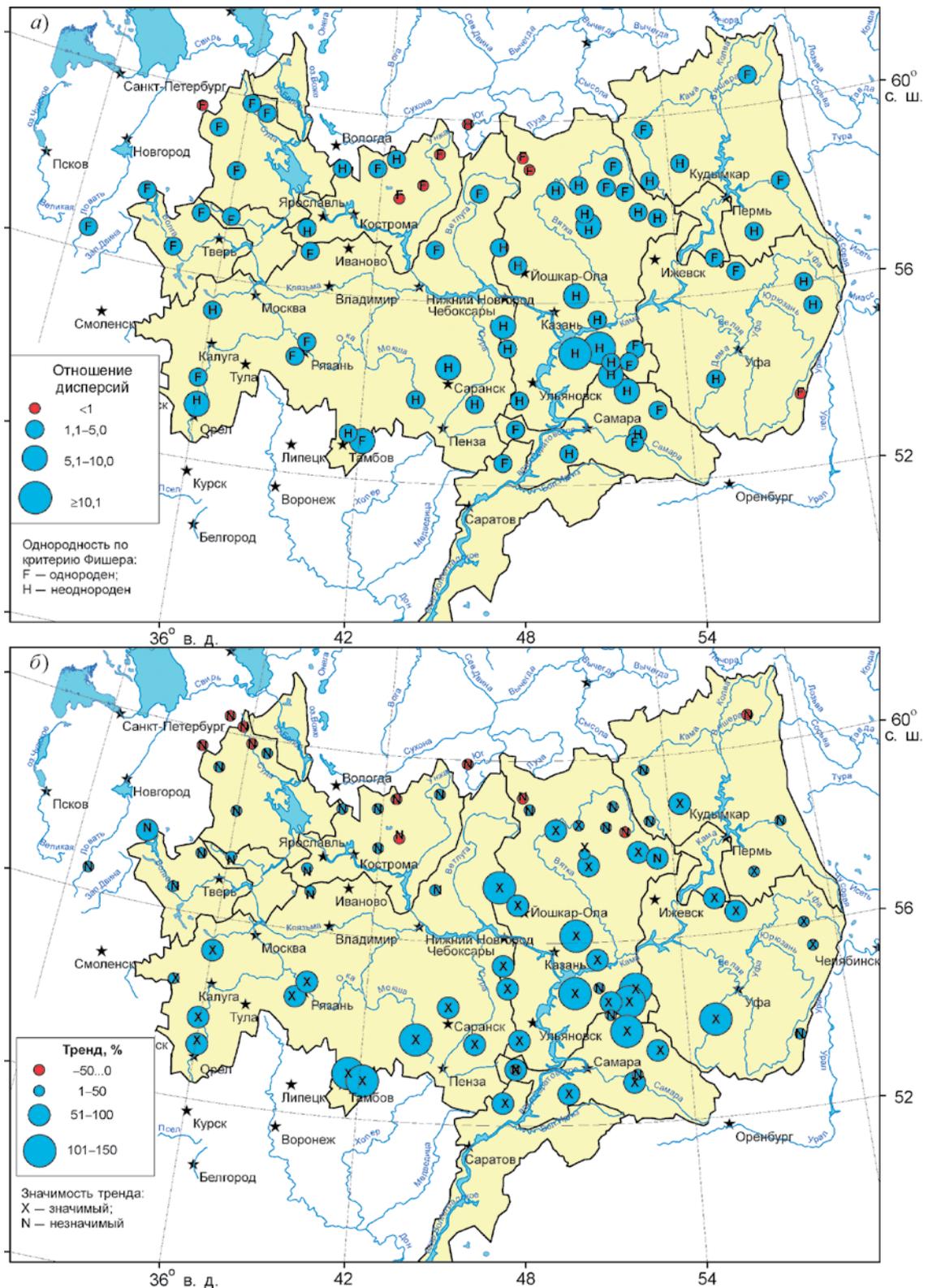


Рис. 2.9. Изменения статистических параметров летне-осеннего стока в бассейне р. Волга: а) отношение дисперсий в периоды 1978—2007 и 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Фишера; б) тренды за период 1946—2007 гг. и их значимость.

Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы

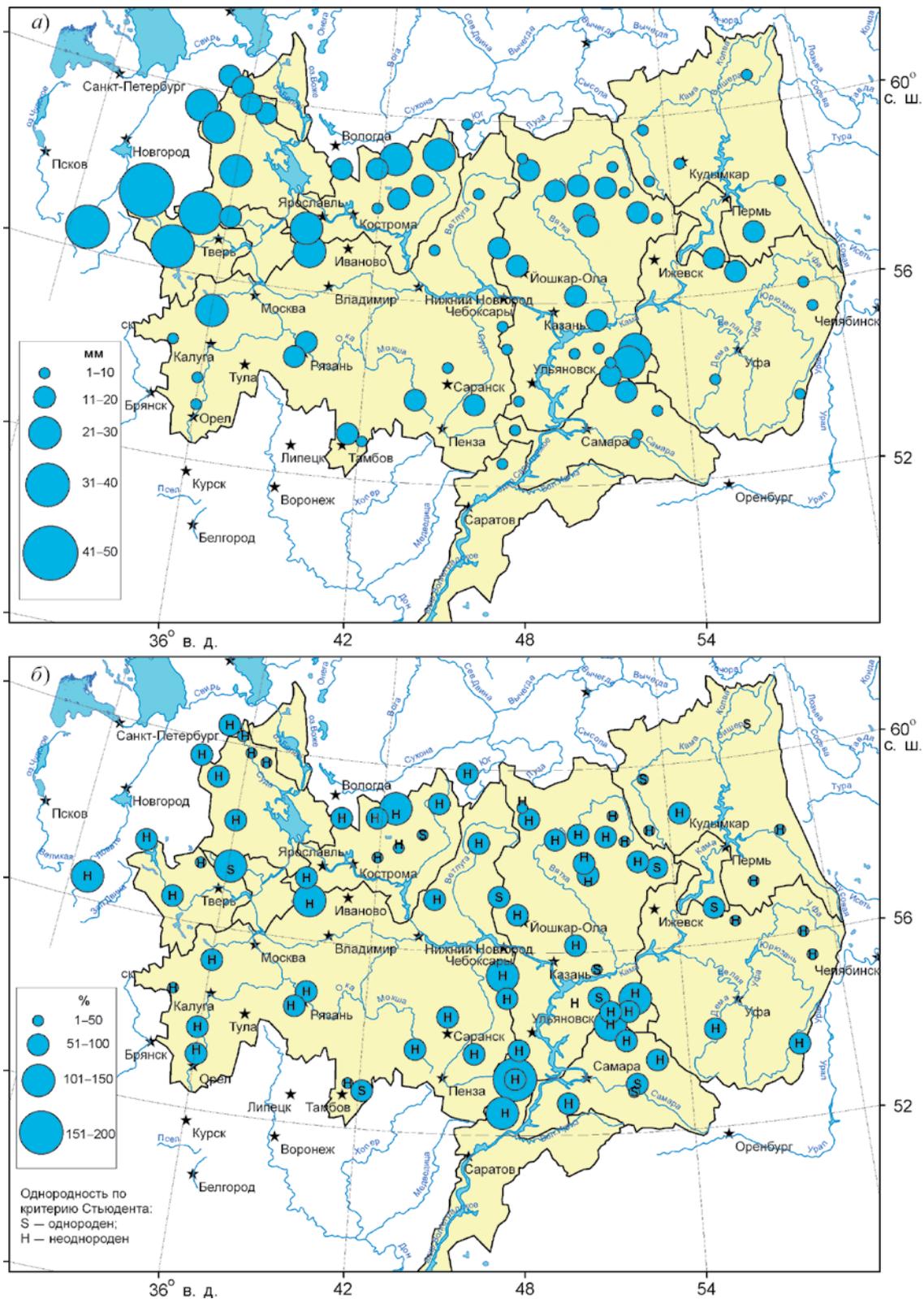


Рис. 2.10. Абсолютные (мм; *а*) и относительные (%; *б*) изменения зимнего стока в бассейне р. Волга за период 1978—2007 гг. по отношению к периоду 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Стьюдента.

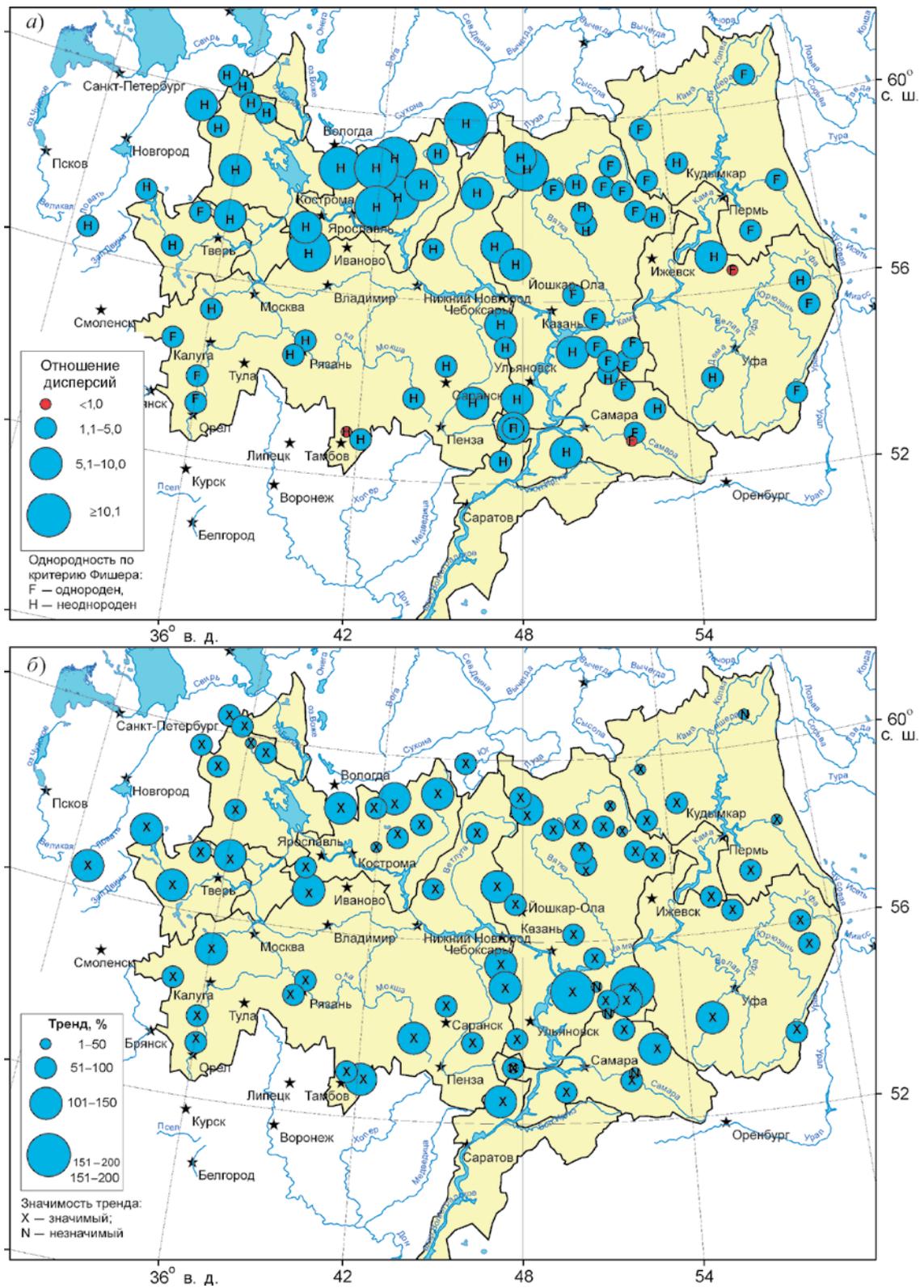


Рис. 2.11. Изменения статистических параметров зимнего стока в бассейне р. Волга: *а*) отношение дисперсий в периоды 1978—2007 и 1946—1977 гг. и оценка однородности по критерию Фишера; *б*) тренды за период 1946—2007 гг. и их значимость.

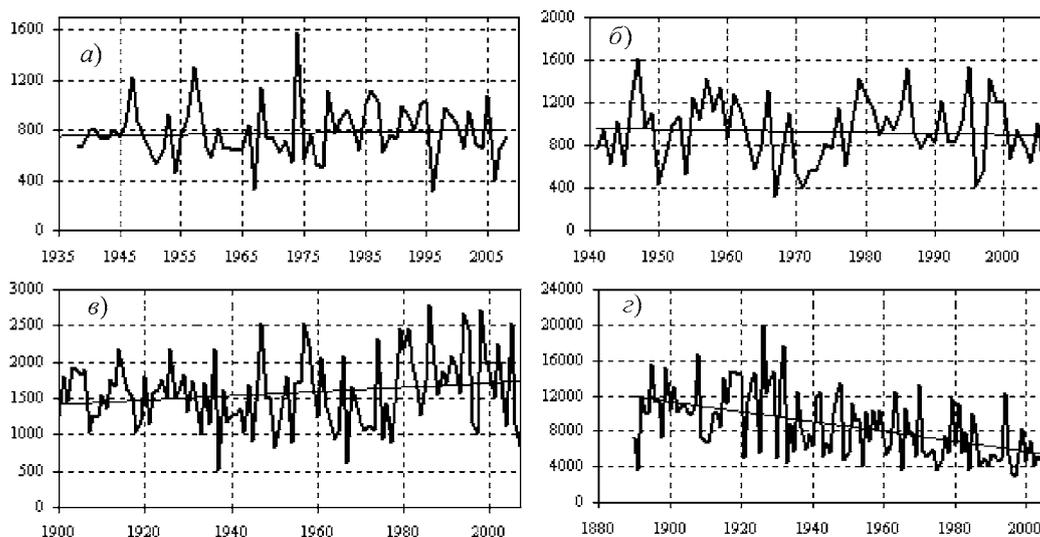


Рис. 2.12. Максимальные расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$) весеннего половодья в бассейне р. Волга. а) р. Молома — с. Спасское; б) р. Кострома — г. Буй; в) р. Унжа — г. Макарьев; з) р. Ока — г. Горбатов.

для стока в январе и феврале отмечаются значимые положительные тренды на 88—90% всех рассмотренных постов, для стока в марте и декабре — на 65—70%; в июне — ноябре примерно на половине постов наблюдаются значимые положительные тренды месячного стока. И только в значениях стока за апрель выявлены отрицательные значимые тренды на 24% постов.

В целом подобная ситуация наблюдается и со значимым превышением среднего стока за 1978—2007 гг. по отношению к среднему за 1946—1977 гг. (рис. 2.13б). Что касается дисперсии, то значительное ее увеличение наблюдается с января по март и с июля по октябрь (рис. 2.13в). На фоне общего уменьшения стока в апреле отмечается уменьшение размаха его колебаний.

При интерпретации обобщенных данных оценок однородности и стационарности месячных рядов стока (рис. 2.13) следует иметь в виду, что однородность рядов в холодный сезон года характерна для северо-восточной части бассейна р. Кама. Однородность рядов в летне-осенний период типична для северной и северо-восточной частей бассейна.

Таким образом, выполненный статистический анализ с использованием данных о стоке 79 гидрологических постов позволил показать, что в бассейне Волги (за исключением крайней северо-восточной его части) в результате резкого увеличения стока в зимние месяцы произошли нарушения однородности (стационарности) многолетних рядов наблюдений.

С вероятностью не менее 0,95 можно констатировать, что на преобладающей части бассейна (более 95% площади водосбора) в 1978—2007 гг. произошло значимое увеличение стока в зимний сезон по отношению к предыдущему периоду 1946—1977 гг. В связи с этим в долговременном плане процесс изменения стока в бассейне нельзя анализировать в рамках гипотезы стационарности его межгодовых колебаний. Что касается летне-осеннего стока, то приведенные выше выводы верны только для рек, расположенных в южной и юго-восточной частях бассейна.

На фоне увеличения стока межлунных месяцев на реках бассейна р. Волга существенно увеличилась также его изменчивость (рис. 2.13в), при этом для большей части рассматри-

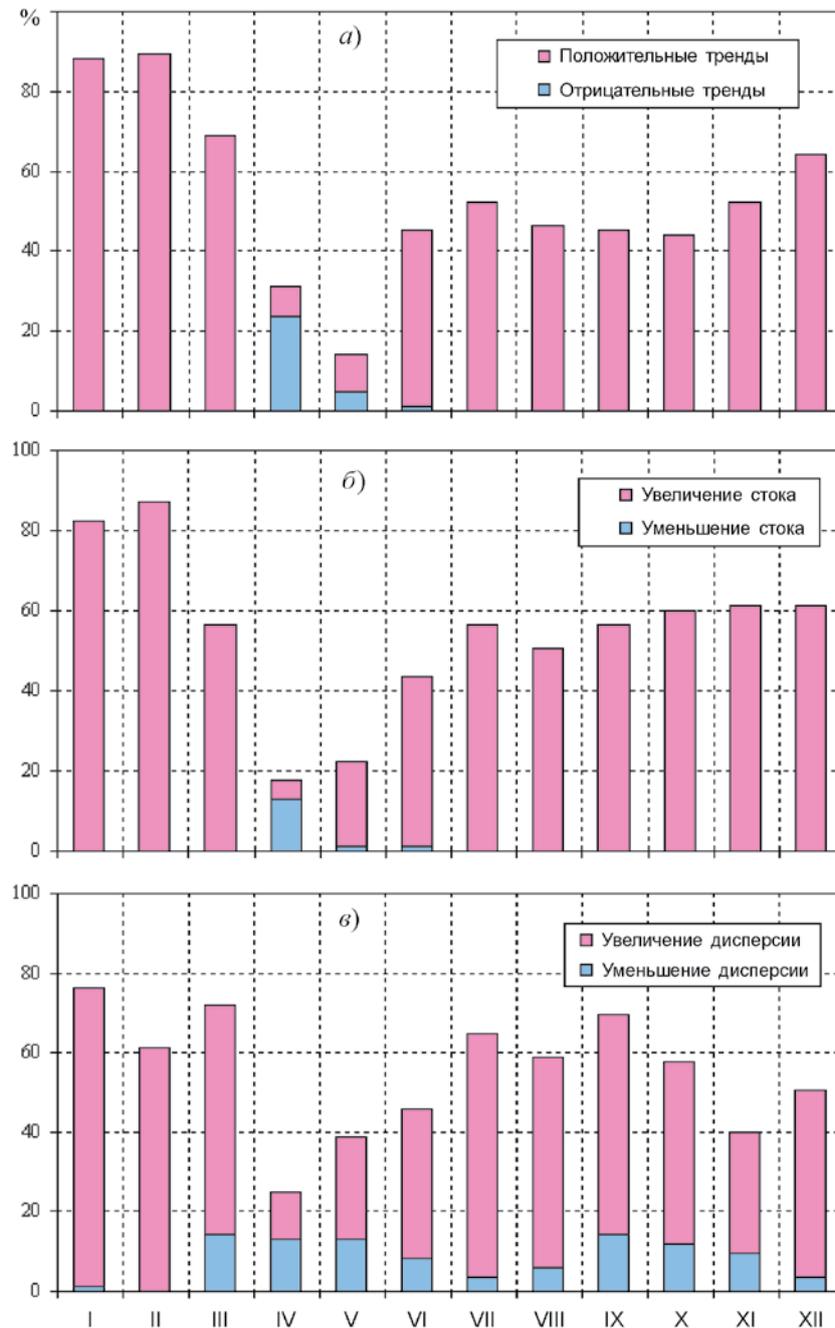


Рис. 2.13. Доля гидрологических постов в бассейне р. Волга (% общего числа), где выявлены значимые тренды среднемесячных расходов воды за период 1946—2007 гг. (а), неоднородность по средним значениям среднемесячных расходов воды за периоды 1978—2007 и 1946—1977 гг. (б) и по их дисперсии (в).

ваемых гидрологических постов увеличение дисперсии является значимым.

Таким образом, в 1978—2007 гг. в бассейне Волги существенно изменились условия формирования стока, что непосредственно отразилось на водном режиме рек. Анализ данных

наблюдений на воднобалансовых станциях показал, что климатические изменения, наблюдающиеся с конца 1970-х годов, привели к значительной перестройке всей системы влагооборота на водосборах.

Общие черты изменения климата на исследуемой территории — это повышение температуры воздуха в приповерхностном слое, особенно значительное в январе — марте, при незначительных изменениях температуры теплого периода и некотором увеличении количества осадков (наиболее существенном на возвышенностях). В результате, по данным воднобалансовых станций и ВФ ГГИ, произошло повсеместное уменьшение испарения с поверхности воды и пропорциональное уменьшение испарения с поверхности почвы в зоне достаточного и избыточного увлажнения. В полуаридных зонах вследствие появления в почве доступной для испарения влаги испарение с почвы, наоборот, увеличилось.

Наличие оттепелей зимой, отсутствие условий для формирования водонепроницаемого запирающего слоя в почве создали благоприятные предпосылки для фильтрации влаги в почву и питания наиболее динамичных водоносных горизонтов верховодки и верхних ярусов в лесостепной и лесной зонах. В лесной зоне, где в целом условия питания грунтовых вод также благоприятны, интенсивный сток верховодки в зимний период уменьшает количество влаги, фильтрующейся в грунтовые воды, и препятствует пополнению их запасов.

Соответствующие изменения претерпел речной сток, являющийся интегральным показателем этих процессов: произошло его значительное внутригодовое перераспределение. Сток весеннего половодья уменьшился по объему и максимальному расходу на большей части рассматриваемой территории, половодье стало более сглаженным и растянутым по времени.

Существенно увеличился как зимний, так и летне-осенний меженный сток. При этом в результате отсутствия питания поверхностными водами произошла деградация малых водотоков полуаридной зоны, не дренирующих полностью или частично основные водоносные горизонты. Динамичное питание водотоков внутрипочвенными и грунтовыми водами

верхнего горизонта связано также с уменьшением его свободной емкости и, как следствие, с более быстрым насыщением и сработкой. В результате на водосборах наблюдается более интенсивный влагооборот. Для понимания причин современных изменений процессов гидрологического цикла чрезвычайно важно отметить, что наибольшие климатические изменения в бассейне р. Волга произошли в течение относительно небольшого промежутка времени с 1970-х годов, когда существенно повысилась температура воздуха, особенно в холодный сезон года, и произошло увеличение количества осадков летом и зимой.

На рис. 2.14—2.16 представлены многолетние данные о месячном стоке некоторых рек с отдельно нанесенными линиями трендов за периоды 1946—1977 и 1978—2007 гг. Как видно на этих рисунках, в 1978—2007 гг. на фоне значительного увеличения амплитуды межгодовых колебаний месячного стока тренды имеют разнонаправленный, случайный характер и в подавляющем большинстве случаев являются незначимыми.

Таким образом, можно выдвинуть гипотезу о том, что со второй половины 1970-х годов в бассейне р. Волга сформировался новый квазистационарный водный режим рек. О формировании нового водного режима рек свидетельствует и тот факт, что для большинства речных бассейнов в целом в период 1946—2007 гг. обнаружены значимые линейные тренды стока в зимний и летне-осенний сезоны. С учетом приведенного выше анализа можно сделать вывод, что за 60-летний период времени отмечалось не постепенное (монотонное) увеличение меженного стока, а именно резкое (скачкообразное) в 1970-х годах, что послужило основной причиной нарушения однородности рядов характеристик стока.

На основе приведенных выше результатов можно сформулировать принципиальные подходы к оценке будущего стока в бассейне р. Волга. Одним из возможных подходов было бы принятие гипотезы о квазистационарности

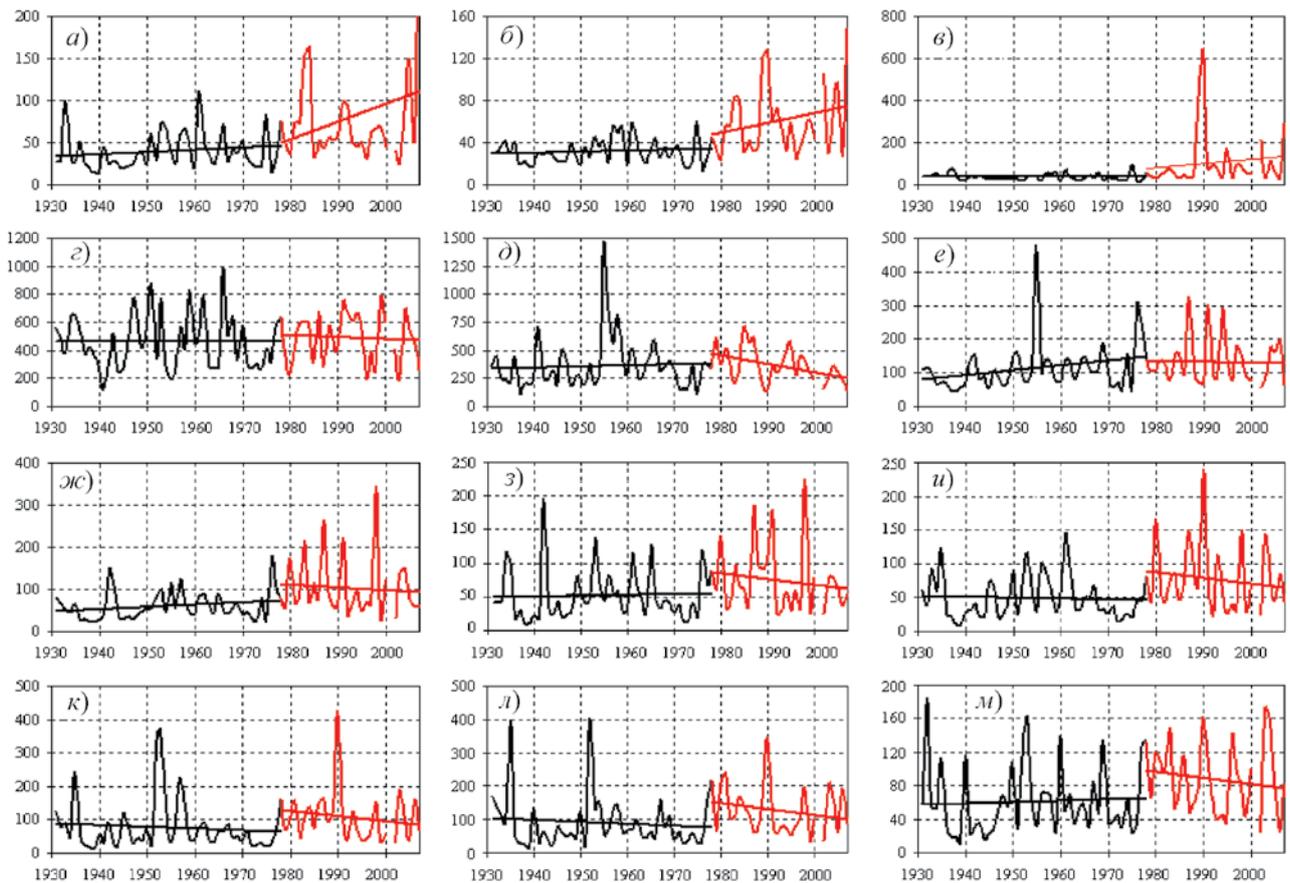


Рис. 2.14. Многолетние изменения среднемесячных расходов ($\text{м}^3/\text{с}$) р. Молога у г. Устюжна и линейные тренды в 1946—1977 и 1978—2007 гг. *а)* январь; *б)* февраль; *в)* март; *з)* апрель; *д)* май; *е)* июнь; *ж)* июль; *з)* август; *и)* сентябрь; *к)* октябрь; *л)* ноябрь; *м)* декабрь.

гидроклиматических условий в бассейне со второй половины 1970-х годов по настоящее время. В соответствии с этой гипотезой ряды речного стока за последний период (1978—2007 гг.) могут быть приняты в качестве одного из возможных сценариев (в статистическом смысле) на ближайшие десятилетия.

Вместе с тем очевидно, что использование этого подхода требует детального обоснования возможности экстраполяции современных гидрометеорологических условий на ближайшие десятилетия. Необходимо отметить, что применение для этой цели чисто статистических методов из-за недостаточной продолжительности исходных гидрометеорологических рядов не даст возможности сделать какие-либо определенные выводы об ожидаемых в пер-

спективе изменениях водного режима в бассейне р. Волга.

Для решения этой задачи в современных условиях меняющегося климата наряду со статистическим анализом данных гидрометеорологических наблюдений требуется детальное рассмотрение характеристик будущего климата, рассчитанных с помощью современных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Используя представления о будущем климате, полученные на основе разных сценариев антропогенного воздействия на глобальный климат, с помощью разных МОЦАО и гидрологических моделей речных бассейнов можно будет оценить соответствующие перспективные параметры водного режима рек. Модельные данные о будущем стоке

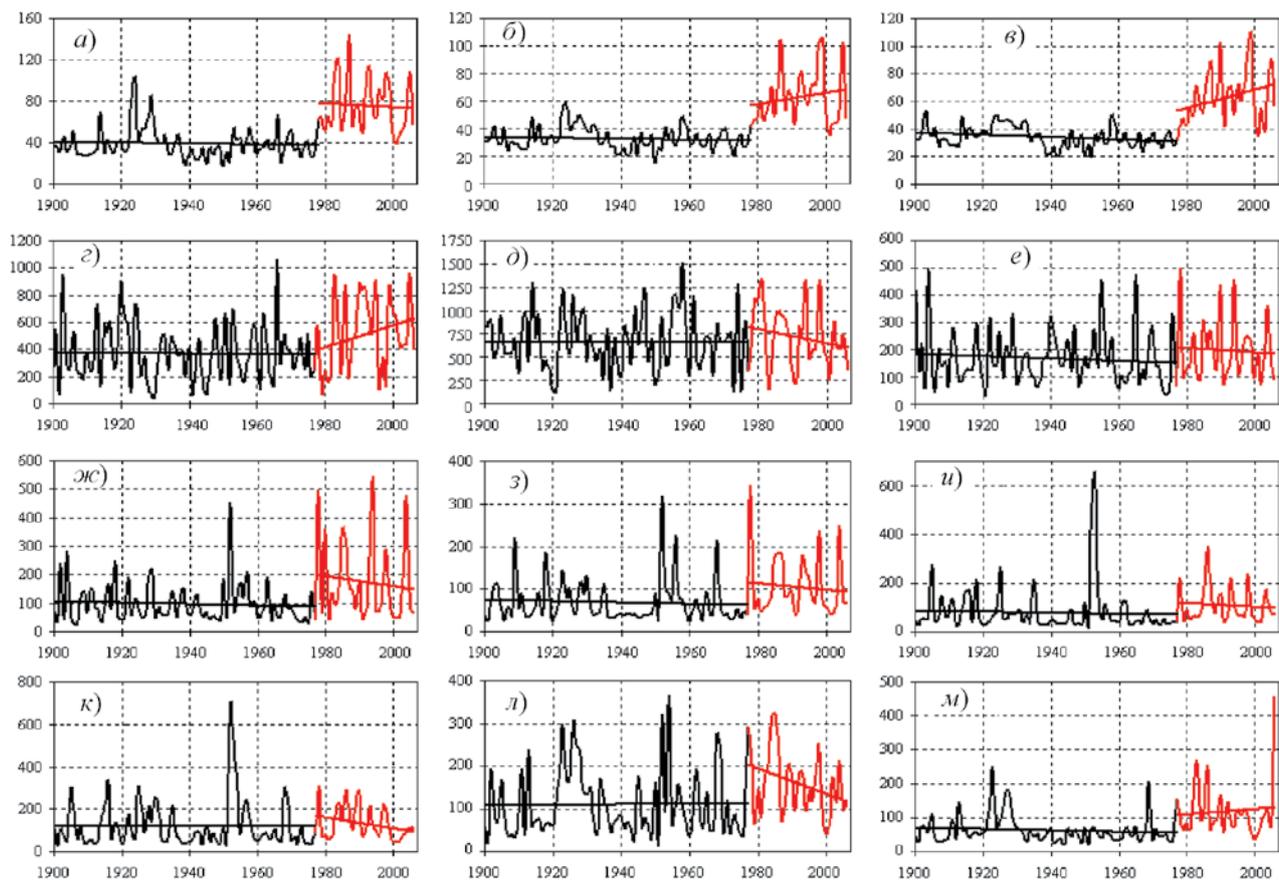


Рис. 2.15. Многолетние изменения среднемесячных расходов ($\text{м}^3/\text{с}$) р. Ужда у г. Макарьев и линейные тренды в 1946—1977 и 1978—2007 гг. *а)* январь; *б)* февраль; *в)* март; *г)* апрель; *д)* май; *е)* июнь; *ж)* июль; *з)* август; *и)* сентябрь; *к)* октябрь; *л)* ноябрь; *м)* декабрь.

могут стать дополнительной информацией, на основе которой возможно будет сделать выводы о правомерности принятия гидрометеорологических условий 1978—2007 гг. в качестве аналога для ближайших десятилетий, или потребуется внести какие-либо поправки к этому подходу, или принять иные возможные решения.

Следует отметить, что современные МОЦАО позволяют рассчитывать значения не только многих метеорологических величин в узлах трехмерной пространственной сетки, но также и речного стока, который определяется как разность расчетных осадков и испарения в данной ячейке сетки или путем применения разнообразных схем моделирования. При ре-

шении гидрологических задач такие данные можно использовать для оценки ожидаемых изменений стока, непосредственно опираясь на МОЦАО. Такие оценки выполнялись многими исследователями как для отдельных регионов, так и в глобальном масштабе (Bransetter, Famiglietti, 1999; Wolock, McCabe, 1999; Arnell, 2003; Nohara et al., 2006; Climate Change 2007, 2007).

Представляет интерес сравнение оценок ожидаемых изменений стока с результатами, получаемыми при помощи самостоятельных гидрологических моделей, на входе которых задаются рассчитанные по МОЦАО метеорологические величины.

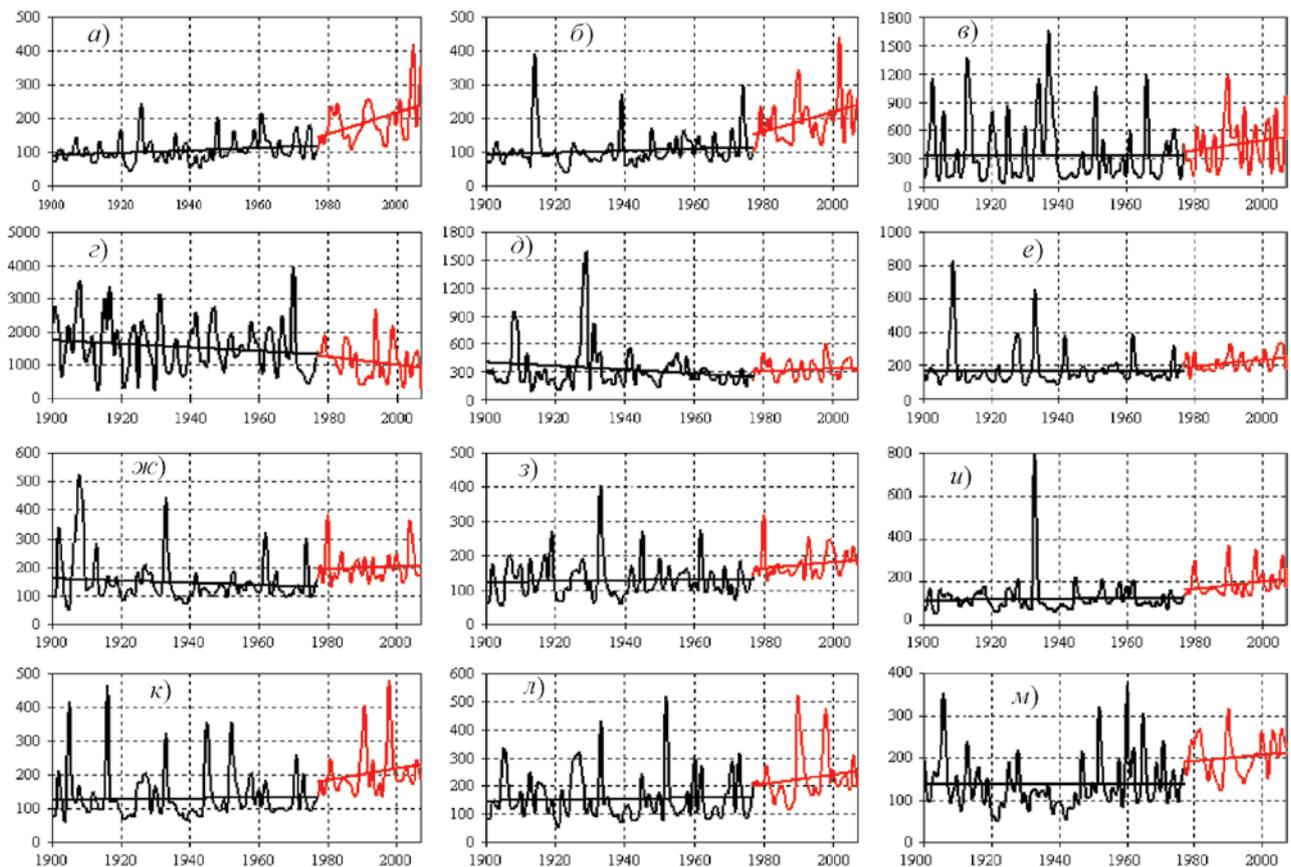


Рис. 2.16. Многолетние изменения среднемесячных расходов ($\text{м}^3/\text{с}$) р. Ока у г. Калуга и линейные тренды в 1946—1977 и 1978—2007 гг. а) январь; б) февраль; в) март; г) апрель; д) май; е) июнь; ж) июль; з) август; и) сентябрь; к) октябрь; л) ноябрь; м) декабрь.

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В БЛИЖАЙШИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Моделирование стока и притока к водохранилищам Волжско-Камского каскада с помощью воднобалансовой модели ГГИ с использованием климатических сценариев

В основу предлагаемого методического подхода положен следующий основной принцип: оценка влияния возможных изменений климата на водные ресурсы и водный режим должна базироваться на результатах диагноза

региональных изменений стока рек, происходящих на фоне современного потепления климата, а также расчетов стока и основных элементов водного баланса при вероятных климатических сценариях будущего, полученных с использованием современных МОЦАО.

Воднобалансовая модель для расчетов стока при разных климатических условиях

Воднобалансовая модель с декадным расчетным интервалом времени (временной шаг 10 суток) была разработана в ГГИ. По мере накопления опыта ее использования в разных физико-географических условиях отдельные блоки модели были модифицированы, в том числе блок расчета подземного питания рек

(Георгиевский и др., 1996а). Модель позволяет по декадным данным о значениях температуры, влажности воздуха и суммы осадков, а также информации об основных воднофизических характеристиках почвогрунтов рассчитывать непрерывные ряды составляющих гидрологического цикла: испарения, влажности почвы, накопления снега и его таяния, изменения запасов подземных вод, поверхностного и подземного стока.

Модель реализует концепцию водного баланса трехслойной среды, состоящей из деятельного слоя почвогрунтов и емкостей подземных вод верхнего и глубокого уровней залегания:

$$dW_s/dt = P - E - R_s - I_u + S; \quad (2.1)$$

$$dW_u/dt = I_u - I_d - R_u; \quad (2.2)$$

$$dW_d/dt = I_d - R_d; \quad (2.3)$$

Здесь W_s , W_u , W_d — соответственно влагозапасы в зоне деятельного слоя почвогрунтов и в водоносных горизонтах верхнего и глубокого уровней залегания; R_s , R_u , R_d — соответственно поверхностный и подземный сток верхнего и глубокого уровней залегания грунтовых вод; E — испарение; P — сумма осадков; S — интенсивность снеготаяния; I_u , I_d — фильтрация к зеркалу подземных вод верхнего и глубокого горизонтов соответственно. Размерность всех величин — миллиметр слоя.

Численное решение системы уравнений (2.1)—(2.3) последовательно с декадным временным шагом dt включает расчет E , I_u , I_d , S , R_u и R_d , а R_s определяется как остаточный член водного баланса деятельного слоя почвогрунтов.

Испарение E рассчитывается тепловодно-балансовым методом (Харченко, 1975). В основе расчета испарения лежит зависимость:

$$E/E_0 = \beta (W_{s\text{cp}}/W_{\text{HB}}). \quad (2.4)$$

Здесь E_0 — испаряемость, рассчитываемая по графикам (Зубенко, 1976) в зависимости от температуры и влажности воздуха и ланд-

шафтно-географической зоны; β — параметр, характеризующий влияние растительности; $W_{s\text{cp}}$ — средние продуктивные влагозапасы деятельного слоя почвогрунтов за расчетный интервал времени; W_{HB} — продуктивные влагозапасы деятельного слоя почвы при наименьшей влагоемкости.

Испарение со снега рассчитывается по формуле П. П. Кузьмина в зависимости от дефицита влажности воздуха, а интенсивность снеготаяния — по методу температурных коэффициентов (Кузьмин, 1961).

Если за расчетный интервал времени осадки превысили испарение, а влажность почвы превысила максимальную водоудерживающую способность, то образуется избыток влаги H , представляющий по существу будущий сток, который сформируется в результате склоновой и русловой трансформации, а также сработки подземных вод. Расчет распределения водоотдачи на поверхностную составляющую R_s и пополнение грунтовых вод верхнего горизонта I_u производится следующим образом:

$$R_s = H - I_u; \quad (2.5)$$

$$I_u = \min(H, F_{\text{max}}). \quad (2.6)$$

Здесь F_{max} — максимально возможная фильтрация из зоны аэрации в нижележащие горизонты, зависящая от типа почвогрунтов, а в начале снеготаяния — также и от глубины промерзания верхнего слоя почвы.

Далее профильтровавшаяся влага I_u поступает к зеркалу грунтовых вод верхнего горизонта, пополняя его влагозапасы и формируя сток R_u и напорную фильтрацию в глубокие водоносные горизонты I_d . Режим стока обоих горизонтов соответствует модели линейного резервуара:

$$R_u = A_u W_u; \quad (2.7)$$

$$R_d = A_d W_d; \quad (2.8)$$

$$I_d = B W_u. \quad (2.9)$$

Здесь A_u , A_d , B — коэффициенты сработки грунтовых вод подземных горизонтов. Последние определяются по кривым спада межен-

ного стока и характеристикам типового внутригодового распределения стока.

Глубина промерзания L верхнего слоя почвогрунта на данную декаду рассчитывается по следующей формуле:

$$L = a\sqrt{\sum(T^-)} - bS. \quad (2.10)$$

Здесь $\sum(T^-)$ — сумма абсолютных значений отрицательной среднесуточной температуры; S — снеготаяния; a , b — эмпирические коэффициенты.

Фильтрация в мерзлую почву F_{mf} рассчитывается с помощью эмпирической зависимости, установленной по материалам экспедиционных исследований в разных регионах бывшего СССР (Оценка..., 1985):

$$F_{mf} = \begin{cases} F_{\max} & \text{при } L < L_{\min}, \\ F_{\max} \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_{\min}} & \text{при } L_{\min} < L < L_{\max}, \\ 0 & \text{при } L > L_{\max}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Здесь F_{mf} , F_{\max} — максимально возможные за расчетный интервал времени значения фильтрации в мерзлую и талую почву соответственно; L_{\max} , L_{\min} — критические значения глубины промерзания, при которых формируются запирающий слой.

Описанная выше воднобалансовая модель (2.1)–(2.11) использовалась в ГГИ для решения задач, связанных с оценкой гидрологических последствий климатических изменений для разных бассейнов и регионов России и соседних стран (Георгиевский и др., 1996а, 1996б; Шикломанов, Георгиевский, 2000, 2002, 2007, 2008; Шикломанов и др., 2005; Georgievsky et al., 1998; Georgievsky, 1998; Georgievsky, Shiklomanov, 2003; Georgievsky, Shalygin, 2010).

В ходе исследований было установлено, что модель применима как для расчета стока на конкретных водосборах в широком диапазоне их площадей, так и для оценки возможных климатообусловленных изменений водных ресурсов отдельных крупных регионов страны. Естественно, что в зависимости от объекта мо-

делирования конкретные способы использования воднобалансовой модели будут разными.

При изучении реакции стока и других элементов водного баланса водосборов на климатические изменения расчеты с использованием воднобалансовой модели производятся в следующей последовательности.

На изучаемой территории выбираются бассейны-индикаторы, для которых допустимо использование осредненных по всей площади метеорологических величин.

В пределах бассейна-индикатора выбираются метеорологические станции, данные которых используются для формирования многолетних временных рядов декадных значений суммы осадков, температуры и влажности воздуха, характеризующих современные климатические условия или любой базовый многолетний период времени, по отношению к которому анализируются возможные изменения метеорологических величин.

На основе анализа литературных источников, почвенных карт, данных о стоке и т. д. определяются необходимые для используемой модели эмпирические параметры и производится калибровка модели.

С использованием модели по данным наблюдений за метеорологическими величинами (температура и влажность воздуха, атмосферные осадки) производится непрерывный расчет составляющих водного баланса (испарение, сток, влажность почвы) по декадным интервалам времени; путем статистической обработки определяются их месячные, годовые и сезонные значения.

Проводится оценка адекватности модели путем сравнения рассчитанных и фактических значений стока, а также других элементов гидрологического цикла.

Для оценки климатической ситуации в будущем в соответствии с каким-либо сценарием региональных изменений климата в данные наблюдений за температурой и влажностью воздуха и осадками вводятся соответствующие поправки; таким способом формируются

многoletние ряды декадных значений температуры, влажности воздуха и осадков, характеризующие будущее.

С использованием этих рядов в качестве входной информации для гидрологической модели производится расчет основных составляющих гидрологического цикла для данного климатического сценария будущего аналогично тому, как это было сделано по фактическим метеорологическим данным.

В ходе сравнения характеристик стока для сценарных и базовых условий делаются выводы о возможных климатообусловленных изменениях стока.

При использовании гидрологических моделей для оценки последствий изменений климата возникает ряд вопросов, требующих отдельного рассмотрения.

Один из них связан с выбором базового многолетнего периода времени, данные по которому принимаются за основу при формировании рядов значений метеорологических величин. На взгляд авторов, при выборе такого периода надо стремиться к тому, чтобы в течение него не отмечалось трендов в значениях элементов гидрологического цикла. Кроме того, желательно, чтобы и запасы воды в бассейне в начале и конце периода были примерно одинаковыми.

Поскольку, как показано в предыдущем разделе, со второй половины 1970-х годов в бассейне р. Волга отмечается нестационарность гидрометеорологической обстановки, то применительно к данному региону использовать этот период (или какую-либо его часть) в качестве базового периода некорректно. Поэтому в качестве базового был выбран период 1946—1977 гг.

Другим вопросом, имеющим принципиальное значение, является оценка адекватности гидрологических моделей. Этому вопросу, по мнению авторов, уделяется недостаточное внимание в исследованиях по рассматриваемой проблеме.

Оценка адекватности модели проводилась в ГГИ ранее, и основные результаты представ-

лены в работах (Георгиевский и др., 1996а; Водные ресурсы..., 2008). Общая методология исследований заключается в следующем. Калибровка параметров модели выполняется за базовый период до второй половины 1970-х годов. Ряды наблюдений за метеорологическими величинами за этот период служат основой для формирования базовых рядов температуры и влажности воздуха и осадков. Данные за современный период (со второй половины 1970-х годов) используются для проверки адекватности модели. При этом производится сравнение не только полученных в результате наблюдений и смоделированных значений стока рек, но также и влажности почвы, запасов подземных вод и других значений по данным воднобалансовых станций, расположенных в разных природных зонах Европейской России. Так, коэффициенты корреляции рассчитанных и измеренных величин влажности почвы за теплый период года составили 0,85—0,95, а испарения — 0,80—0,90.

В целом можно сделать вывод, что разработанная воднобалансовая модель позволяет достаточно надежно рассчитывать средние многолетние годовые, сезонные и месячные значения стока и оценивать его изменчивость за многолетний период времени по данным о метеорологических величинах. Модель может быть использована для оценок изменений водного режима рек при возможных в перспективе изменениях климата.

Для бассейна р. Волга оценка адекватности модели производилась по водосборам средних рек, расположенных в бассейне. Ввиду отсутствия специализированных наблюдений за прочими элементами водного баланса водосборов проверка модели осуществлялась путем сопоставления рассчитанных гидрографов стока и построенных по данным наблюдений; параллельно контролировали соблюдение норм, типовых внутригодовых распределений испарения и речного стока, а также основных воднобалансовых соотношений.

В целом проверка адекватности модели дала положительные результаты. В качестве примера на рис. 2.17 приведены фактические и смоделированные гидрографы стока ряда рек бассейна р. Волга.

Для обоснования сценариев изменения климата в бассейне Волги в будущем был использован следующий подход. Были проанализированы результаты моделирования климата прошлого за период 1946—1999 гг., полученные с помощью 21 климатической модели (МОЦАО). Эти модели участвовали в проекте сравнения моделей CMIP (Coupled Model Intercomparison Program) и представлены в Четвертом оценочном докладе МГЭИК (Climate Change 2007, 2007). Результаты, полученные с помощью этих моделей, доступны через центры распространения данных МГЭИК (http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/info_for_analysts.php).

Модели были ранжированы по адекватности воспроизведения фактической динамики метеорологических величин в бассейне р. Волга за тот же период (1946—1999 гг.).

Для каждой из двух гидрометеорологических величин — температуры и атмосферных осадков — были отобраны пять лучших моделей. Показательно, что только две модели вошли в перечень лучших как по температуре воздуха, так и по осадкам, — это модели, разработанные в Норвегии (BCCR-BCM2.0) и в Великобритании (UKMO-HadGEM1).

Для дальнейших расчетов (2011—2040 гг.) были приняты результаты двух названных моделей, а также был применен ансамблевый подход, заключающийся в осреднении параметров будущего климата, рассчитанных по пяти лучшим моделям (в дальнейшем — Ансамбль-05), по 21 модели (Ансамбль-21), а также по 12 моделям (Ансамбль-12). Использовался сценарий эмиссии парниковых газов А2, а для ансамбля из 12 моделей — также и В1 (Climate Change 2007, 2007).

В итоге для расчетов изменения водного режима в бассейне р. Волга в будущем были приняты шесть климатических сценариев, ко-

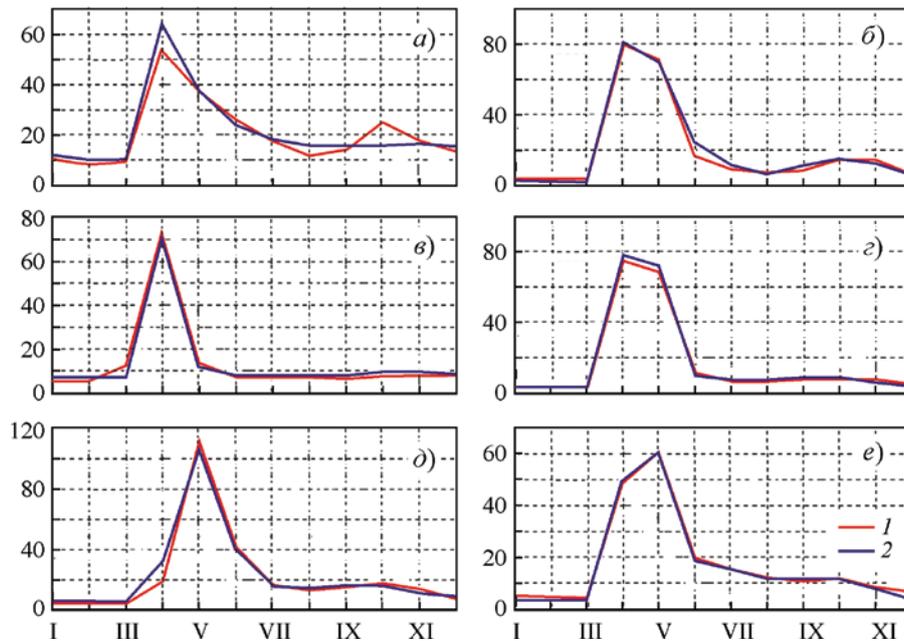


Рис. 2.17. Полученные в результате наблюдений (1) и рассчитанные (2) гидрографы стока рек бассейна Волги (мм/мес.). а) Верхняя Волга; б) Кострома; в) Ока; г) Чепца; д) Верхняя Кама; е) Уфа.

торые были маркированы следующим образом (первые четыре отражают сценарий А2 антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему):

- BCCR-BCM2.0;
- UKMO-HadGEM1;
- Ансамбль-05;
- Ансамбль-21;
- Ансамбль-12/A2;
- Ансамбль-12/B1.

Эти шесть сценариев климата будущего были использованы далее для расчета будущих гидрологических характеристик водосборов-индикаторов в бассейне р. Волга с помощью воднобалансовой модели ГГИ. В табл. 2.1 приведены результаты расчета. Они характеризуют изменения годового стока рек бассейнов-индикаторов в 2011—2040 гг. по отношению к базовому периоду 1946—1977 гг.

Анализ этих оценок позволяет сделать следующие выводы. При всех рассматриваемых будущих климатах в бассейне р. Волга следует ожидать увеличения годового стока (т. е. водных ресурсов). Расчеты с помощью ансамблей моделей и модели BCCR-BCM2.0 показывают, что увеличение годового стока на преобладающей части бассейна находится в пределах 5—15%; модель UKMO-HadGEM1 дает увеличение на 15—25%. Наибольшее относительное увеличение стока ожидается в самой южной (степной) части водосбора Волги. Так, например, для бассейна р. Большой Иргиз при ансамблевых сценариях увеличение стока достигает 27—37%. Такое значительное относительное увеличение объясняется тем, что при норме стока р. Большой Иргиз, равной 43 мм, увеличение количества осадков в его бассейне на 20—40 мм приводит к увеличению стока на 5—30 мм.

Результаты модельного расчета внутригодового распределения стока показывают, что при всех рассматриваемых сценариях в бассейне р. Волга следует ожидать существенного по сравнению с базовым периодом 1946—1977 гг. увеличения стока в зимние месяцы. Сток ве-

сеннего половодья в западной, юго-западной и южной частях бассейна будет меньше, чем в базовый период, а на севере и северо-востоке — больше. Ансамблевые сценарии дают довольно похожие расчетные гидрографы стока. Наименьшие изменения характерны для модели BCCR-BCM2.0, наибольшие — для UKMO-HadGEM1.

На рис. 2.18 в качестве примера представлены данные, характеризующие внутригодовое распределение стока рек-индикаторов, расположенных в разных частях бассейна Волги, для рассматриваемых сценариев. Полученные результаты указывают на большую чувствительность стока к изменениям температуры и осадков в зимний и весенний периоды. Ожидаемое существенное потепление в холодный период года приведет к увеличению зимнего стока (особенно в бассейне Верхней Волги) в результате увеличения частоты и интенсивности оттепелей и подземного питания рек. Для бассейнов рек Кострома, Уфа и Чепца вследствие более раннего начала снеготаяния пик половодья смещается на апрель.

Изменения максимального стока определяются комплексом факторов: величиной снеготаяния к моменту устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C, глубиной промерзания и влажностью почвы к началу снеготаяния, количеством осадков в период половодья. В зависимости от сочетания этих факторов в условиях рассматриваемых сценариев будущего климата максимальный месячный расход воды в период весеннего половодья на реках бассейна р. Волга может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Помимо оценок изменения стока рек-индикаторов в бассейне Волги были выполнены прогнозные оценки притока к водохранилищам Волжско-Камского каскада (ВКК), что является чрезвычайно важным для планирования их работы и корректировки правил управления их режимом.

На рис. 2.19 показаны фактические (для 1946—1977 гг.) и расчетные (для 2011—2040 гг.)

Таблица 2.1. Изменения годового стока водосборов-индикаторов в бассейне р. Волга в 2011—2040 гг. относительно периода 1946—1977 гг. при разных сценариях будущего климата

Река	Норма за 1946–1977 гг., мм	Расчетные изменения годового стока по сценариям											
		BCCR-BCSM2.0		UKMO- HadGEM1		Ансамбль-05		Ансамбль-21		Ансамбль-12/A2		Ансамбль-12/B1	
		мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
Верхняя Волга	247	14	5	38	15	19	7	17	7	18	7	30	12
Ока	162	2	1	35	21	15	9	10	6	11	7	12	7
Кострома	255	23	9	57	23	23	9	25	10	26	11	29	12
Велуга	233	16	7	60	26	26	11	20	9	20	9	18	8
Чепца	207	11	5	31	14	29	14	26	12	21	10	23	11
Верхняя Кама	268	13	5	43	15	32	11	27	10	23	8	24	9
Белая	182	14	8	35	20	30	17	26	15	20	10	11	6
Уфа	210	17	9	26	13	28	14	19	9	14	7	11	5
Большая Кокшага	156	6	4	33	21	19	13	17	11	15	10	11	7
Сок	123	-4	-3	23	18	18	15	14	11	14	11	4	3
Сура	115	-8	-6	29	24	13	11	14	12	16	14	5	4
Дема	103	7	7	38	37	28	28	24	24	23	22	14	14
Самара	81	4	5	46	59	25	32	18	23	18	23	9	12
Большой Иргиз	43	0	0	33	69	18	37	13	27	14	33	5	12

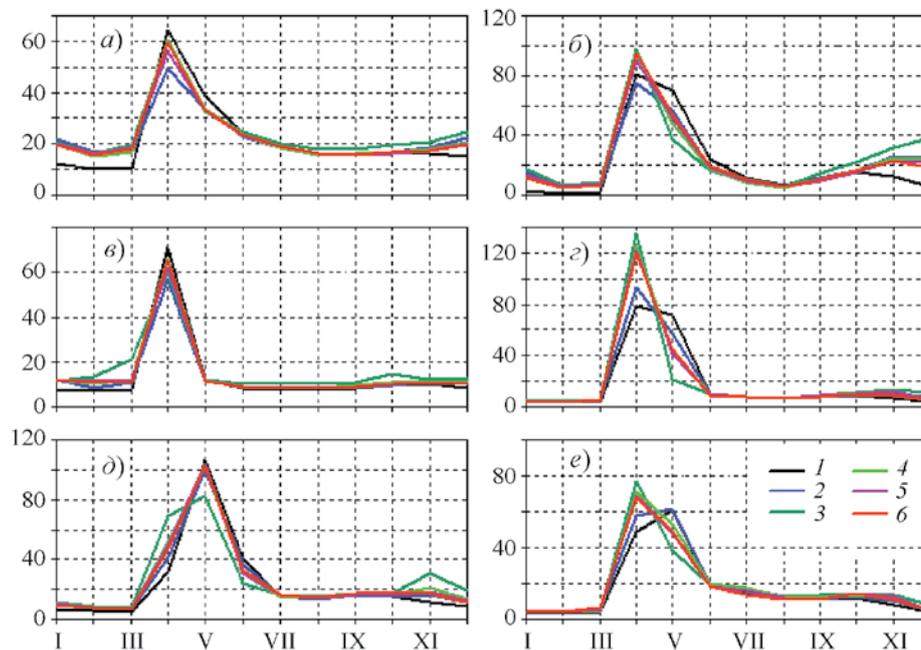


Рис. 2.18. Внутригодовое распределение расчетного стока (мм/мес.) рек бассейна Волги в базовый период 1946—1977 гг. (1) и при разных климатических сценариях в 2011—2040 гг. (2—6). а) Верхняя Волга; б) Кострома; в) Ока; з) Чепца; д) Верхняя Кама; е) Уфа. 2 — BCCR-BCM2.0; 3 — UKMO-HadGEM1; 4 — Ансамбль-05; 5 — Ансамбль-21; 6 — Ансамбль-12/A2.

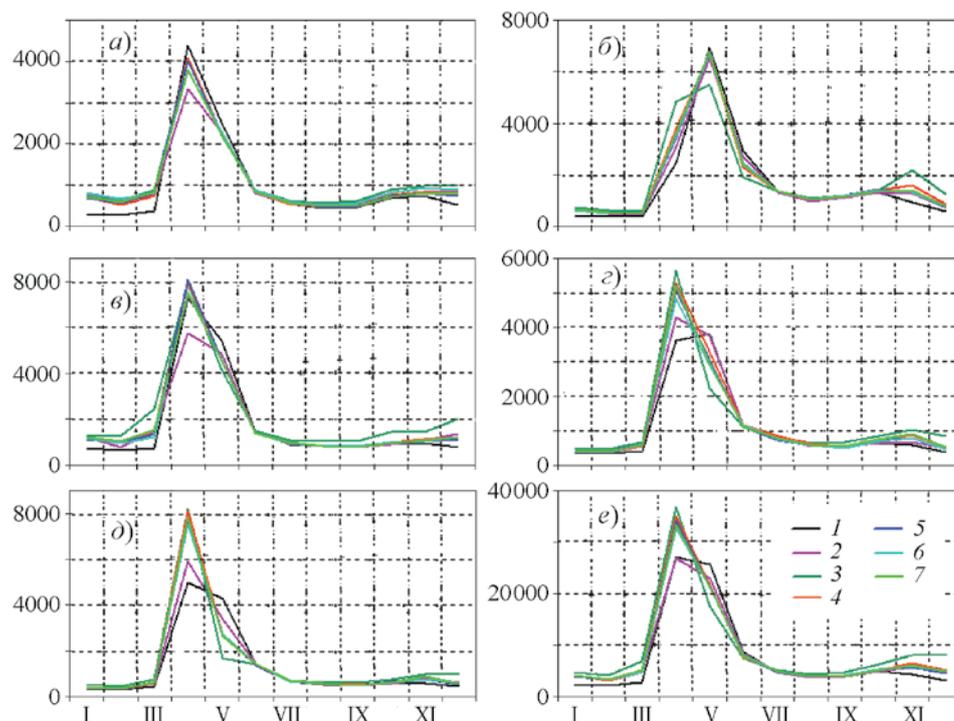


Рис. 2.19. Фактические (для 1946—1977 гг.; 1) и расчетные (для 2011—2040 гг.; 2—7) гидрографы притока ($\text{м}^3/\text{с}$) в водохранилища Волжско-Камского каскада. а) Рыбинское водохранилище; б) Камское; в) Чебоксарское; з) Нижнекамское; д) Куйбышевское; е) суммарный приток к водохранилищам ВКК. 2 — расчет по BCCR-BCM2.0; 3 — UKMO-HadGEM1; 4 — Ансамбль-05; 5 — Ансамбль-12/A2; 6 — Ансамбль-12/B1; 7 — Ансамбль-21.

гидрографы притока к основным водохранилищам ВКК и суммарно ко всему каскаду. На графиках хорошо видно, что в условиях рассматриваемых сценариев климата будущего произойдет увеличение притока в ноябре — марте, оно будет наиболее заметным на Верхней Волге. Гидрографы весеннего притока, соответствующие ансамблевым сценариям, довольно похожи между собой. Расчеты с использованием двух отдельных моделей показывают более растянутое на апрель — май половодье.

Летне-осенний приток при всех сценариях немного увеличен, хотя и мало отличается от фактического, соответствующего базовому периоду.

В табл. 2.2 приведены расчетные значения годовых и сезонных изменений суммарного притока в водохранилища ВКК для 2011—2040 гг. в условиях рассматриваемых сценариев климата будущего. Анализ этих расчетных значений, в том числе их сравнение с базовым уровнем 1946—1977 гг., позволяет сделать следующие выводы.

Расчетные значения притока к водохранилищам ВКК для ансамблевых сценариев довольно близки друг к другу. Модель ВССR-ВСМ2.0 дает наименьшие изменения, модель

УКМО-HadGEM1 — наибольшие. В дальнейшем анализе будут рассматриваться результаты моделирования в условиях ансамблевых сценариев (не будем при этом забывать, что две отдельные модели могут давать большие или меньшие значения).

Расчетный годовой приток к водохранилищам ВКК в условиях всех рассматриваемых сценариев больше притока за базовый период 1946—1977 гг. Суммарное увеличение притока при ансамблевых сценариях составляет 10—13%. Для Волгоградского водохранилища расчетное относительное увеличение годового притока очень значительно. Однако из-за малой абсолютной величины самого притока в базовый период это увеличение не имеет практического значения для работы ВКК в целом. Поэтому в дальнейшем анализе изменение притока в Волгоградское водохранилище рассматриваться не будет.

Расчетные изменения притока в период весеннего половодья имеют отчетливую зональность — они отрицательны на Верхней Волге (до -13%), близки к нулю на Верхней Каме и положительны на Нижней Каме и Нижней Волге (до 24%).

Таблица 2.2. Расчетное изменение в 2011—2040 гг. по сравнению с базовым уровнем в 1946—1977 гг. годового и сезонного притока в водохранилища ВКК в условиях рассматриваемых сценариев будущего климата

Сценарии климата	Приток											
	годовой			зимний			весенний			летне-осенний		
	Расход, м ³ /с	Объем, км ³	%	Расход, м ³ /с	Объем, км ³	%	Расход, м ³ /с	Объем, км ³	%	Расход, м ³ /с	Объем, км ³	%
ВССR-ВСМ2.0	376	11,8	5	1619	17,0	63	-1582	-7,8	-6	192	2,67	6
УКМО-HadGEM1	1688	52,6	21	3131	32,4	125	243	2,7	0	1223	17,51	31
Ансамбль-05	1039	32,3	13	1613	16,8	64	1170	9,4	5	451	6,15	12
Ансамбль-12/А2	825	25,6	10	1401	14,6	57	844	6,6	3	313	4,33	8
Ансамбль-12/В1	797	24,7	10	1623	16,8	64	154	2,5	1	388	5,51	10
Ансамбль-21	861	26,7	11	1689	17,6	67	318	3,9	2	386	5,27	10

Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы

Расчетные изменения летне-осеннего притока везде положительны (от 1 до 34%), но при этом имеют наибольшую неопределенность — как межмодельную, так и пространственную. Это обусловлено, очевидно, неопределенностью моделируемого изменения атмосферных осадков в теплый период года и их распределения по территории бассейна.

Наибольшие изменения притока к водохранилищам ВКК ожидаются в зимний период. Эти изменения характеризуются так же, как для весеннего периода, определенной зональностью. К верхневолжским водохранилищам приток в зимний период может увеличиться в два-три раза, на Каме и Нижней Волге — на 25—45%.

Принципиальное значение для обоснования параметров притока на перспективу 2011—2040 гг. имеет сравнение оценок изменений притока в водохранилища ВКК, соответствующих рассматриваемым сценариям будущего

климата, с изменениями, уже произошедшими за период с конца 1970-х годов. На рис. 2.20 показаны расчетные значения годового и сезонного притока в основные водохранилища ВКК и суммарно ко всему каскаду за базовый период 1946—1977 гг., за современный период с 1978 г. и соответствующие рассматриваемым сценариям будущего климата. Анализ этих графиков позволяет сделать следующие выводы.

Ожидаемое в условиях всех климатических сценариев, за исключением рассчитанного с помощью UKMO-HadGEM1, увеличение годового притока к водохранилищам ВКК находится в пределах уже произошедших изменений за последние десятилетия.

Современный приток к водохранилищам в период весеннего половодья весьма близок к таковому, рассчитанному для большинства рассматриваемых сценариев.

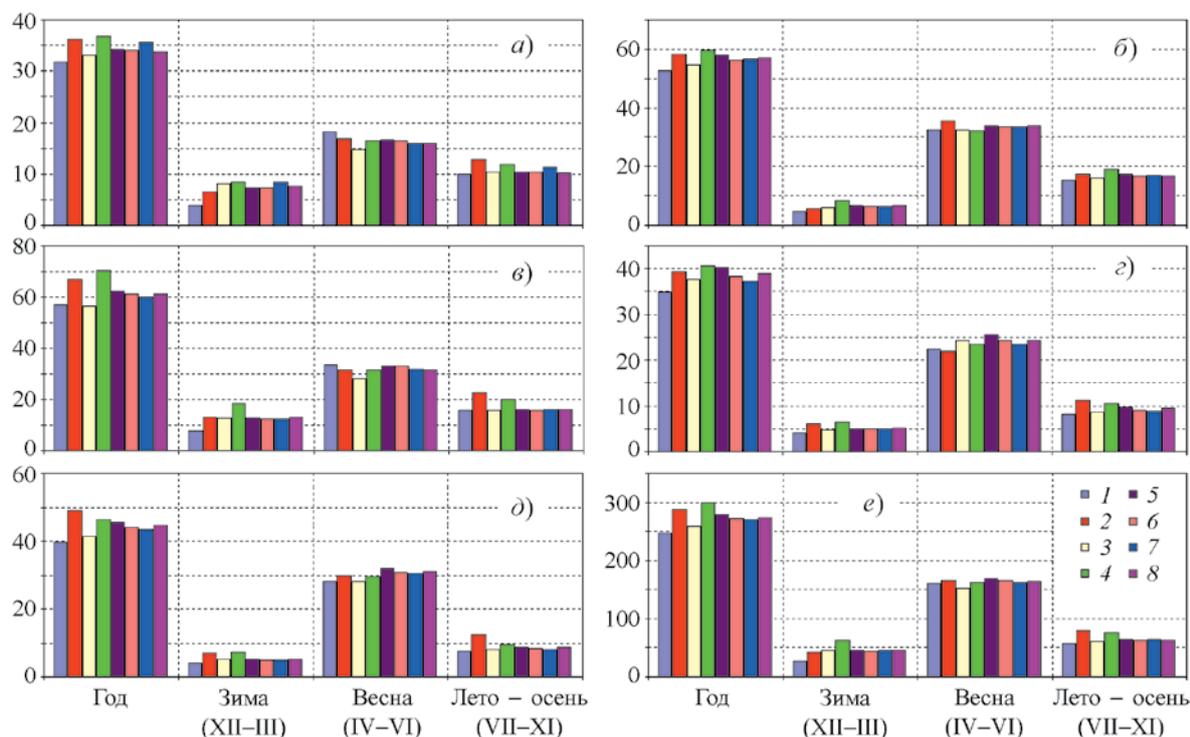


Рис. 2.20. Фактические за 1946—1977 (1) и 1978—2007 гг. (2) и расчетные (для 2011—2040 гг.; 3—8) значения годового и сезонного притока (км³) в водохранилища Волжско-Камского каскада. *а, б*) общий приток в Рыбинское (*а*) и Камское (*б*) водохранилища; *в—д*) боковой приток в Чебоксарское (*в*), Нижнекамское (*з*) и Куйбышевское (*д*) водохранилища; *е*) суммарный приток к водохранилищам ВКК. 3 — расчет по BCCR-BCM2.0; 4 — UKMO-HadGEM1; 5 — Ансамбль-05; 6 — Ансамбль-12/A2; 7 — Ансамбль-12/B1; 8 — Ансамбль-21.

Приток к водохранилищам ВКК в летне-осенний период в настоящее время значительно превосходит его расчетные значения при рассматриваемых сценариях. Это объясняется, главным образом, незначительным ожидаемым изменением суммы атмосферных осадков в бассейне, в отличие от их реального современного увеличения по сравнению с базовым периодом.

Современный приток зимой к большинству водохранилищ ВКК и в целом по каскаду соответствует его расчетным значениям для всех рассматриваемых будущих сценариев климата, кроме рассчитанного с помощью UKMO-HadGEM1, в последнем случае аномалии притока в зимний сезон значительно превышают как современные, так и рассчитанные по другим сценариям.

Непосредственное использование данных о климатическом стоке, рассчитанном с помощью МОЦАО

В данном разделе представлены результаты анализа возможности непосредственного использования информации о речном стоке на ближайшую перспективу, предоставляемой рядом современных моделей общей циркуляции атмосферы и океана.

Современные МОЦАО представляют собой комплекс из нескольких моделей разных

компонентов климатической системы. Расчет стоковой составляющей наряду с другими переменными, такими как влажность почвы, снеготаяние и распределение снежного покрова, осуществляется модельным блоком “Суша”. Исходной информацией для расчета речного стока являются данные, предоставляемые блоком “Атмосфера”.

Следует отметить, что схемы моделирования речного стока в разных моделях, как правило, разные. Описание структуры моделей можно найти в Четвертом оценочном докладе МГЭИК (Climate Change 2007, 2007). При анализе баз данных по климатическим сценариям, размещенным в сети Интернет, было выявлено, что данные о стоке представлены только в 9 из 21 МОЦАО.

При анализе рассматривались годовые, сезонные и месячные суммы расчетных слоев стока за два периода: 1946—1999 гг. (ретроспективный) и 2011—2040 гг. (прогнозный). При этом в последнем случае был принят сценарий эмиссии A1B (Special Report on Emission Scenarios, 2000). Анализировались результаты расчета как по отдельным МОЦАО, так и по ансамблю из девяти моделей.

На рис. 2.21 приведены результаты сравнения годовых и сезонных значений слоев стока в бассейне р. Волга, рассчитанных с по-

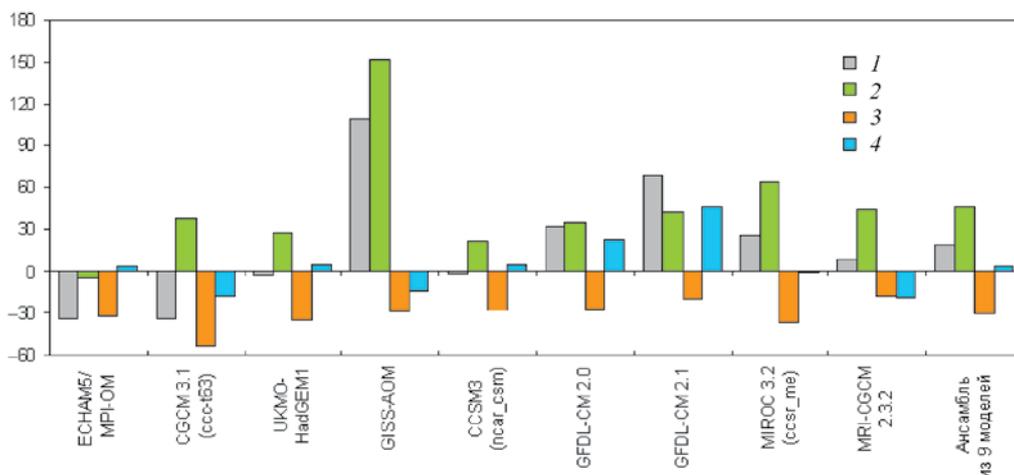


Рис. 2.21. Разности фактических и рассчитанных с помощью МОЦАО годовых (1) и сезонных (2—4) слоев стока (мм) за период 1946—1999 гг. в бассейне р. Волга. 2 — весна; 3 — лето и осень; 4 — зима.

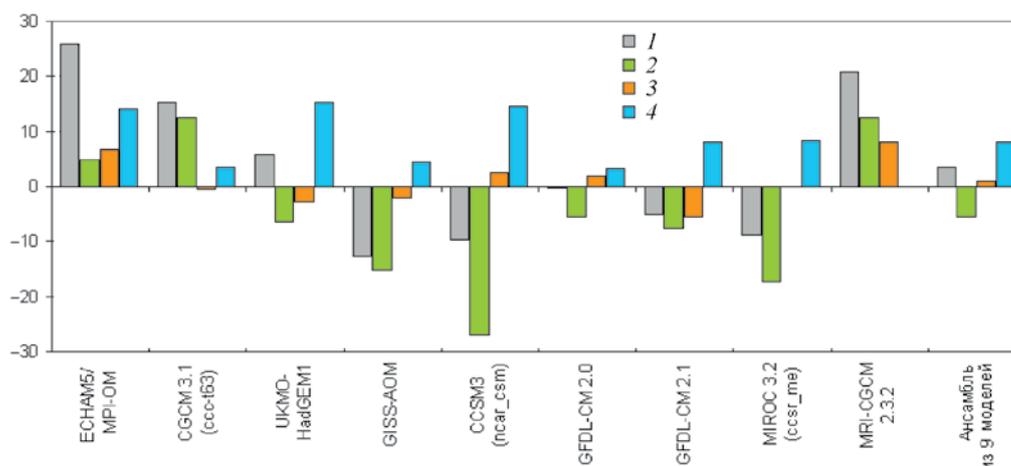


Рис. 2.22. Расчетные изменения в период 2011—2040 гг. относительно периода 1946—1999 гг. годового (1) и сезонного (2—4) стока в бассейне р. Волга (мм), полученные с помощью разных МОЦАО и ансамбля из 9 моделей. 2 — весна; 3 — лето и осень; 4 — зима.

мощью МОЦАО, с фактическими данными о стоке (восстановленный естественный сток) за период 1946—1999 гг. Как видно, ошибки моделирования с помощью всех МОЦАО как годового, так и сезонного стока весьма значительны, при этом для годового и зимнего стока они имеют разные знаки. Расчетный весенний сток завышен большинством моделей по отношению к фактическому, а летне-осенний — занижен. При анализе месячных значений стока, рассчитанных с помощью большинства моделей, был также выявлен сдвиг пика половодья примерно на месяц к более ранним датам.

На рис. 2.22 показаны результаты расчетов возможных изменений годового и сезонного стока в бассейне р. Волга для прогнозного периода относительно ретроспективного, полученных с помощью разных МОЦАО, а также ансамбля моделей. Как видно на рисунке, наблюдается большой разброс расчетных оценок возможных в будущем изменений стока по разным моделям. Средние значения по ансамблю из девяти моделей не показывают существенного изменения годового стока в бассейне р. Волга. Все модели дают значительное увеличение стока в зимний период в рассматриваемой перспективе, и большинство моделей — уменьшение весеннего стока. При этом

ансамблевая оценка для летне-осеннего стока показывает незначительные изменения.

Выполненный анализ продемонстрировал большой разброс значений климатического стока, рассчитанных с помощью разных МОЦАО, а также некорректное воспроизведение внутригодового распределения стока и сезонной водности практически всеми климатическими моделями. В определенных случаях имеет перспективу использование таких данных, но только о годовом стоке, рассчитанном по ансамблю моделей и осредненном за продолжительные периоды времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируем полученные результаты оценок произошедших и ожидаемых в XXI в. изменений стока в бассейне р. Волга.

Суммарные водные ресурсы р. Волга в 1978—2007 гг. по сравнению с 1946—1977 гг. увеличились в среднем на 41 км³/год, или на 17%. Вместе с тем пока нет оснований говорить о наличии направленных изменений в многолетних колебаниях водных ресурсов рек бассейна Волги, так как на большинстве рек они происходят в пределах естественной изменчивости.

На большей части бассейна р. Волга в 1978—2007 гг. по сравнению с 1946—1977 гг. произошло значимое увеличение зимнего стока. В связи с этим его многолетние изменения нельзя рассматривать в рамках гипотезы стационарности межгодовых колебаний стока. Существенно увеличился также летне-осенний сток на реках южной и юго-восточной частей бассейна.

На фоне увеличения стока межлунных месяцев на реках бассейна р. Волга существенно увеличилась также его изменчивость, при этом на большей части бассейна увеличение дисперсии является статистически значимым.

В 1978—2007 гг. по сравнению с 1946—1977 гг. в бассейне р. Волга произошло значительное потепление в январе — марте (на 1,5—3,0°C), причем в эти месяцы существенно увеличились также число оттепелей и сумма положительных значений температуры. Это — основные факторы изменения условий формирования стока. При этом наибольшие климатические изменения произошли в течение относительно небольшого промежутка времени в 1970-х годах, это привело к значительной перестройке всей системы влагооборота на водосборах. В результате существенно изменились условия формирования стока рек бассейна, что непосредственно отразилось на их водном режиме.

Со второй половины 1970-х годов в бассейне р. Волга сформировался новый квазистационарный водный режим рек. На большинстве речных бассейнов в целом за период 1946—2007 гг. наблюдаются значимые линейные тренды зимнего и летне-осеннего стока. Следует подчеркнуть, что при этом отмечалось не постепенное (монотонное) увеличение межлунного стока, а резкое (скачкообразное) в 1970-х годах, что послужило основной причиной нарушения однородности рядов характеристик стока.

Оценки с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана возможных изменений стока рек бассейна р. Волга на ближайшие

десятилетия, выполненные с использованием ряда сценариев будущего климата, показали, что увеличение годового стока в бассейне р. Волга, прогнозируемое большинством моделей, находится в пределах уже произошедших изменений за последние десятилетия.

Прогнозируемое всеми рассмотренными моделями (ансамблями моделей) дальнейшее повышение температуры воздуха зимой позволяет с большой долей уверенности считать, что увеличенный зимний сток рек бассейна Волги, наблюдающийся со второй половины 1970-х годов, сохранится и в ближайшие два-три десятилетия. При этом относительная доля весеннего стока в годовом будет уменьшаться. Что касается годового и летне-осеннего стока, то неопределенность их оценок на будущее очень велика. Это связано, в первую очередь, с невозможностью получения (в том числе с помощью МОЦАО) определенных характеристик осадков на отдаленную перспективу, поскольку им присуща очень высокая временная и пространственная изменчивость.

Таким образом, в настоящее время при оценках гидроклиматических условий в бассейне Волги на ближайшие десятилетия представляется весьма рискованным основываться на каком-либо одном сценарии климата будущего, в том числе и на ансамблевом. Наиболее целесообразно рассмотрение нескольких сценариев климата будущего (в том числе и базирующихся на современных данных наблюдений), на основе которых должны приниматься наиболее взвешенные решения в области управления водными ресурсами.

ЛИТЕРАТУРА

- Водные ресурсы России и их использование, 2008.** Под ред. И. А. Шикломанова, СПб, ГГИ, 598 с.
- Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин А. Л. и др., 1996а.** Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывше-

- го СССР, Метеорология и гидрология, № 11, с. 89—99.
- Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шикломанов И. А. и др., 1996.** Возможные изменения ресурсов и водного режима в бассейне Днепра при различных сценариях потепления климата, в сб.: Материалы научно-технической конференции “Водные ресурсы и устойчивое развитие экономики Беларуси”, Минск, т. 1, с. 21—23.
- Зубенок Л. И., 1976.** Испарение на континентах, Л., Гидрометеиздат, 264 с.
- Кузьмин П. П., 1961.** Процесс таяния снежного покрова, Л., Гидрометеиздат, 304 с.
- Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья, 1985.** Л., Гидрометеиздат, 189 с.
- Поляк И. И., 1975.** Оценивание линейного тренда временных метеорологических рядов, Труды ГГО, вып. 364, с. 51—55.
- Свод правил СП 33-101-2004, 2004.** Определение основных гидрологических характеристик, Госстрой РФ, 73 с.
- Харченко С. И., 1975.** Гидрология орошаемых земель, Л., Гидрометеиздат, 376 с.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2000.** Сток реки Волги и уровни Каспийского моря: влияние естественных и антропогенных факторов, в сб.: Международный научно-промышленный форум “Великие реки 2000”, Нижний Новгород, ННГАСУ, с. 45—48.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2002.** Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы, в кн.: Изменения климата и их последствия, СПб, Наука, с. 152—164.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2007.** Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России, в кн.: Гидрологические последствия изменения климата, Новосибирск, с. 192—204.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2008.** Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата, в кн.: Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда, секция 3, СПб, Гидрометеиздат, с. 159—163.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., Шалыгин А. Л., 2005.** Влияние климатических изменений на сток рек бассейна Лены, в сб.: Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии, СПб, Наука, с. 218—231.
- Arnell N. W., 2003.** Effects of IPCC SRES emission scenarios on river runoff: A global perspective, *J. Hydrol. and Earth Sciences*, No. 7, pp. 619–641.
- Branstetter M. L. and Famiglietti J. S., 1999.** Testing the sensitivity of GCM-simulated runoff to climate model resolution using a parallel river transport algorithm, in: *Preprints of 14th Conference on Hydrology*, Dallas, TX, Amer. Meteorol. Soc., pp. 391–392.
- Climate Change 2007, 2007.** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 996 p.
- Georgievsky V. Yu., 1998.** On global climate warming effects on water resources, in: *Water: A Looming Crisis? Proceedings of the International Conference on World Water Resources at the Beginning of the 21st Century (UNESCO)*, Paris, pp. 3–6.
- Georgievsky V. Yu., Ezhov A. V., Ignashin A. V., and Shalygin A. L., 1998.** The management of water resources system under climate change, in: *Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water*, Espoo, Finland, 17–20 August 1998, vol. 3.
- Georgievsky V. Yu. and Shalygin A. L., 2010.** Problem of estimation of recent and expected changes of water resources and water regime of rivers caused by climate, in: *International Conference of Global and Regional Climate Changes*, 16–19 November 2010, Kyiv, Ukraine, pp. 71–72.
- Georgievsky V. Yu. and Shiklomanov I. A., 2003.** Climate change and water resources, in: *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*, Cambridge University Press, pp. 390–413.
- Nohara D., Kitoh A., Hosaka M., and Oki T., 2006.** Impact of climate change on river runoff, *J. Hydrometeorol.*, vol. 7, pp. 1076–1089.
- Special Report on Emission Scenarios, Nakićenović N. et al., 2000.** A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 599 p.
- Wolock D. M. and McCabe G. J., 1999.** Estimates of runoff using water-balance and atmospheric general circulation models, *J. Amer. Water Resources Assn.*, vol. 35, No. 6, pp. 1341–1350.