

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ  
В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ СУШИ

УДК 556.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО  
И ХИМИЧЕСКОГО СТОКА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В БАССЕЙНЕ  
НИЖНЕКАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА<sup>1</sup>

© 2023 г. Т. Б. Фашевская<sup>а</sup>, \*, Ю. Г. Мотовилов<sup>а</sup>, К. В. КОРТУНОВА<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: [tf.ugatu@yandex.ru](mailto:tf.ugatu@yandex.ru)

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 08.11.2022 г.

Принята к публикации 20.12.2022 г.

Полураспределенная физико-математическая модель ECOMAG-НМ применена для моделирования генетической структуры водного и химического стока меди, цинка и марганца в крупном речном бассейне Нижнекамского водохранилища. Модель протестирована на многолетних данных гидрологического и гидрохимического мониторинга водных объектов. Проведена оценка вклада поверхностной, почвенной и грунтовой составляющих водного и химического стока металлов на различных участках речной сети. Установлено, что на большей части водосбора загрязнение рек металлами происходит в основном за счет диффузного их вымывания из почвенного слоя. Показано влияние генетической структуры водного и химического стока на межгодовые и сезонные изменения содержания металлов в речной сети.

*Ключевые слова:* речной бассейн, ECOMAG-НМ модель, генетические составляющие, водный сток, химический сток, тяжелые металлы.

DOI: 10.31857/S0321059623040077, EDN: QJHXQW

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из важных задач гидрологии речных бассейнов — исследование генетических составляющих речного стока, решение которой становится все более актуальным в связи с необходимостью углубления представлений о механизмах отклика гидрологических систем речного бассейна на изменения климата и антропогенные воздействия, о закономерностях формирования качества речных вод и др. Существуют четыре основных подхода к оценке генетических составляющих речного стока: прямые натурные измерения на малых экспериментальных бассейнах [1, 26]; косвенные оценки с использованием трассеров [5, 27, 28]; графоаналитические методы “расчленения гидрографа” [8, 22, 25], которые в последние годы часто автоматизируются [14, 23]; методы физико-математического моделирования формирования речного стока и его генетических составляющих [7, 9, 32]. Перспективы исследования генетической структуры речного стока в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки на речные бассейны (изменения землепользования, функ-

ционирования крупных промышленных объектов и водохозяйственных систем, откачки подземных вод, утилизации в подземных горизонтах сточных вод и др.) связаны с использованием физико-математических моделей формирования речного стока, которые описывают процессы взаимодействия поверхностных, почвенных и грунтовых вод по метеорологическим данным и параметры которых зависят от измеряемых физических характеристик речного бассейна. При наличии в составе подобных моделей достаточно разработанных гидрохимических блоков появляется возможность не только оценить структуру водного стока, но и получить количественные оценки генетических составляющих гидрохимического стока [21].

Гидрохимический сток — интегральный показатель процессов трансформации и миграции в геосферах речного бассейна загрязняющих веществ (ЗВ), а также их поступления в речную сеть от точечных и диффузных источников загрязнения. Неоднородность химического состава разных водоносных горизонтов почв и горных пород и периодическое преобладание в составе речных водных масс вод разных генетических категорий приводят к существенным пространственно-вре-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 22-27-00598, <https://rscf.ru/project/22-27-00598/>).

менным изменениям химического состава речных вод в пределах водосборного бассейна [6].

В данной работе выполнено исследование формирования и генетических составляющих водного и химического стока тяжелых металлов (ТМ) в пределах крупного речного бассейна Нижнекамского водохранилища (НКВ) методами математического моделирования. Со времен горнозаводского освоения Урала в регионе ведется интенсивная хозяйственная деятельность, связанная с разработкой и освоением месторождений рудных полезных ископаемых и переработкой минеральных ЗВ поверхностных водных объектов региона. Ежегодно отмечается несколько десятков случаев высокого и экстремально высокого загрязнения водных объектов ТМ, в том числе марганцем, медью, цинком [4].

При моделировании генетических составляющих речного стока может ярко проявляться присущий численным математическим моделям природных процессов эффект эквивинальности [3, 24], при котором несколько различных наборов калибровочных параметров показывают примерно одинаковую интегральную реакцию водосбора на внешние воздействия, например на точность моделирования гидрографов стока, но при этом вклад источников питания реки существенно отличается. Смягчение проблемы эквивинальности достигается путем расширения информационного обеспечения модели формирования стока дополнительными данными. Например, в [17] для выделения генетических типов вод дополнительно привлекаются гидрохимические данные и способ идентификации водных масс на основе идеи о гидрохимическом различии отдельных категорий локального стока (поверхностные, почвенные и грунтовые воды) [21]. Снижение неопределенностей при моделировании генетических составляющих речного стока может быть достигнуто и при ориентации на другие, например графоаналитические, способы выделения этих составляющих. Именно такой способ применен в данной работе при выполнении дополнительной калибровки параметров модели для уточнения объемов поверхностного, почвенного и грунтового стока.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Характеристика объекта исследования*

Данная работа – продолжение серии статей авторов по исследованию процессов миграции ТМ в бассейне НКВ с привлечением методов математического моделирования. Поэтому основные характеристики бассейна достаточно подробно описаны в предыдущих работах [11, 19, 30], и здесь приведены лишь наиболее важные факторы, влияющие на макромасштабные процессы тепло- и массообмена в геосистеме НКВ.

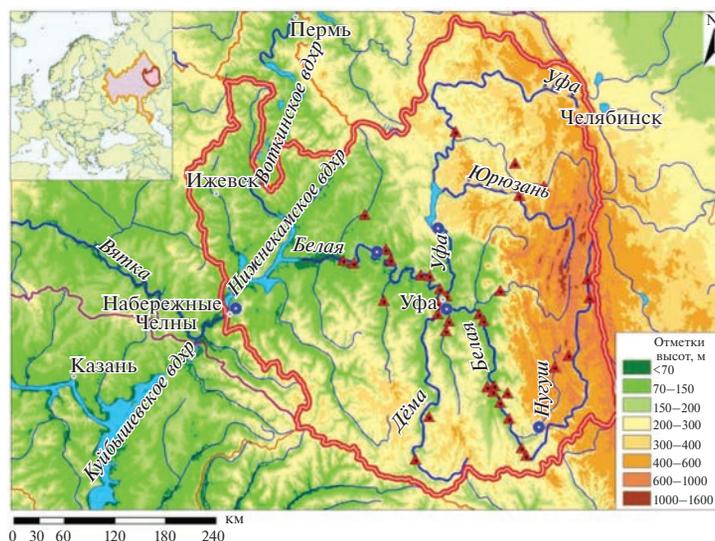
Водосбор расположен в пределах предгорных равнин и гор Южного Урала. Русловое водохранилище построено в 1979 г. на р. Каме, оно самое низкое в каскаде Камских гидроэлектростанций. Площадь частного водосбора НКВ между Нижнекамским (г. Набережные Челны) и Воткинским (г. Чайковский) гидроузлами составляет 186 тыс. км<sup>2</sup>, большую его часть (142 тыс. км<sup>2</sup>) занимает бассейн р. Белой (рис. 1). Высотные отметки водосбора варьируют от 60 м в устье р. Белой до 1654 м в ее верховьях (гора Яман-Тау).

На умеренно континентальный климат региона оказывают влияние располагающиеся по восточной периферии водосбора горы Южного Урала, которые задерживают проникающие сюда относительно теплые и насыщенные влагой воздушные массы Атлантического океана. Поэтому на территории бассейна проявляются широтная зональность, усложненная вертикальной поясностью в районе Уральских гор, и связанный с этим переход от климата южных и юго-западных полупустынных степных районов, где годовое количество осадков колеблется в пределах 300–400 мм, а средняя годовая температура воздуха ~3°C, к более увлажненным районам (северо-восточным и восточным горно-лесным), где годовое количество осадков превышает 600 мм, а средняя годовая температура воздуха ниже 1°C.

Питание рек, впадающих в НКВ, в основном снегового типа [12]. Среднегодовой боковой приток воды в НКВ составляет 36.5 км<sup>3</sup>, из которых 26.1 км<sup>3</sup> дает сток р. Белой. За период весеннего половодья в апреле–мае проходит >60% объема годового стока. Соотношение подземной и поверхностной составляющих речного стока существенно меняется как по территории, так и по сезонам года. Доля подземного питания рек увеличивается с западной части территории к восточной и достигает максимума – 40–50% общей величины речного стока – в предгорных и горных частях водосбора [13].

Засушливый климат в центральной и западной частях бассейна обуславливает в маловодные годы дефицит водных ресурсов, который покрывается водой из эксплуатируемых почти 400 водохранилищ объемом >100000 м<sup>3</sup>, а также множества более мелких прудов. Наиболее крупные водохранилища – Павловское на р. Уфе, Нугушское на р. Нугуш и Юмагузинское на р. Белой.

Особенность геологического строения территории – широкое распространение минерального сырья и в первую очередь рудных элементов в горных породах. Почвы водосбора (в основном черноземы, а также хорошо дренируемые дерново-подзолистые, серые лесные и горные почвы на востоке области) наследуют химический состав



**Рис. 1.** Карта водосбора НКВ и расположение гидрологических (кружки) и гидрохимических (треугольники) постов мониторинга.

почвообразующих горных пород. Эти обстоятельства обуславливают повышенное фоновое содержание металлов в поверхностных и подземных водах.

Интенсивное промышленное освоение региона началось около 300 лет назад с разработки месторождений меди. Уже во второй половине XVIII в. в регионе действовали свыше 50 железоделательных и медеплавильных заводов, которые давали >50% меди, производившейся в то время в России [19]. В настоящее время на территории бассейна продолжают активно работать объекты горнорудной промышленности, а также предприятия нефтедобычи, нефтепереработки, химии и нефтехимии, металлургии, машиностроения и энергетики. В регионе производится значительное количество удобрений и сельскохозяйственной продукции. Таким образом, современные промышленные и сельскохозяйственные предприятия в совокупности с объектами их инфраструктуры – дополнительные антропогенные источники поступления металлов на водосбор [19] через выбросы ТМ в атмосферу и их последующее осаждения на территорию, поверхностный смыл с водосбора, сбросы сточных вод, поступление из загрязненных подземных водоносных горизонтов или донных отложений.

Количество ЗВ, поступающих в водные объекты от контролируемых точечных источников, значительно снизилось после начала Перестройки в 1990-х гг., а также после введения новых правил отчетности предприятий о сбросах ЗВ по форме 2-ТП (водхоз) [2, 4]. В работе [18] выполнен анализ корректности информации, содержащейся в этих формах государственной отчетности, и показано, что в некоторых случаях количе-

ство фактически содержащихся в сточных водах металлов может на 1–2 порядка превышать данные статистики. Таким образом, при существующих подходах к заполнению форм отчетности данные о сбросах ЗВ от точечных источников могут содержать существенные погрешности [15, 20].

### *Модель ECOMAG-НМ*

Для моделирования генетических составляющих водного и химического стока в бассейне НКВ задействована полураспределенная физико-математическая модель ECOMAG-НМ (Ecological Model for Applied Geophysics – Heavy Metals) [11], работающая с суточным шагом по времени и состоящая из двух блоков: гидрологического и гидрохимического. Первая подмодель описывает процессы гидрологического цикла суши и позволяет по метеоданным рассчитывать пространственные поля характеристик тепло- и влагообмена на элементарных водосборах – пространственных расчетных ячейках модели. Гидрохимическая модель описывает процессы миграции ЗВ в речном бассейне с учетом следующих источников и процессов. Источники загрязнения располагаются на поверхности земли, внутри почвы или в зоне грунтовых вод, а также выпадают на поверхность водосбора из атмосферы. Во время выпадения осадков и таяния снега ЗВ на поверхности земли растворяются в дождевой или талой воде. Часть растворенных веществ смывается с поверхностным стоком, другая часть – проникает в почву с просачивающейся водой. В почве происходит взаимодействие между почвенным раствором и твердой фазой почвы. ЗВ могут сорбироваться твердыми частицами почвы из почвен-

ного раствора или поступать в него с твердых частиц. Часть ЗВ поступает в речную сеть из почвенного горизонта с почвенным стоком, другая часть проникает в зону подземных вод, формирующих базисный сток.

На каждой расчетной ячейке модели (элементарном водосборе) гидрологические и гидрохимические процессы моделируются для четырех уровней: зоны формирования поверхностного стока (в холодный период года к поверхностной емкости добавляется емкость снежного покрова), области формирования почвенного стока в верхнем горизонте почвы (горизонт *A*) и подстилающем его более глубоком слое (горизонт *B*) и зоны грунтовых вод. Поверхностная, почвенная и грунтовая генетические составляющие стока выклиниваются в речную сеть. В гидрохимической подмодели дополнительно учитываются сбросы ЗВ со сточными водами, осуществляемые непосредственно в водотоки. В процессе транспорта ЗВ по речной сети при определенных гидравлических условиях они могут осаждаться с наносами и накапливаться в донных отложениях.

Гидрологическая модель ЕСОМАГ протестирована на многих речных бассейнах, расположенных в разных физико-географических зонах с разными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов. Уравнения, алгоритмы и испытания гидрологической модели описаны в работе [10]. Уравнения, алгоритмы и испытания гидрохимической модели описаны в работах [30, 31].

#### *Адаптация модели для бассейна НКВ*

Адаптация модели для бассейна НКВ и результаты ее верификации были выполнены и опубликованы ранее, когда проводились исследования возможностей модели ЕСОМАГ-НМ для следующих целей: проведения расчетов гидрологических (расходы воды и модули водного стока) и гидрохимических (концентрации металлов в речной воде и модули химического стока) характеристик крупного речного бассейна с интенсивной антропогенной нагрузкой [11]; оценки вклада точечных и диффузных источников в загрязнение речных вод при разных сценариях антропогенной нагрузки [31]; оценки климатических изменений речного стока и качества воды в бассейне НКВ [30]. По результатам проведенных исследований на разных участках водосбора выявлены водотоки с повышенными концентрациями металлов в речной воде, на которых, однако, Росгидрометом не ведутся гидрологические и гидрохимические наблюдения. Поэтому в данной работе в бассейне НКВ выделены 20 участков речной сети (в том числе с повышенными и пониженными концентрациями ТМ в речных водах) и с использованием компьютерной технологии Информационно-

моделирующего комплекса (ИМК) ЕСОМАГ на частных водосборах этих 20-ти участков проведены более детальные исследования процессов водообмена, источников питания рек и формирования генетических составляющих водного и химического стока (табл. 1). Площади выбранных участков значительно различаются и распределены следующим образом: до 2 тыс. км<sup>2</sup> – 7 участков, 2–5 тыс. км<sup>2</sup> – 4 участка, 5–20 тыс. км<sup>2</sup> – 4 участка, ≥50 тыс. км<sup>2</sup> – 5 участков.

Для уточнения источников питания реки и снижения неопределенностей при расчетах генетических составляющих речного стока выполнены дополнительная калибровка параметров гидрологического блока модели и корректировка коэффициентов горизонтальной фильтрации почвогрунтов. Для этого кроме данных по стоку на постах гидрологического мониторинга в бассейне НКВ дополнительно привлекались данные о подземной составляющей водного стока, полученные с помощью графического способа расчленения гидрографов по видам питания, основанного на методике Б.И. Куделина [8].

Верификация гидрохимического блока модели проведена путем сравнения результатов моделирования с данными о динамике содержания металлов в речных водах на постах мониторинга р. Белой и ее притоков, полученными службами Росгидромета за период 2002–2007 гг.: на 33 постах для меди и цинка и на 26 постах для марганца (рис. 1). В исследованиях, проведенных ранее, для проверки гидрохимического блока модели ЕСОМАГ-НМ использовались данные мониторинга содержания в речных водах меди и цинка за период 2004–2007 гг. Увеличение продолжительности мониторинга и, соответственно, количества данных, используемых для верификации модели, позволяет повысить репрезентативность результатов моделирования. Исследуемый период включает в себя также группы лет, относящиеся к разным категориям водности, что позволяет учесть влияние ее межгодовых изменений на соотношение разных составляющих водного и химического стока, на формирование качества речной воды: 2002, 2007 гг. – многоводные годы; 2003, 2005 гг. – годы средние по водности; 2004, 2006 гг. – маловодные годы.

В качестве информации об антропогенных точечных источниках загрязнения речных вод задавались данные о сбросах металлов со сточными водами в 12-ти крупных населенных пунктах в бассейне р. Белой на основе форм статистической отчетности 2-ТП (водхоз) за период 2002–2007 гг.

Таблица 1. Сведения об исследуемых участках в бассейне НКВ

Река	Участок	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Река	Участок	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>
Белая	От истока до г. Мелеуза	11 900	Яманелга	От истока до устья	735
	От истока до г. Ишимбай	16 800	Киги	От истока до с. Кондаковка	1250
	От истока до г. Уфы	47 000	Большой Ик Бирь	От истока до с. Таишево	1500
	От г. Уфы до плотины НКВ	86 000		От истока до с. Старобурново	1957
	От истока до г. Дюртюли	125 000	Чермасан	От истока до д. Чермасан	3147
От истока до плотины НКВ	186 000	Дема	От истока до с. Дюсяново	4050	
Нугуш	От истока до с. Новосеитово	360	Уршак	От истока до г. Булгаково	4378
	От истока до устья	3100	Ай	От истока до с. Лаклы	6400
Большой Авзян Узьян	От истока до с. Нижний Авзян	550	Быстрый	От истока до д. Черлак	7780
	От истока до д. Новосубхангулово	1717	Танып Уфа	От истока до г. Уфы	53000

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Испытания модели*

**Испытания гидрологического блока модели**, описанные в работах [11, 31], проводились путем визуального сопоставления фактических и модельных гидрографов стока на гидрологических постах в бассейне НКВ, а также с использованием традиционных используемых в гидрологических расчетах статистических критериев Нэша—Сатклифа *NSE* (соответствие суточных гидрографов) и *PBIAS* (соответствие объемов годового стока, %). Дополнительные успешные испытания модели для участков речной сети, не освещенных гидрометрическими наблюдениями, проведены путем сопоставления рассчитанной карты среднемноголетних модулей стока с картой модулей, построенной по фактическим данным и приведенной в [16]. Уточнение параметров горизонтальной фильтрации почвогрунтов незначительно сказалось на оценках соответствия рассчитанных и фактических гидрографов стока в пунктах гидрологического мониторинга; в большей степени оно повлияло на соотношение генетических составляющих речного стока. В качестве примера в табл. 2 и на рис. 2 показано соответствие рассчитанных и фактических характеристик стока в замыкающем створе бассейна, а также грунтовой составляющей в створе Белая—Уфа, определенной по результатам моделирования и на основе метода Б.И. Куделина [8] по алгоритму GRWAT [14]. Результаты сопоставления свидетельствуют о хорошем соответствии модельных и фактических величин [29].

**Результаты испытаний гидрохимического блока модели** оценивались путем сопоставления рас-

считанных и измеренных концентраций металлов в разных створах речной сети с разным временным осреднением. На рис. 3 приведены примеры сравнения результатов моделирования с данными измерений концентраций марганца с суточным, квартальным и среднемноголетним разрешением. На основании сравнения суточных концентраций (рис. 3а) можно заключить, что в большинстве случаев расхождение между рассчитанными и фактическими значениями сопоставимо с величиной погрешности их измерения (~50%). Сопоставление внутригодового распределения концентраций металлов, осредненных за исследуемый период по кварталам, показало, что для всех створов коэффициенты корреляции между осредненными рассчитанными и измеренными концентрациями варьируют в диапазонах: по меди 0.32 (третий квартал) – 0.73 (второй квартал); по цинку 0.52 (третий квартал) – 0.80 (первый квартал); по марганцу 0.68 (четвертый квартал) – 0.85 (первый квартал) (рис. 3б). На рис. 3в показаны различия среднемноголетних концентраций марганца в створах гидрохимического мониторинга, расположенных в порядке их удаления от верховий р. Белой в направлении к створу Нижнекамского гидроузла. Коэффициенты корреляции между среднемноголетними рассчитанными и измеренными концентрациями составляют 0.52 для меди, 0.76 для цинка и 0.82 для марганца, что свидетельствует об удовлетворительном воспроизведении моделью основных пространственно-временных закономерностей формирования стока металлов на территории бассейна и их концентраций в речной сети [29]. Необходимо отметить, что в результате учета количественного соотношения генетических составляющих водного и химического

**Таблица 2.** Соответствие фактических и рассчитанных гидрологических характеристик в бассейне НКВ за период 2002–2007 гг.

Годы	Объем бокового притока в НКВ, км <sup>3</sup> /год		Статистические критерии		Грунтовая составляющая стока Белая–Уфа, %	
	расчет	факт	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i> , %	расчет	по Б.И. Куделину
2002	52.26	52.32	0.93	0.11	36.1	49.7
2003	39.12	39.07	0.81	-0.13	47.3	49.5
2004	31.10	31.26	0.80	0.51	60.5	62.0
2005	44.86	39.56	0.91	-13.4	39.3	45.7
2006	28.67	30.17	0.76	4.97	69.4	59.4
2007	56.16	48.23	0.86	-16.4	29.0	35.5
Среднее за период	42.0	40.1	0.88	-4.7	46.9	50.3

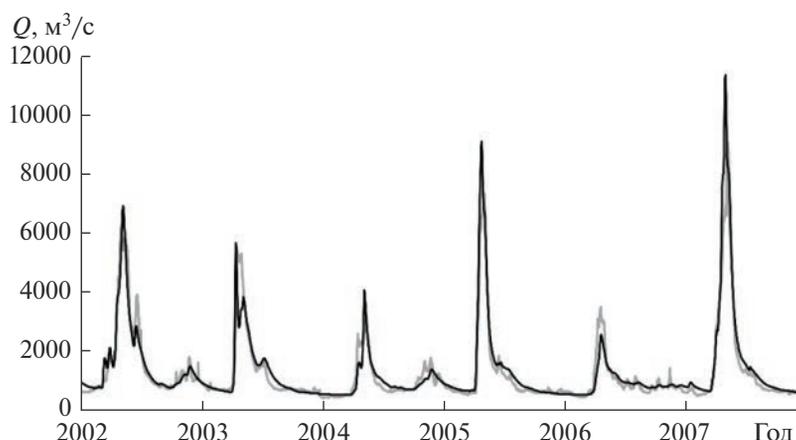
стока при моделировании содержания металлов в речной сети получены более высокие значения коэффициентов корреляции между рассчитанными и измеренными концентрациями, чем опубликованные ранее [11, 30, 31].

*Водный сток и его генетические составляющие*

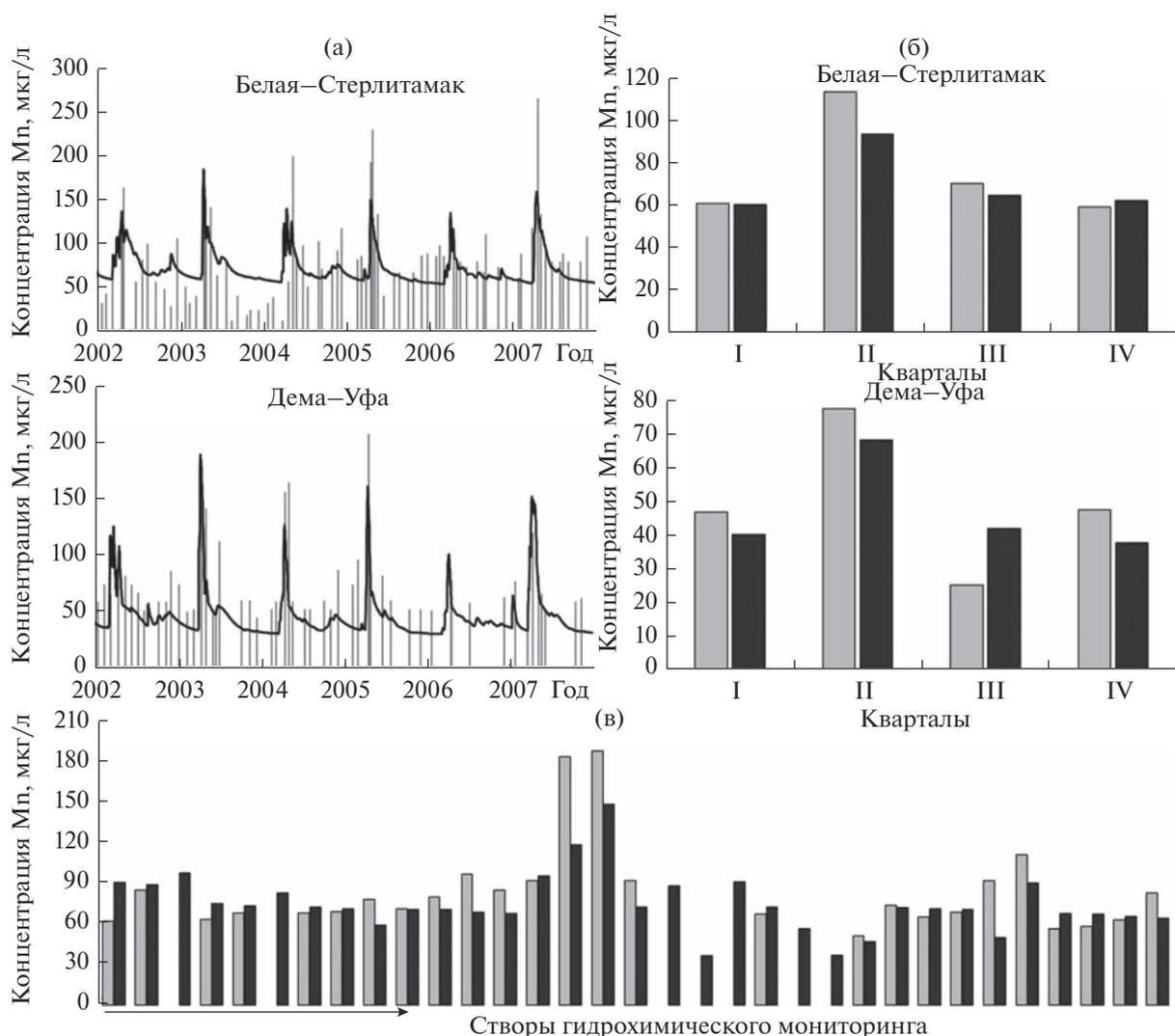
Закономерности пространственного изменения генетических составляющих водного стока в бассейне НКВ оценивались на основании анализа результатов их моделирования на 20-ти выделенных водосборах. Анализ показал, что при среднемноголетнем осреднении на 3/4 исследуемых участков преобладает почвенная составляющая стока, на 1/4 участков – грунтовая (рис. 4). Грунтовая составляющая преобладает на пяти участках рек, протекающих в восточной и юго-восточной частях бассейна (реки Ай, Узьян, Большой Авзян, а также на участках р. Белой до г. Мелеуза и г. Ишимбай). Повышенная доля грунтовой составляющей на восточной периферии бассейна в предгорьях Южного Урала обусловлена в целом более высокой проницаемостью почвогрунтов более легкого механического состава (дер-

ново-подзолистые, серые лесные, горные почвы) [13]. В этих условиях значительная часть выпадающих на поверхность водосбора осадков проникает сквозь зону аэрации почв к зеркалу грунтовых вод и при повышенных гидравлических уклонах формирует обильную грунтовую составляющую стока. Среди 20 исследуемых участков речной сети доля грунтового питания в среднемноголетнем стоке варьирует от 11 до 66%. На более мощных почвах тяжелого механического состава (черноземы) в центральной и западной частях бассейна в среднемноголетнем стоке преобладает почвенная составляющая, которая варьирует от 28 до 63%. Поверхностный сток в целом составляет незначительную часть годового стока, формируется в периоды интенсивных дождей и при весеннем снеготаянии и на выделенных 20-ти экспериментальных участках варьирует в диапазоне от 5 до 25% годового стока.

Рис. 5 показывает, как по течению р. Белой могут меняться источники питания и соотношение между различными составляющими среднегодового водного стока. Вклад грунтовой составляющей при прохождении реки от истока до устья снижается в 1.3 раза, почвенной и поверхностной –



**Рис. 2.** Гидрографы бокового притока в НКВ: фактического (серая линия) и расчетного (черная линия).



**Рис. 3.** Измеренные (серые столбики) и рассчитанные (черные линия и столбики) концентрации марганца в речной воде на постах гидрохимического мониторинга за период 2002–2007 гг.: а – динамика концентраций с дневным разрешением; б – среднегодовые концентрации по кварталам; в – среднегодовые концентрации на постах, расположенных по течению р. Белой; стрелкой указано направление течения реки.

увеличивается в ~1.3 раза. В верхнем течении реки (до городов Мелеуз и Ишимбай) преобладает грунтовая составляющая стока, ниже по течению (г. Уфа и створ плотины НКВ) – почвенная. Соотношение между генетическими составляющими водного стока существенно меняется на одних и тех же исследуемых участках в многоводные, средние по водности и маловодные годы. Отмечается закономерность увеличения доли грунтовой составляющей водного стока и снижения доли почвенной составляющей с уменьшением водности года (рис. 6).

Наибольший вклад поверхностной составляющей наблюдается главным образом в многоводные или средние по водности годы. На большинстве исследуемых участков преобладание почвенной или грунтовой составляющих водного стока

сохраняется в разные по водности годы (рис. 6а, 6б). На некоторых участках в многоводные годы преобладает почвенная составляющая, а в маловодные годы – грунтовая (рис. 6в, 6г).

Внутригодовые (межквартальные) изменения водного стока и его генетических составляющих характеризуются максимальными его величинами в период весеннего половодья во втором квартале (когда через исследуемые участки протекает от 43 до 70% годового водного стока), минимальными – в период зимней межени преимущественно в первом квартале.

#### *Сток металлов и его генетические составляющие*

На исследуемых водосборах в бассейне НКВ среднегодовые доли составляющих химиче-

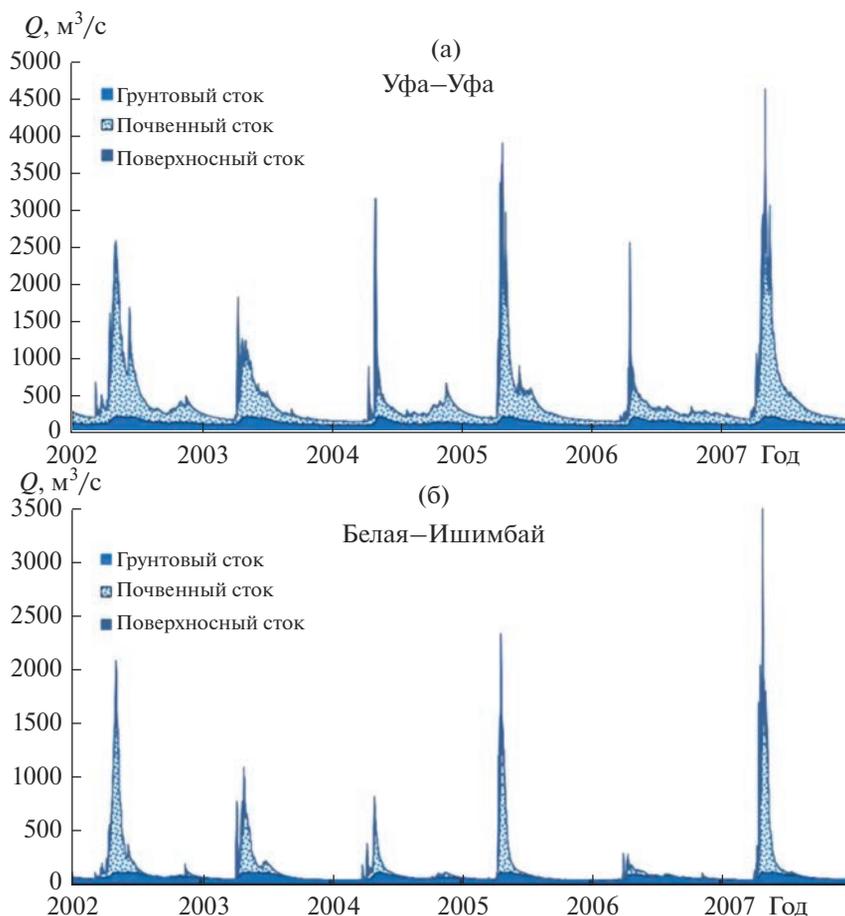


Рис. 4. Динамика генетических составляющих водного стока на исследуемых участках в бассейне НКВ: а – преобладает почвенная составляющая, б – преобладает грунтовая составляющая.

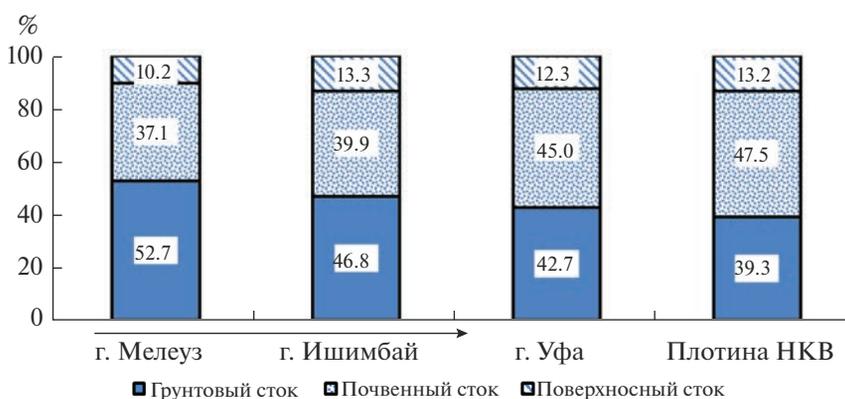
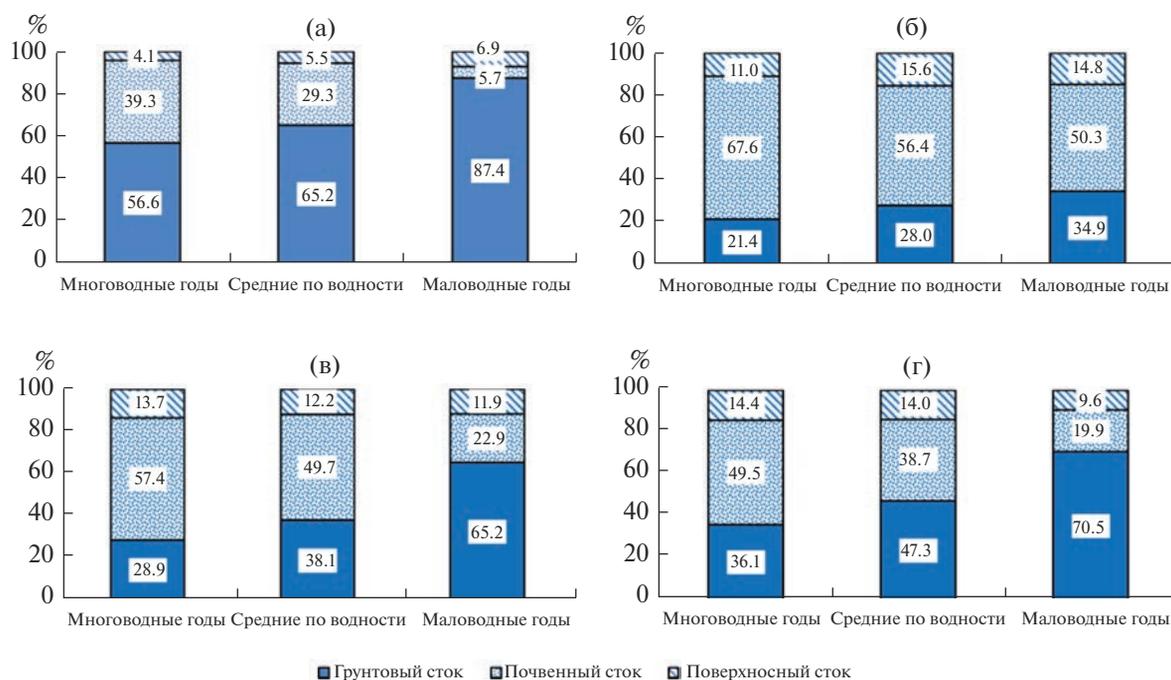


Рис. 5. Изменение соотношения генетических составляющих среднемноголетнего водного стока на постах, расположенных по течению р. Белой (стрелкой указано направление течения реки).

ского стока металлов, как и водного стока, варьируют в широких диапазонах (табл. 3), причем преобладает почвенная составляющая химического стока, которая может достигать ~80% годового стока металлов (рис. 7а). Лишь на одном участке

(от истока р. Ай до с. Лаклы) в среднемноголетнем стоке меди преобладает грунтовая составляющая, превышающая половину годового стока меди (53%) (рис. 7б). Доля поверхностной составляющей в химическом стоке превышает ее долю в



**Рис. 6.** Соотношение генетических составляющих водного стока на исследуемых участках речной сети в различные по водности годы: а – от истока р. Ай до с. Лаклы; б – от истока р. Киги до с. Кондаковка; в – от истока р. Нугуш до с. Новосейтово; г – от истока р. Белой до г. Ишимбай.

водном стоке и, например, на участке от истока р. Демы до с. Дюсяново, расположенного в южной части бассейна, достигает 47% годового стока меди (рис. 7в). Доля металлов, поступающих в речную сеть со сбросами сточных вод, в целом невелика (табл. 3), однако на некоторых участках может достигать 10% годового стока (например, сбросы цинка на участке р. Белой от г. Уфы до НКВ с наибольшим количеством выпусков сточных вод). В створе плотины НКВ вклад сточных вод незначителен и составляет ~1% суммарного стока меди, ~3% суммарного стока цинка, ~0.1% суммарного стока марганца.

В табл. 4 приведены рассчитанные по модели среднееголетние доли составляющих стока металлов в бассейне НКВ на всем участке от истока р. Белой до плотины НКВ. Из табл. 4 видна пре-

валирующая доля почвенных вод при диффузном поступлении металлов в речную сеть. Кроме того, показано, что около половины поступающих с водосбора в речную сеть металлов может оседать на речном дне при транспортировке их потоком по речному руслу к замыкающему створу.

Как и для водного стока, отмечается изменение соотношения между грунтовой и почвенной составляющими среднееголетнего стока металлов на постах, расположенных вниз по течению р. Белой (рис. 8). Грунтовая составляющая стока металлов при этом уменьшается в 1.5–2 раза, почвенная составляющая увеличивается 1.2 раза, поверхностная составляющая увеличивается в 1.1–2 раза.

Изменения годового стока металлов коррелируют с изменениями водности года: на всех ис-

**Таблица 3.** Диапазоны изменения составляющих водного и химического стока металлов на исследуемых участках в бассейне НКВ

Сток	Доля в среднееголетнем годовом стоке, %			
	поверхностный сток	почвенный сток	грунтовый сток	сброс в составе сточных вод
Водный	5–25	28–63	11–66	–
Химический				
Cu	6–47	42–80	3–53	0.4–3.5
Zn	5–39	38–84	3–46	1.0–9.7
Mn	15–35	46–75	3–32	0.1–0.2

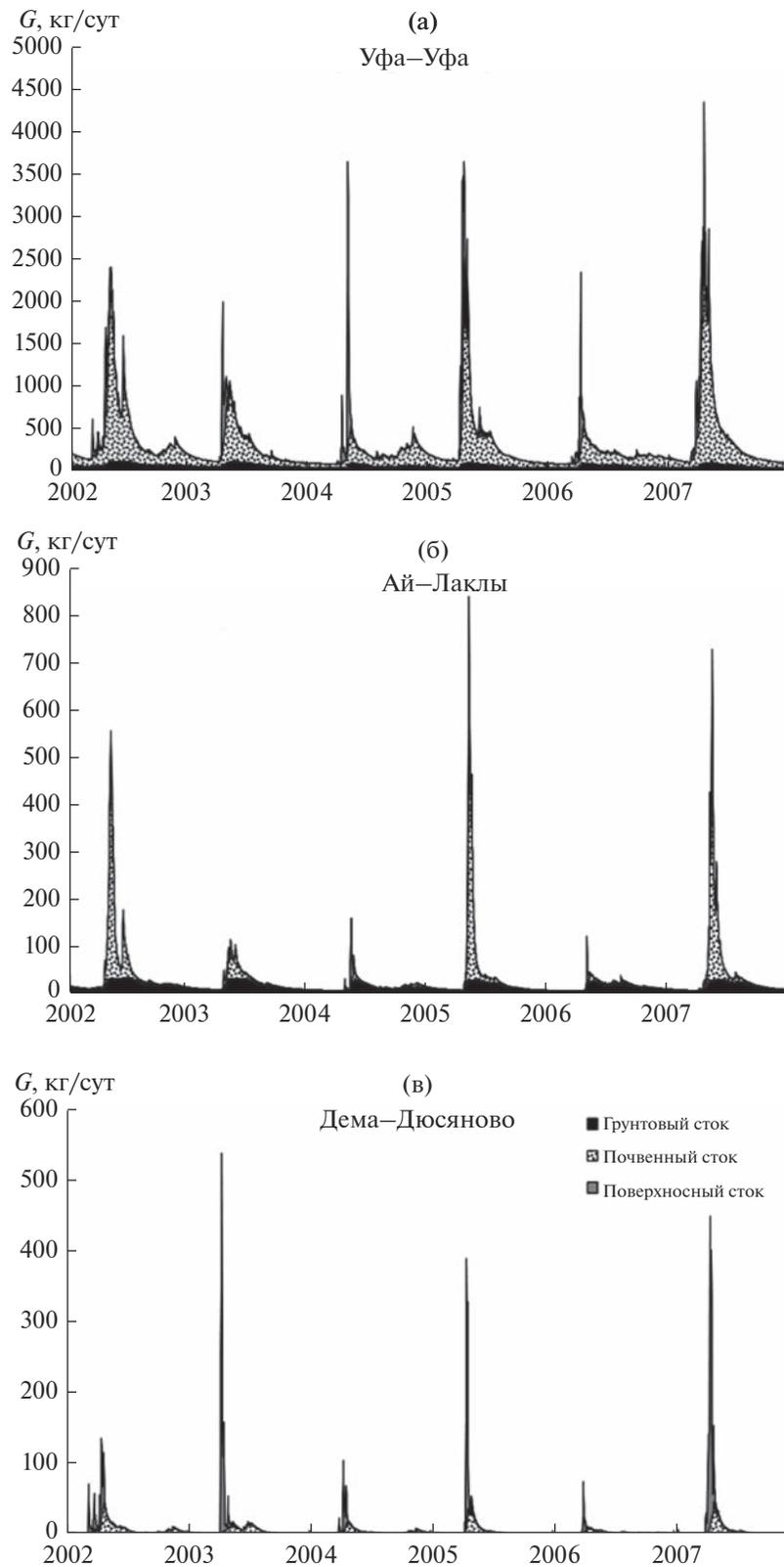


Рис. 7. Динамика генетических составляющих химического стока  $G$  меди на исследуемых участках в бассейне НКВ.

**Таблица 4.** Генетические составляющие стока металлов в речную сеть с водосбора НКВ за многолетний период, т/год

Металл	Вынос металлов стоком в речную сеть			Сброс со сточными водами	Оседание на речное дно	Вынос металлов в НКВ
	поверхностным	почвенным	грунтовым			
Медь	64.7	174.3	57.2	2.8	138.7	160.3
Цинк	65.0	164.5	62.1	8.8	138.8	161.6
Марганец	969.6	2091.1	808.8	3.2	805.4	3067.3

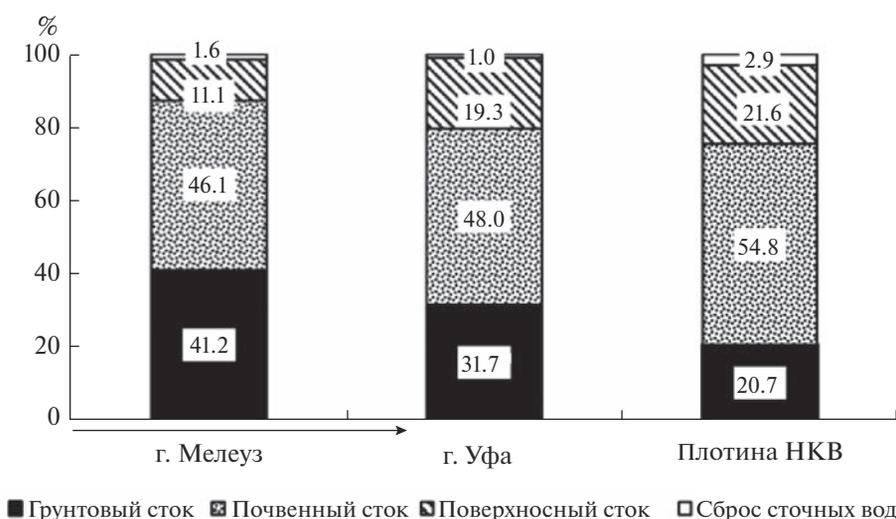
следуемых участках речной сети химический сток увеличивается и достигает максимальных значений в многоводные годы. Разница стока металлов в многоводные и маловодные годы варьирует в диапазоне 1.7–3.1 раза. В разные по водности годы соотношение между разными генетическими составляющими стока металлов меняется. Почти на всех исследуемых участках доля грунтовой составляющей стока металлов, как и водного стока, наибольшая в маловодные годы и наименьшая в многоводные. Аналогично водному стоку на большинстве участков доля почвенной составляющей стока металлов максимальна в многоводные и минимальна в маловодные годы (рис. 9). Поверхностная составляющая химического стока на подавляющем большинстве участков максимальна в средние по водности годы, но также может преобладать и в другие годы. Доля металлов, поступающая в речную сеть со сбросами сточных вод, повышается в маловодные годы.

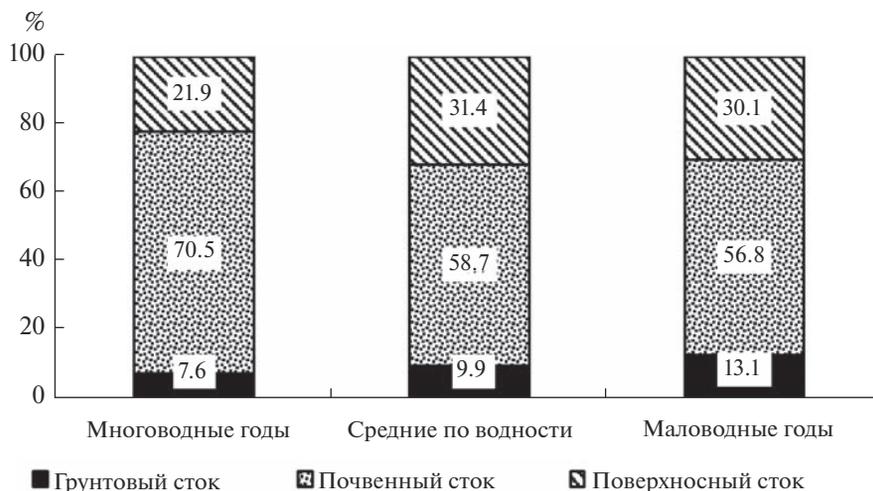
Внутригодовые изменения химического стока характеризуются максимальными величинами во втором квартале, минимальными преимущественно в первом квартале, на некоторых участках – в четвертом. На нескольких участках вклад

грунтовой составляющей не меняется в течение года. Разница стока металлов во втором квартале и в остальные сезоны может достигать 13 раз по меди, 14 раз по цинку и 15 раз по марганцу. Основная часть стока металлов, сформировавшегося во втором квартале, как и водного стока, формируется в почвенном горизонте.

На исследуемых участках прослеживаются тесные связи между среднеквартальными величинами водного и химического стока, причем из рис. 10 видно, что для разных по размерам водосборов исследуемых участков при увеличении водности сток металлов растет более интенсивными темпами: в среднем при увеличении водного стока в 5 раз сток металлов увеличивается в 7 (Zn)–10 (Mn) раз.

Более сложные нелинейные связи прослеживаются между среднееголетними величинами водного и химического стока в замыкающих створах всех исследуемых участков (рис. 11). При увеличении водного стока сток металлов увеличивается, и при среднееголетних расходах воды  $>1000 \text{ м}^3/\text{с}$  химический сток меди и цинка асимптотически приближается к постоянному значению  $\sim 450 \text{ кг/сут}$  (164 т/год), что, по-види-

**Рис. 8.** Изменение соотношения генетических составляющих среднееголетнего стока цинка на постах, расположенных по течению р. Белой; стрелкой указано направление течения реки.



**Рис. 9.** Соотношение генетических составляющих стока марганца на участке р. Киги от истока до с. Кондаковка в различные по водности годы.

тому, определяется максимальной обменной емкостью водосбора при выщелачивании металлов из почвенно-грунтовой толщи и выносе их в речную сеть. При этом, однако, сток марганца продолжает расти, т. е. марганец продолжает вымываться из почвенно-грунтовой толщи, и максимальная обменная емкость водосборов по Mn наступает при более высоких значениях водного стока. Согласно уравнению, аппроксимирующему зависимость  $G_{Mn} = f(Q)$ , сток марганца начинает асимптотически приближаться к постоянному значению  $\sim 10200$  кг/сут при значении водного стока  $> 2000$  м<sup>3</sup>/с.

#### Транспорт и осаждение металлов с наносами

В процессе транспорта металлов по речной сети происходит их осаждение на дно с наносами. На исследуемых участках речной сети количество осажденных металлов значительно различается. Результаты расчетов показывают, что есть участки, где осаждение металлов с наносами практически не происходит – количество осажденных металлов  $\leq 0.3\%$  среднееголетнего стока меди, цинка и марганца (реки Киги, Нугуш, Узян, Большой Ик, Яманелга, Бирь). Но имеются также участки, на которых количество осевших с наносами металлов превышает количество металлов, вымытых с частных водосборов данных участков, например нижнее течение р. Белой от г. Уфы до НКВ. Количество осевших на нем наносов достигает 140% среднееголетнего стока меди с водосбора участка, 120% стока цинка и 52% стока марганца. Ситуация объясняется тем, что на рассматриваемом участке нижнего течения р. Белой осаждаются и часть наносов, поступившая с расположенного выше по течению участка реки.

Среднееголетнее количество осевших на дно с наносами металлов коррелирует с водностью года: с увеличением водности года большее количество металлов транспортируется по речной сети и оседает с наносами. Однако в относительном выражении наблюдается обратная зависимость: в многоводные годы с наносами оседает меньшая часть, в маловодные годы – большая часть металлов, транспортируемых по речной сети (рис. 12).

#### Влияние генетической структуры водного и химического стока на содержание металлов в речных водах

Как показано в работах [11, 30, 31], пространственное распределение среднееголетних концентраций металлов в речных водах тесно коррелирует с пространственным распределением содержания металлов в почвогрунтах, и поэтому концентрации металлов в водотоках, расположенных в разных частях бассейна НКВ, существенно различаются. Выявлено также влияние генетической структуры речного стока на пространственное распределение концентраций металлов: больший вклад грунтовой составляющей водного и химического стока в восточной и юго-восточной частях бассейна, преобладание внутрипочвенной составляющей на большей оставшейся части бассейна и локальные островки территории с преобладанием поверхностной составляющей стока.

Расчеты показали, что увеличение водного стока сопровождается увеличением химического стока и концентраций металлов в речных водах: наибольшие годовые концентрации металлов, как правило, отмечаются в многоводные годы. Подобная картина наблюдается и при анализе

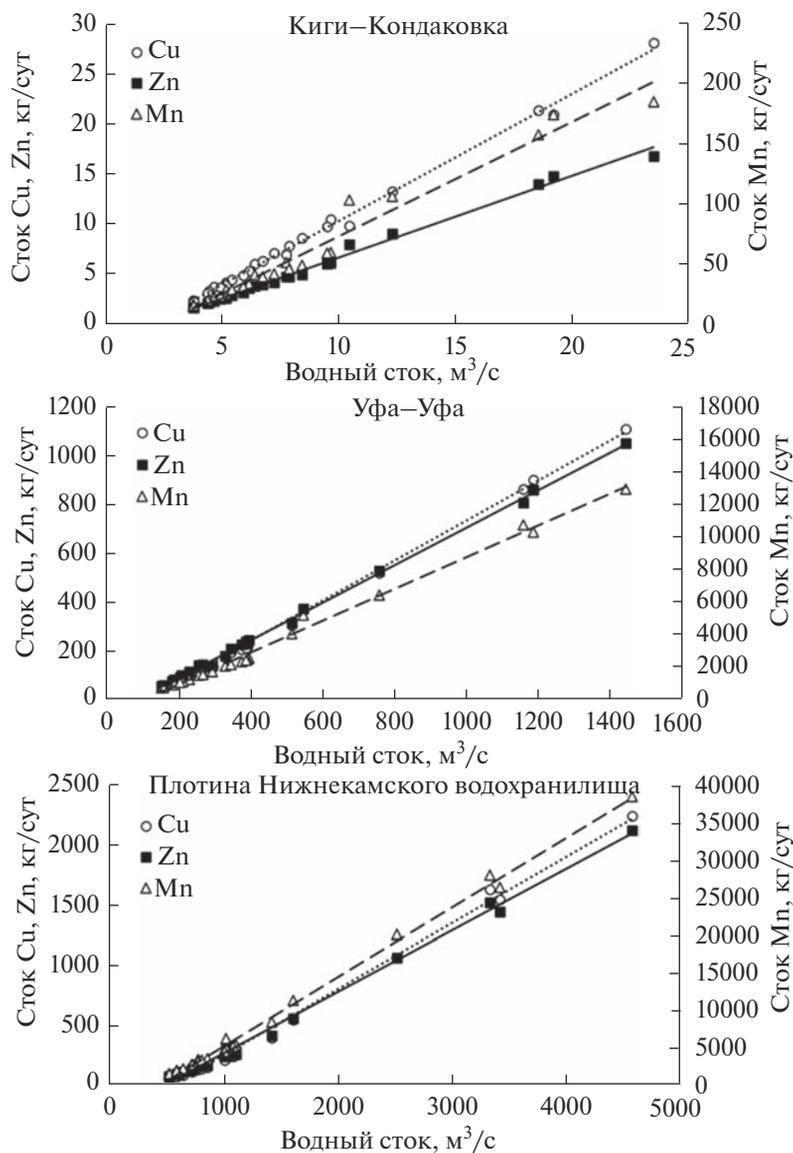


Рис. 10. Внутригодовая динамика химического стока Cu, Zn и Mn в замыкающих створах исследуемых участков в бассейне НКВ при изменении водного стока.

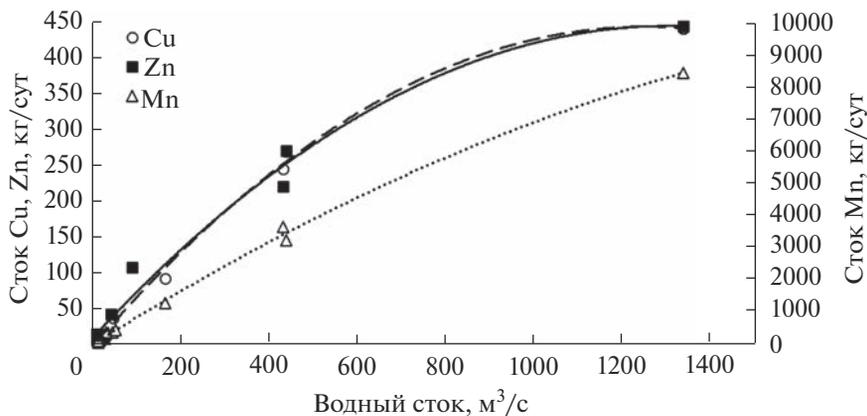


Рис. 11. Динамика среднееголетнего химического стока Cu, Zn и Mn в замыкающих створах всех исследуемых участков в бассейне НКВ при изменении водного стока.

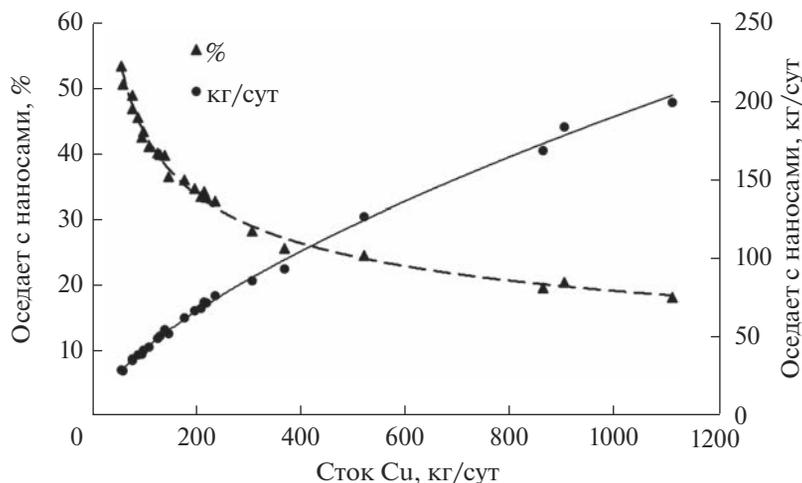


Рис. 12. Осаждение Cu с наносами на участке от истока р. Уфы до г. Уфы в абсолютном и относительном выражении.

внутригодовых изменений содержания металлов в речных водах: на подавляющем большинстве исследуемых участков максимальные концентрации металлов отмечаются во втором квартале года (период весеннего половодья) (табл. 5).

Для более детального анализа влияния генетической структуры водного и химического стока на изменения содержания металлов в речных водах в качестве примера на рис. 13 приведены графики расщепленных суточных значений генетических составляющих и концентраций цинка за многолетний период на трех участках: Большой

Авзян–Нижний Авзян со значительной долей грунтовой составляющей водного и химического стока (рис. 13а); Уфа–Уфа с преобладанием почвенной составляющей стока (рис. 13б); Чермасан–Чермасан со значительной долей (~40%) поверхностной составляющей в водном и химическом стоке (рис. 13в). Из графиков видно, что наибольшей внутригодовой и межгодовой изменчивостью концентраций цинка характеризуется участок со значительной долей поверхностной составляющей, наименьшей изменчивостью – участок с преобладанием грунтовой составляющей.

Таблица 5. Внутригодовые изменения содержания ТМ в бассейне НКВ на гидрохимических постах, мкг/л

Пост	Среднеголетняя концентрация за квартал				Пост	Среднеголетняя концентрация за квартал				Пост	Среднеголетняя концентрация за квартал			
	I	II	III	IV		I	II	III	IV		I	II	III	IV
	Cu					Zn					Mn			
Киги–Кондаковка	9.1	12.4	11.3	10.1	Большой Авзян–Нижний Авзян	11.3	11.6	11.8	11.7	Уршак–Булгаково	134	175	151	135
Ай–Лаклы	8.2	9.4	8.6	8.6	Нугуш–Новосейтово	9.6	13.6	10.4	10.4	Большой Авзян–Нижний Авзян	94.4	100	98.8	97.5
Нугуш–Новосейтово	5.0	7.6	5.5	5.4	Белая–Ишимбай	6.1	8.6	6.7	6.4	Уфа–Уфа	60.8	93.4	70.9	64.8
Белая–Мелеуз	4.4	6.5	4.7	4.6	Ай–Лаклы	4.2	4.7	4.4	4.4	Дема–Дюсяново	47.2	77.5	52.8	48.1
Дема–Дюсяново	2.6	4.8	3.0	2.7	Мияки–Мияки-Тамак	3.0	4.2	3.2	3.1	Киги–Кондаковка	28.2	50.8	34.0	31.8

В первом случае резкие флуктуации концентраций цинка обусловлены поверхностным смывом металлов в речную сеть с водосбора в периоды обильных осадков и весеннего половодья (в том числе и с наносами). Во втором случае гораздо более стабильное содержание цинка в грунтовых водах при их преобладании в водном стоке сглаживает дополнительное поступление металлов от почвенной и поверхностной составляющих речного стока вследствие их незначительного вклада. Аналогичная картина наблюдается и по другим металлам (медь, марганец).

Таким образом, установлено, что генетическая структура водного и химического стока оказывает влияние на внутригодовые и межгодовые изменения содержания металлов в речных водах. Временной ход динамики концентраций металлов на водосборах с преобладанием грунтовой составляющей в целом плавный в ограниченном диапазоне изменения концентраций вне зависимости от водности и времени года лишь с незначительным увеличением в периоды половодья. Преобладание поверхностной или почвенной составляющих приводит к высокой изменчивости концентраций и резким их пикам, в особенности в периоды формирования поверхностного стока.

## ВЫВОДЫ

Продемонстрированы возможности модели ЕСОМАГ-НМ для исследования формирования генетических составляющих водного и химического стока меди, цинка и марганца в крупном речном бассейне Нижнекамского водохранилища.

Испытания модели проводились по данным гидрологического и гидрохимического мониторинга на водосборе с использованием информации о подземной составляющей водного стока р. Белой, определенной с помощью графического расчленения гидрографа по видам питания по методу Б.И. Куделина [8] по алгоритму GRWAT [14]. В результате учета количественного соотношения генетических составляющих водного и химического стока при моделировании формирования содержания металлов в речной сети получены более высокие значения коэффициентов корреляции между рассчитанными и измеренными концентрациями, чем опубликованные ранее [11, 30, 31].

На основе результатов моделирования определены количественные оценки поверхностной, почвенной и грунтовой составляющих водного и химического стока на 20-ти выделенных частных водосборах в бассейне НКВ. Почвенная составляющая преобладает на большинстве исследуемых участков и составляет от 28 до 63% годового водного стока, от 38 до 84% годового стока металлов. Грунтовая составляющая преобладает лишь

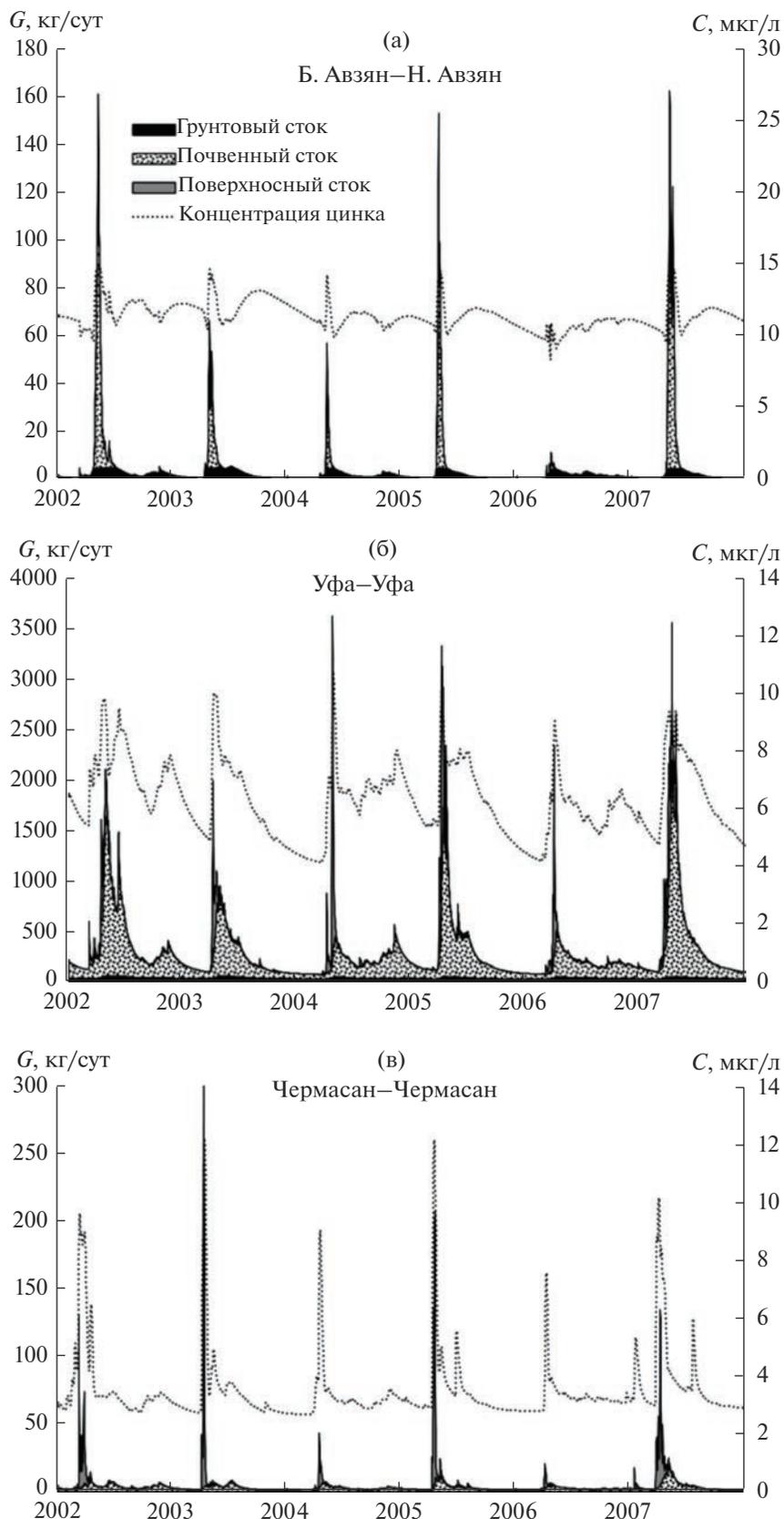
на нескольких участках рек, протекающих в восточной и юго-восточной предгорной и горной частях бассейна НКВ. Поверхностная составляющая в целом составляет незначительную часть (от 5 до 25%) годового водного стока и более существенную часть (от 5 до 47%) стока металлов.

Отмечены значительные различия соотношений между генетическими составляющими водного и химического стока на одних и тех же исследуемых участках в разные по водности годы. Установлено, что доля грунтовой составляющей повышается в маловодные годы и снижается в многоводные, почвенная составляющая в многоводные годы повышается и снижается в маловодные. Сезонные изменения генетических составляющих водного и химического стока характеризуются максимальными значениями во втором квартале, когда через исследуемые участки протекает от 43 до 70% годового водного стока, а кратность повышения стока металлов относительно остальных сезонов может достигать ~15 раз.

Установлены нелинейные связи между среднемноголетними значениями водного стока и стока металлов в замыкающих створах всех исследуемых участков, показывающие, что при больших значениях водного стока химический сток асимптотически приближается к постоянному значению, что, по-видимому, определяется максимальной обменной емкостью водосбора при выщелачивании металлов из почвенно-грунтовой толщи и выносе их в речную сеть.

Расчеты показали, что существенное влияние на формирование химического стока оказывает осаждение металлов в процессе их транспорта по речной сети. При этом доля металлов, осевших с наносами, повышается в маловодные годы по сравнению с многоводными. В среднем за исследуемый многолетний период при трансформации водных масс по речной сети к створу плотины НКВ осаждаются ~46% меди и цинка, ~21% марганца, вымываемых с водосбора. Если бы не происходило оседания металлов с наносами, то среднемноголетний сток меди и цинка превышал бы фактический в 1.9 раза, сток марганца – в 1.3 раза.

Расчеты показали, что увеличение водного и химического стока сопровождается увеличением концентраций металлов в речных водах. На подавляющем большинстве исследуемых участков наибольшие средние концентрации металлов отмечаются в многоводные годы и во втором квартале (в период весеннего половодья). Установлено, что генетическая структура водного и химического стока влияет на внутригодовые и межгодовые изменения содержания металлов в речной воде. Наибольшей внутригодовой и межгодовой изменчивостью концентраций металлов характеризуются участки со значительной долей поверхностной составляющей, наименьшей из-



**Рис. 13.** Динамика генетических составляющих химического стока  $G$  и концентраций  $C$  Zn в створах исследуемых участков.

менчивостью – участки с преобладанием грунтовой составляющей стока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бэфани А.Н.* Теоретическое обоснование методов исследования и расчета паводочного стока рек Дальнего Востока // Тр. ДВНИГМИ. 1966. Вып. 22. С. 124–215.
2. *Блоков И.П.* Окружающая среда и ее охрана в России. Изменения за 25 лет. М.: Совет Гринпис, 2018. 432 с.
3. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 304 с.
4. Государственные доклады о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2006–2017 годах. Уфа, 2007–2018.
5. *Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шаповов В.В.* Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 4. С. 387–399.
6. *Даценко Ю.С.* Особенности формирования речного стока марганца и железа в периоды половодья // Вода: химия и экология. 2018. № 4–6. С. 3–6.
7. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор–водоток–водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.
8. *Куделин Б.И.* Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1960. 344 с.
9. *Кучмент Л.С.* Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М.: ИВП РАН, 2008. 394 с.
10. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
11. *Мотовилов Ю.Г., Фашчевская Т.Б.* Пространственно-распределенная модель формирования стока тяжелых металлов в речном бассейне // Вода: химия и экология. 2018. № 1–3. С. 18–31.
12. Правила использования водных ресурсов Нижнекамского водохранилища на р. Каме. М.: Росводресурсы, 2014. 131 с.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 848 с.
14. *Рец Е.П., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е., Езерова Н.Н., Горбаренко А.В., Фролова Н.Л.* Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина GRWAT: проблемы и перспективы // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 1. С. 27–42.
15. *Селезнева А.В.* Антропогенная нагрузка на реки от точечных источников загрязнения // Изв. Самарского НЦ РАН. 2003. Т. 5. № 2. С. 268–277.
16. СН 435-72. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 20 с.
17. *Сучкова К.В., Мотовилов Ю.Г., Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Ерина О.Н., Соколов Д.И.* Моделирование генетических составляющих речного стока с использованием гидрохимического способа идентификации водных масс // Вода: химия и экология. 2019. № 1–2. С. 46–56.
18. *Фашчевская Т.Б., Красногорская Н.Н., Рогозина Т.А.* О воздействии предприятия “Уфаводоканал” на качество воды реки Белой // Материалы междунауч. конф. “Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон”. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2006. С. 80–82.
19. *Фашчевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Шадиянова Н.Б.* Природные и антропогенные изменения содержания железа, меди и цинка в водотоках Республики Башкортостан // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 603–617.
20. *Щербаков Б.Я., Чиликин А.Я., Ижевский В.С.* Залповые сбросы производственных сточных вод и их последствия // Экология и пром-сть России. 2002. № 6. С. 39–41.
21. *Эдельштейн К.К.* Структурная гидрология суши. М.: ГЕОС, 2005. 316 с.
22. *Эдельштейн К.К., Смахтина О.Ю.* Генетическая структура речного стока и химико-статистический метод выделения ее элементов // Вод. ресурсы. 1991. № 5. С. 5–20.
23. *Barlow P.M., Cunnigham W.L., Zhai T., Gray M.* U.S. Geological Survey Groundwater Toolbox, A Graphical and Mapping Interface for Analysis of Hydrologic Data (Version 1.0) – User Guide for Estimation of Base Flow, Runoff, and Groundwater Recharge From Streamflow Data: Techniques and Methods. Book 3. Chapter B10. Reston, Virginia, U.S.: Geological Survey, 2015. 40 p.
24. *Beven K.* How far can we go in distributed hydrological modelling? // Hydrol. Earth System Sci. 2001. V. 5 Iss. 1. P. 1–12.
25. *Eckhardt K.* A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods // J. Hydrol. 2008. 352 (1). P. 168–173.
26. *Kirchner J.W.* Quantifying new water fractions and transit time distributions using ensemble hydrograph separation: theory and benchmark tests // Hydrol. Earth System Sci. 2019. 23 (1). P. 303–349.
27. *Klaus J., McDonnell J.J.* Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation // J. Hydrol. 2013. V. 505. P. 47–64.
28. *McDonnell J.J., Beven K.* Debates on Water Resources: The future of hydrological sciences: A (common) path forward? A call to action aimed at understanding velocities, celerities and residence time distributions of the headwater hydrograph // Water Resour. Res. 2014. V. 50 (6). P. 5342–5350.
29. *Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Transactions of the ASABE. 2007. V. 50 (3). P. 885–900.
30. *Motovilov Y., Fashchevskaya T.* Modeling Management and Climate Change Impacts on Water Pollution by Heavy Metals in the Nizhnekamskoe Reservoir Watershed // Water. 2021. V. 13 (22). 3214. 21 p.
31. *Motovilov Y.G., Fashchevskaya T.B.* Simulation of spatially-distributed copper pollution in a large river basin using the ECOMAG-HM model // Hydrol. Sci. J. 2019. V. 64. P. 739–756.
32. *Sivapalan M., Blöschl G.* The Growth of Hydrological Understanding: Technologies, Ideas, and Societal Needs Shape the Field // Water Resour. Res. 2017. V. 53. P. 8137–8146.