

УДК 551.16:502.51

## ДИФфуЗНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РАВНИННЫХ ТЕРРИТОРИЙ: ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ

© 2023 г. С. В. Ясинский<sup>а</sup>, \*, Е. А. Кашутина<sup>а</sup>, \*\*, М. В. Сидорова<sup>а</sup>, \*\*\*

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: yasinski@igras.ru

\*\*e-mail: kashutina@igras.ru

\*\*\*e-mail: sidorova@igras.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 29.08.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Представлен обзор современных представлений о сущности и специфике диффузного (рассеянно-го) загрязнения водных объектов. Формирование, перемещение и трансформация водных потоков, образующихся на водосборах в периоды снеготаяния и выпадения интенсивных дождевых осадков, насыщенных растворенными и взвешенными веществами, – сложный многомерный процесс, распределенный по территории водосбора. Основными факторами формирования диффузного загрязнения водных объектов является взаимодействие комплекса гидрологических и геохимических процессов, зависящих от климатических особенностей территории и структуры использования земель на водосборах. Развитие химической промышленности и биотехнологий привело к поступлению в природную среду новых, чужеродных для биоты загрязнителей, требующих новых способов контроля и очистки источников диффузного и точечного загрязнения. В городах проблема диффузного загрязнения водных объектов широким спектром загрязняющих веществ стоит наиболее остро. Отмечено, что диффузное загрязнение водных объектов не регистрируется и не регулируется государственными водохозяйственными или природоохранными ведомствами. Это связано с неопределенностью “потребителя” диффузного стока, сложностью его мониторинга, непониманием его ключевой роли в загрязнении водных объектов из-за недостаточной изученности проблемы. Необходимо современная научно обоснованная сеть мониторинга диффузного стока. Выполнен обзор моделей, разработанных как в России, так и за рубежом, используемых для расчета выноса загрязняющих веществ в водные объекты с использованием ГИС-технологий и развитых баз данных. Отмечена несбалансированность степени разработки блоков, описывающих перенос воды, наносов и химических веществ. Приведены примеры работ Института географии РАН по программе “Оздоровление Волги” в области моделирования диффузного загрязнения в бассейне Чебоксарского водохранилища.

*Ключевые слова:* диффузное загрязнение, малые реки, городская водная среда, моделирование, миграционные формы загрязняющих веществ, перенос загрязнений с микрочастицами, ксенобиотики

DOI: 10.31857/S258755662301017X, EDN: LVDCSQ

Одной из наименее изученных проблем в гидрологии, водном хозяйстве и в целом – науках о Земле является описание и формализация процессов формирования диффузного (рассеянного и никем не контролируемого) загрязнения водных объектов (Диффузное ..., 2020; Фашевская и др., 2020б; Ясинский и др., 2019). Именно с ним связывают отсутствие кардинального улучшения состояния водных объектов после значительного сокращения поступления загрязняющих веществ (ЗВ) со сточными водами предприятий (фиксируемое государственной водохозяйственной статистикой так называемое точечное загрязнение) в результате спада промышленного производства в 1990-х годах в России. В мире в зависимости от

степени очистки сбросов от точечных источников, с диффузным загрязнением связано до 60 и более процентов поступления ЗВ в водные объекты (Диффузное ..., 2020). В России первое научное обобщение российских работ по проблемам диффузного загрязнения – выявление его роли, определение источников, разработка концепции по его предотвращению – были выполнены в 2018–2019 гг. в рамках государственной программы “Оздоровление Волги” ведущими научными организациями страны под руководством Института водных проблем РАН (Диффузное ..., 2020).

*Что такое диффузное загрязнение и как оно формируется?* Круговорот веществ в природе –

неотъемлемый атрибут существования жизни на Земле. Антропогенное воздействие приводит к нарушению процессов переноса вещества на глобальном, региональном или локальном уровнях в зависимости от мощности, типа и времени существования источников загрязнения. Загрязнение может быть не только привнесенным человеком извне (например, внос удобрений на поля, отходы производств, свалки), но и внутренним, связанным с нарушением ранее “законсервированных”, природных источников (например, в процессе добычи полезных ископаемых). Кроме традиционных, характерных для природы загрязнителей (например, биогенов – соединений фосфора, азота, калия) в результате бурного развития химической промышленности и биотехнологий появились загрязняющие вещества, не характерные и чужеродные для природы, не участвующие в естественном биотическом круговороте (ксенобиотики). К ним относятся, пластики и микропластики, большинство лекарств, пестициды, нефтепродукты. Для ряда этих соединений непонятны пути их перемещения и фазы их состояния в водных объектах (в растворенном виде, в частицах или с частицами наносов разной крупности), способность реагировать с другими веществами во внешней среде, их биодоступность. Для многих веществ не разработаны допустимые нормативы присутствия в водных объектах, нет экономически доступных технологий очистки от них питьевой и сточных вод.

На Русской равнине, да и в других регионах России практически не осталось территорий, не преобразованных той или иной хозяйственной деятельностью. А перенос ЗВ от антропогенных источников по воздуху и сухое и влажное (с осадками) их осаждение из атмосферы затрагивает практически всю поверхность Земли. В периоды весеннего снеготаяния и выпадения обильных осадков в теплый период года на водосборах рек, озер, водохранилищ формируются потоки воды, насыщенные растворенными и взвешенными ЗВ, которые через гидрографическую сеть поступают в водные объекты и в значительной степени обуславливают качество воды в них и их экологическое состояние.

**Мониторинг диффузного загрязнения.** В отличие от водных ресурсов, аккумулированных в водных объектах, потоки воды и других веществ в разных формах, образующиеся на водосборах, не регистрируются и не регулируются ни одним государственным водохозяйственным или природоохранным ведомством. Недостаточное внимание к этому виду водных ресурсов со стороны государственных органов управления обусловлено в первую очередь неопределенностью “потребителя” этих водных ресурсов, их рассредоточенностью и дискретностью в пространстве и во времени, что определяет трудности организации мони-

торинга. Формирование и перемещение водных потоков, образующихся на водосборах в периоды снеготаяния и выпадения интенсивных дождевых осадков, насыщенных растворенными и взвешенными веществами, – процесс, распределенный по территории водосбора. Он охватывает неоднородную по вертикали толщу почвогрунтов (Долгов, Коронкевич, 2010), от поверхности склонов до подземных вод, в зависимости от глубины дренирования водным объектом. Число действующих горизонтов в формировании стока веществ с водосбора определяется геологическим и геоморфологическим строением территории, особенностями ее почвенно-растительного покрова, метеоусловиями сезона, а также антропогенными трансформациями территории, приводящими к изменениям естественных путей стока воды и вещества с водосбора. К последнему фактору относятся: распашка и мелиорация земель, в том числе лесомелиорация; орошение; создание непроницаемых поверхностей: дорог, крыш, промышленных площадок; создание ливневой канализации, ускоряющей сток с водосбора; прокладка туннелей; добыча полезных ископаемых шахтным и карьерным методами и пр. На каждом из уровней процесс формирования стока неоднороден в пространстве и во времени.

Наблюдения за отдельными стадиями процесса формирования и трансформации стока воды и других веществ в различных природных и антропогенных условиях были важной задачей сети воднобалансовых станций и специализированных стационаров, входящих в структуры Гидрометслужбы СССР, министерства мелиорации и водного хозяйства, сельского хозяйства, лесной промышленности, но, к сожалению, разрушенной за последние десятилетия. Многие частные процессы, в основном связанные с переносом воды, были изучены достаточно подробно. Сейчас возникла настоятельная необходимость восстановления сети мониторинга гидролого-геохимических процессов на современном уровне, с использованием в том числе автоматизированного оборудования, способного регистрировать параметры среды с высокой степенью дискретности. В России серьезный опыт подобных комплексных работ был реализован на Дальнем Востоке (Гарцман, Шапов, 2015).

В самых общих чертах *процесс формирования диффузного загрязнения на водосборах* включает в себя следующие этапы: 1. Формирование поверхностного склонового, внутрипочвенного и подземного стока. 2. Эрозия почвы как следствие размыва верхних ее слоев талым и/или дождевым склоновым стоком. 3. Насыщение потоков воды ЗВ, содержащимися в снежном покрове, осадках, растительном покрове, в почве и грунтах, и их адсорбции на частицах смытых наносов. 4. Трансформация потоков веществ водосбором за счет

физических, химических и биологических процессов.

**Факторы формирования диффузного загрязнения.** Гидролого-геохимические процессы на водосборах зависят от многих факторов. Наиболее важными из них являются метеорологические условия, такие как высота снежного покрова и запасы воды в нем на начало снеготаяния, интенсивность снеготаяния и выпадения жидких осадков. Значения этих параметров не остаются постоянными. В результате глобальных и региональных изменений климата во многих регионах России в последние десятилетия произошли существенные изменения структуры гидрологического цикла водосборов (Джамалов и др., 2015; Фролов, Георгиевский, 2018). В зимний период в результате повышения температуры воздуха в ряде регионов уменьшились величина запасов воды в снеге и глубина промерзания почвы, соответственно увеличились водопроницаемость мерзлой почвы и объем впитавшейся за период снеготаяния воды. В период весеннего снеготаяния значительно уменьшилась величина поверхностного весеннего склонового стока, а следовательно, выноса ЗВ талым стоком и со смывтой почвой, а также весеннего половодья на реках. Вместе с тем резко увеличился подземный сток и вынос с ним растворенных веществ (Долгов и др., 2021). Поэтому не учитывать влияние климатических изменений на формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах крупных водных объектов уже нельзя.

Другим, не менее важным фактором, обуславливающим динамику и интенсивность этих процессов, является структура землепользования, сложившаяся на водосборах – площадь и расположение на водосборах угодий с разными видами подстилающей поверхности, являющихся источниками поступления ЗВ из верхних слоев почвы; за счет вноса удобрений, разведения скота, попадания на водосбор отходов человеческой жизнедеятельности, промышленного производства и др. Пространственная ландшафтная структура водосборов, т.е. соотношение разных видов подстилающей поверхности (лесов, полей, застройки, дорог и др.) не остается постоянной во времени. Меняется использование территории. В северных регионах России забрасываются и зарастают лесом населенные пункты и сельскохозяйственные поля. В благоприятных для земледелия регионах, например, в Курской области – противоположный процесс – распаивается все, вплоть до обочин дорог (собственные наблюдения авторов). Модифицируются агротехнологии, меняются виды и сорта выращиваемых культур. Появляются новые населенные пункты, промышленные, сельскохозяйственные, рекреационные и другие объекты. Во многих случаях, особенно в наиболее перспективных для сельского хозяйства районах,

а также в зонах санитарной охраны водных объектов это происходит за счет снижения площади лесов. Практически повсеместно на юге страны отмечена деградация защитных лесополос. Все это снижает степень устойчивости ландшафтов к росту антропогенных нагрузок и может приводить к увеличению объема потоков ЗВ в водные объекты, способствуя ухудшению качества воды в них. Опасность представляют поступление с водосбора соединений азота и фосфора – биогенных элементов (БЭ), в наибольшей степени ответственных за эвтрофирование водных объектов, особенно с замедленным водообменом, таких как водохранилища (Yasinsky et al., 2020). В то же время не весь объем ЗВ, формирующийся на водосборе диффузным путем, достигает русел и замыкающих створов рек поступает в водохранилища (Голосов, 2003; Литвин, 1998; Behrendt and Opiz, 1999). Значительная его часть регулируется и удерживается самим водосбором и различными звеньями гидрографической сети (оврагами, балками, поймами и др.). Однако разработанные методы оценки величины притока ЗВ в водный объект недостаточно учитывают это явление (Кондратьев, Шмакова, 2019). Изменение сложившейся структуры землепользования может привести как к усилению, так и сокращению потоков ЗВ, поступающих с водосбора. Это повлечет за собой изменение качества воды и трансформацию водных масс водоемов-приемников в зависимости от сезонов года и морфометрических характеристик принимающих сток водных объектов. Поэтому важна оценка процессов переноса ЗВ при различных сценариях землепользования. Это позволит выбрать оптимальные варианты социально-экономического развития территорий водосборов с учетом возрастающих требований к состоянию окружающей среды, в том числе и водных ресурсов.

#### **Особенности диффузного загрязнения в городах.**

Наиболее остро проблема оценки объема и состава ЗВ при диффузном загрязнении водных объектов стоит для урбанизированных территорий России. Это вызвано отсутствием геоэкологического мониторинга даже в крупных городах страны.

Проблема оценки влияния урбанизированных территорий на гидрологический и гидрохимический режимы водных объектов возникла сначала за рубежом в 1970-е годы, а выполненные к тому времени работы были впервые обобщены в (Куприянов, 1977). Для ряда городов (Москвы, Курска, Твери и других) был выполнен большой объем экспериментальных исследований, посвященных оценкам водного баланса, его структуры и вещественного обмена для различных типов подстилающей поверхности, образующих территорию городов (Гордин, Кирпичникова, 1993; Китаев, 1993, 1995; Коронкевич, Мельник, 2015; Львович, Чернышев, 1983; Черногаева, 1976). За

рубежом исследования в области гидрологии урбанизированных территорий были направлены в целом на разработку математических моделей процессов, формирующихся и протекающих на городских территориях (Михайлов, 2000).

Последствия современной урбанизации оказывают существенное влияние на изменение структуры гидрологического и геохимических циклов водосборов водных объектов. Именно для территорий городов характерен самый значительный антропогенный прессинг на все компоненты окружающей среды, определяющий как степень трансформации их физических свойств, так и объемы и расширенную, по сравнению с неурбанизированными территориями, номенклатуру ЗВ (Дрюпина и др., 2014; Зиновьев и др., 2019; Михайлов, 2000). Рост площади городов и расположенных вокруг них дачных и коттеджных поселков приводит к увеличению площади водонепроницаемых участков (дорог, крыш). Растет доля слабоводонепроницаемых участков — например, почвы скверов и городских газонов значительно отличаются по водонепроницаемости и уровню загрязнения от неурбанизированных территорий. В целом в городах существенно снижаются инфильтрационные свойства почвы, что, как следствие, приводит к увеличению слоя поверхностного склонового стока и выносу значительного количества различных ЗВ в водные объекты как в период весеннего половодья, так и во время выпадения сильных дождей в теплый период года.

Несмотря на то, что в каждом крупном городе организована ливневая канализация, талые и дождевые воды, сформированные на территории городов, насыщенные взвесью растворенных и взвешенных химических веществ, без очистки поступают в водные объекты. Ситуация осложняется состоянием ливневой канализации. Далеко не всегда городские службы способны на ее очистку, необходимый ремонт и замену, что приводит к утечкам в подземные воды, подтоплениям и загрязнению ливневого стока. Удачные исключения редки. Например, в Москве убранный снег на пунктах снеготаяния смешивается с теплыми сточными водами ЖКХ и в дальнейшем поступает на городские очистные сооружения. В других крупных городах, расположенных в бассейне Волги, сток из ливневой канализации напрямую, практически без очистки, поступает в малые реки городов и со стоком этих рек в водохранилища Волжско-Камского каскада. Ни объемы этого стока, ни массы выноса ЗВ в разные по водности годы, ни их влияние на качество воды рек и водохранилищ, принимающих сток от городских источников загрязнения — неизвестны в связи с практически полным отсутствием гидрологических постов и данных о показателях химического состава воды городских водных объектов. Неизвестна также *роль* в загрязнении водных объ-

ектов *микрочастиц*, в том числе микропластика, обладающих высокой способностью к адсорбции и *переносу ЗВ* из-за большой удельной площади поверхности.

Между тем проектирование очистных сооружений и планирование водо- и природоохранных мероприятий на территории города напрямую зависит от точных оценок вида и общего объема выноса, в том числе микрочастицами, ЗВ с поверхностным склоновым стоком в периоды оттепелей в зимний период, весеннего снеготаяния и в результате выпадения дождевых осадков в теплый период года (Рекомендации ..., 2014). Кроме того, такая информация необходима для оценки вклада точечных и диффузных источников в формирование качества воды водохранилищ — источников водоснабжения населения и различных отраслей хозяйства. Интересные результаты были получены с участием авторов в 2020–2021 гг. в рамках программы РФФИ “Микромир” на территории Нижнего Новгорода. Впервые для малых рек и подземных вод крупного города получены оценки вклада микрочастиц в перенос веществ с территории города. В период летне-осенней межени 2020 г. не менее половины суммарного переноса приоритетных для Нижнего Новгорода ЗВ (нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ, железа, марганца) осуществляется взвесями. В устьях городских рек примерно четверть интегрального потока связана с переносом микрочастицами размера 0.22–2 мкм (для железа — около трети). Вниз по течению к устьям рек уменьшается доля переноса ЗВ частицами более 2 мкм и увеличивается доля переноса частицами в диапазоне 0.22–2 мкм. Получены *предварительные выводы о значительной загрязненности всех городских водных сред, включая подземные воды, частицами микропластика*. Загрязнение подземных вод авторы связывают с возможными утечками из ливневой канализации и канализации ЖКХ сточных вод от стиральных машин, с автомоек, с дорог (Ясинский и др., 2021).

Отсутствие современного гидролого-геохимического мониторинга в городах не позволяет научно-обоснованно управлять городским хозяйством, в том числе в наиболее сложный зимне-весенний период года, реализовывать природоохранную политику для улучшения качества окружающей среды и жизни населения в городах. Такой мониторинг должен включать контроль метеорологического режима в разных частях крупного города, гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов малых рек, озер и других водных объектов в черте города, периодический анализ проб почвы и растительности для определения степени накопления в них вредных веществ, осуществлять постоянные наблюдения за снежным покровом и его химическим составом — как источником пополнения водой и загрязнения вод-

ных объектов городов и водоемов, куда стекают воды, формирующиеся на территории урбанизированных территорий в весенний период. Важным этапом такого мониторинга является организация сбора, хранения, обработки, анализа и обобщения полученных данных, наиболее перспективным методом которого является создание региональных ГИС.

*Разработка расчетных методик, моделирование процессов диффузного стока*

К настоящему времени разработано большое число динамических и динамико-стохастических моделей, достаточно полно и с высокой точностью описывающих процессы формирования гидрологических процессов, в том числе и различных видов стока на водосборах (Гусев, Насонова, 2010; Кондратьев, Шмакова, 2019; Мотовилов, Гельфан, 2018; Ясинский, Гусев, 2003 и др.). Что касается эрозии почвы, то наиболее известное универсальное уравнение эрозии почвы (USLE) и его модификации применимы только для оценки средней многолетней величины дождевой эрозии (Чалов, 2021). Дождевой склоновый сток в летний период возникает достаточно редко, в основном на площади гидрографической сети, хотя, конечно, при выпадении сильных осадков, склоновая эрозия особенно в южных районах страны, может быть весьма значительной. Современные модели водной эрозии почвы представляют собой дальнейшее развитие гидромеханического подхода к этому процессу. Модель дождевой эрозии и за период снеготаяния описывает эрозию почвы как случайный процесс за многолетний период. Рассчитывается сток воды, отрыв и перенос потоком воды почвенных частиц для однородного склона с произвольным профилем, т.е. с постоянными (одинаковыми) почвенными параметрами вдоль склона, растительным покровом и противоэрозионными приемами (Сухановский, 2009). Однако эти модели, позволяющие оценивать эрозию почвы за многолетний период, достаточно сложные и также требуют наличия специфической информации об объекте исследования. Поэтому вопрос их применимости в задачах оценки эрозии почвы при расчетах характеристик выноса ЗВ с водосбора требует дополнительных специальных исследований и разработки модели этого процесса, адекватно отражающей его сущность. В этой связи в настоящее время предпочтение отдается хорошо известным эмпирическим зависимостям  $\Theta = f(Y)$ , где  $\Theta$  – слой смытой почвы (мм);  $Y$  – слой стока (мм) (Бобровицкая, 1977; Ясинский и др., 2007).

Что касается оценки концентрации биогенных элементов в склоновом стоке и в смытой водными потоками почве, то одна из первых таких методик их расчета для сельскохозяйственных по-

лей была разработана еще в середине 80-х годов прошлого века в СССР (Чуян и др., 1985). Практическое применение этой методики было сделано при использовании физико-математической модели, позволяющей рассчитывать вынос биогенных элементов (N, P и K, кг) с поверхностным жидким стоком и стоком наносов с водосбора р. Велесы (бассейн Западной Двины) в зависимости от уклона склонов и других геоморфологических характеристик (Назаров, 1993; Назаров, Леонов, 1999).

В последние годы во всем мире выполнено много исследований, посвященных разработке моделей и аппаратных программных систем для расчета выноса ЗВ с водосбора, при решении разнообразных задач, детальные обзоры которых приведены в (Михайлов, 2000; Кондратьев, Шмакова, 2019; Li, 2014). Одной из последних моделей выноса биогенных элементов, разработанных за рубежом, является модель SWAT, предназначенная для Службы сельскохозяйственных исследований США и используемая в 13 европейских странах (Arheimer and Olson, 2003). Это физико-математическая модель с полу-распределенными параметрами, предназначенная для оценки выноса биогенных элементов со всего водосбора. Для расчета стока биогенных элементов в SWAT используются эмпирические зависимости между расходом воды, стоком наносов и концентрациями химических элементов. В наиболее полной динамико-стохастической модели Института озераведения РАН (IL\_LM) для оценки значений концентрации биогенных элементов (общего азота и общего фосфора) используются результаты натурных исследований по содержанию растворенных примесей в почвенной воде или первичной ручейковой сети (Кондратьев, Шмакова, 2019). Для оценки выноса биогенных элементов, адсорбированных на частицах смытых наносов, используется изотерма Фрейндлиха и ее модификации (Фашевская и др., 2020a).

Вынос ЗВ с *городской территории* во многом обусловлен процессом их накопления между выпадением стокоформирующих ливневых осадков. Чем больше времени прошло с момента выпадения последних осадков, тем больше пыли, мусора и связанных с ними ЗВ аккумулируется на улицах, тротуарах и крышах домов. Для описания названных процессов предложен *модельный подход*, получивший название *“накопление/смыв”* (*“Build-up/Washoff”*), согласно которому на урбанизированной (селитебной) территории накопление ЗВ происходит пропорционально времени, отделяющему момент расчета от последнего стокового события (Chen and Adams, 2006; Gander, 2007; Shaw et al., 2010; Wang et al., 2011). *“Накопление”* в моделях такого типа является интегрированной характеристикой и подразумевает все разнообразие процессов, происходящих на территории во

время сухой погоды, включая уборку улиц. Из-за невозможности физического обоснования модели накопления она, как правило, имеет эмпирическую основу. Возможности блока модели “смыв” гораздо шире. Здесь может использоваться практически весь арсенал гидрологических моделей — от эмпирических до физико-математических. Концепция “накопление/смыв” нашла свое воплощение в известной оригинальной версии компьютерной модели SWMM (Gironás et al., 2009; реализация в России — (Болгов и др., 2003, 2020)).

Модели типа “накопление/смыв” стали использоваться при решении задач моделирования качества воды урбанизированных территорий с конца семидесятых годов прошлого века. Со временем акценты развития рассматриваемого научного направления и совершенствования соответствующего математического аппарата сместились в сторону создания масштабных модельных ГИС-ориентированных комплексов для решения инженерных задач водоотведения с городских территории. Крупнейшей европейской разработкой в указанном направлении является модель MIKE URBAN, входящая в семейство моделей MIKE<sup>1</sup>. Основное предназначение MIKE URBAN — гидравлический расчет сетей водоснабжения и водоотведения. В США эти функции выполняют модели StormCAD, FlowMaster и HAMMER, входящие в комплекс моделирования и эксплуатации наружных сетей водоснабжения и канализации Bentley Systems<sup>2</sup>. Есть опыт внедрения в отечественную практику перечисленных зарубежных инженерных моделей водоотведения с территории крупных городов (Борисов, 2009). Однако в целом применение математических моделей для этих целей в России ограничено единичными примерами, несмотря на то что моделирование качества воды урбанизированных водосборов развивается уже более 50 лет (American ..., 1969; Avellaneda et al., 2009; Sutherland and McCuen, 1978; Terstriep et al., 1990).

#### *Концептуальные трудности моделирования диффузного загрязнения*

К сожалению, в советских и российских исследованиях практически не было комплексных экспериментальных работ, посвященных разным аспектам формирования диффузного загрязнения. Речным и в меньшей степени поверхностным склоновым стоком занимались гидрологи, процессами эрозии — геоморфологи и эрозиоведы, химическим стоком — геохимики разных направ-

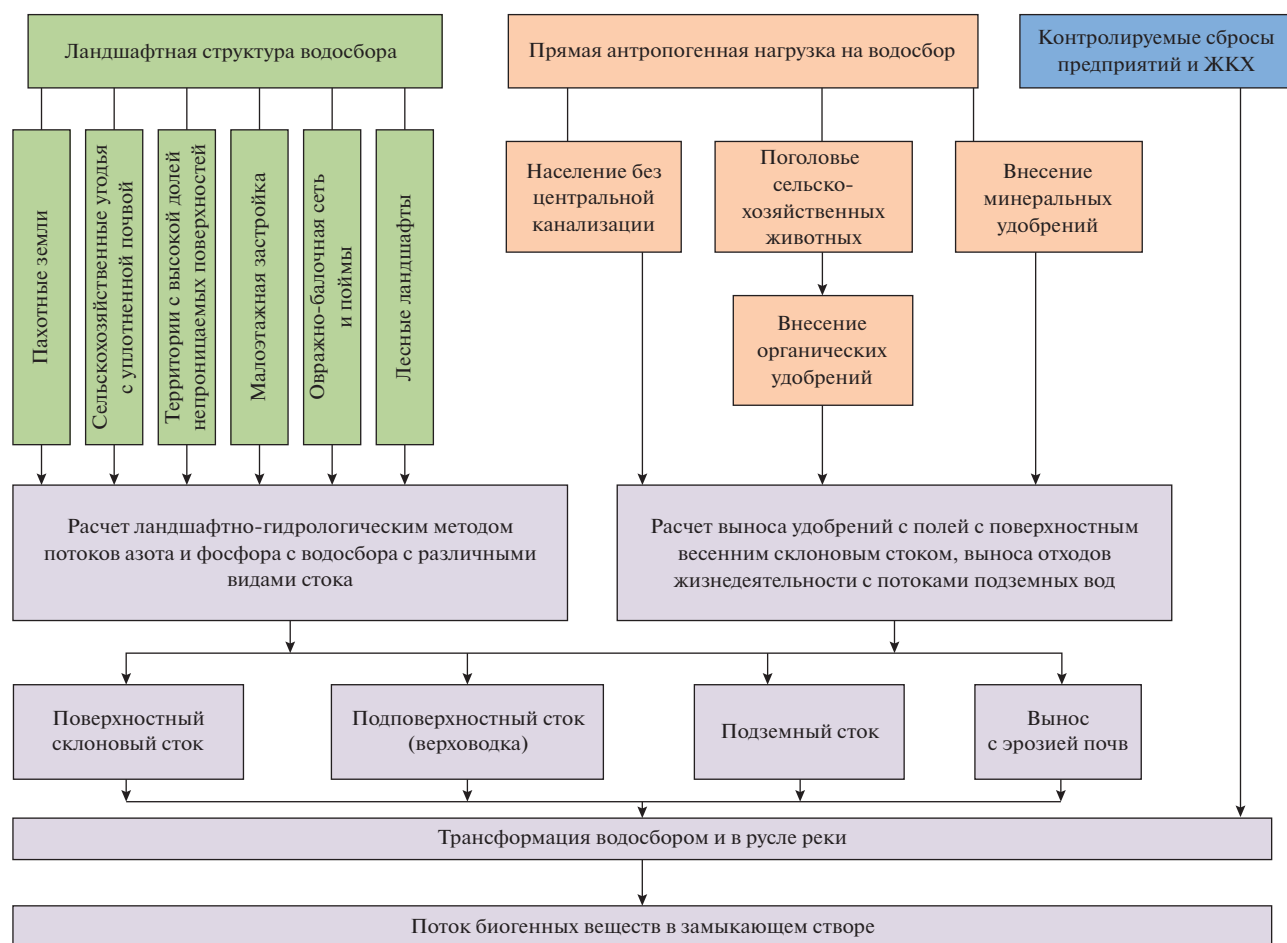
лений. Этим объясняется несбалансированность временного и пространственного масштабов, а также степени разработки математического аппарата для описания разных блоков формирования диффузного загрязнения: формирования стока воды, формирования стока наносов и формирования стока химических веществ. Гидродинамические модели стока соседствуют с эмпирическими зависимостями, описывающими процессы эрозии и химического стока. В блоках расчета химического состава жидкого стока и стока наносов в связи со сложностью описания и формализации процессов их формирования используются либо эмпирические зависимости между концентрациями ЗВ, расходом воды и объемами наносов, либо вообще данные натурных измерений, не обладающие универсальным характером. В расчетных гидрохимических методиках далеко не всегда учитываются формы существования вещества в водной среде (вид химического соединения, степень биодоступности загрязняющего вещества и соответственно его токсичности). Очень часто не оцениваются возможности сорбции/десорбции ЗВ, его переходы из донных отложений и взвешенных и донных наносов в растворенные формы и наоборот, трансформация состава ЗВ в результате химических реакций, воздействия биоты и пр. В большинстве моделей вообще не учитывается, что самим водосбором и его гидрографической сетью поглощаются значительные объемы ЗВ.

Сложность процессов формирования и трансформации стока воды и связанных с ним веществ в различных геосистемах (лесах, сельскохозяйственных полях с разным видом подстилающей поверхности, селитебных территориях и др.) и на водосборах и отсутствие мониторинга привели к тому, что до настоящего времени в России нет официально утвержденных методов расчета диффузного стока ЗВ. Именно поэтому для оценки объемов воды и разнообразных ЗВ, поступающих с водосборов в водные объекты, используются расчетные методы, разработанные на основе специально поставленных полевых экспериментов (Кондратьев, 2007; Кондратьев, Шмакова, 2019; Михайлов, 2000; Хрисанов, Осипов, 1993; Ясинский и др., 2020).

В новой версии *полуэмпирической ландшафтно-гидрологической модели Института географии РАН (ЛГМ ИГРАН)* для каждого типа подстилающей поверхности на водосборе, включая овражно-балочную сеть, осуществляется расчет весеннего склонового стока по связям с речным стоком весеннего половодья, подповерхностного стока (“верховодки”), подземного стока, а также расчет эрозии почвы по связям с величиной склонового стока и выноса с этим стоком биогенных элементов — путем задания их концентраций, полученных по экспериментальным и литературным данным (Yasinsky et al., 2020). Концентрация этих

<sup>1</sup> <https://www.mikepoweredbydhi.com/products> (дата обращения 04.03.2022).

<sup>2</sup> <https://www.bentley.com/ru/solutions/stormwater-modeling-and-analysis> (дата обращения 04.03.2022).



**Рис. 1.** Блок-схема расчета стока биогенных элементов с водосбора в ландшафтно-гидрологической модели Института географии РАН.

элементов в смывной талыми водами почве задается либо по данным агрохимических анализов верхних слоев почвы, либо по данным Единого Государственного реестра почвенных ресурсов России<sup>3</sup>. Предполагается, что в остальные периоды годы вынос этих веществ осуществляется только подземным стоком, величина которого рассчитывается путем расчленения гидрографов речного стока, а концентрация этих веществ задается по данным химического анализа проб, отобранных в зимний период, с их корректировкой по литературным источникам. В модели учитываются данные водохозяйственной статистики (форма отчетности 2-ТП (водхоз)) о сбросах сточных вод предприятий. Учитывается прямое антропогенное воздействие на водосбор — поступление биогенных веществ, связанных с деятельностью человека. В текущей версии ЛГМ это внесение на сельскохозяйственные поля минеральных и органических удобрений, а также по-

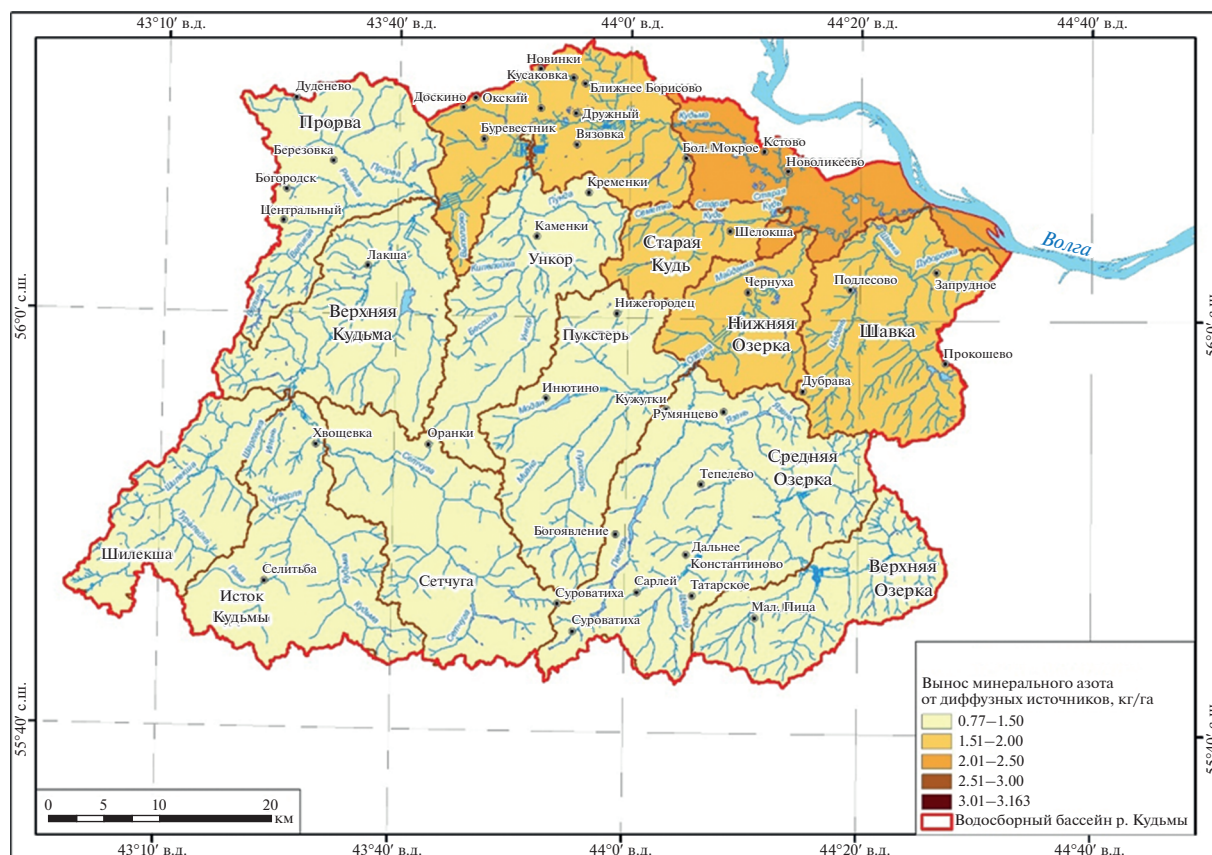
<sup>3</sup> <http://egrpr.esoil.ru/> (дата обращения 04.03.2022).

падание неочищенных отходов жизнедеятельности населения в водную среду (рис. 1).

Новая версия ЛГМ использовалась в работах Института географии РАН по программе “Оздоровление Волги” в том числе для оценки:

- суммарных потоков биогенных элементов, поступающих в Чебоксарское водохранилище, с его местного водосбора (площадь 130000 км<sup>2</sup>) и с водосборов его притоков разных порядков,
- роли диффузных и точечных контролируемых источников в формировании потоков ЗВ с водосбора Чебоксарского водохранилища,
- вклада природных и антропогенных факторов (ландшафтной структуры и прямого антропогенного воздействия) в формирование потоков ЗВ с водосбора Чебоксарского водохранилища,
- роли поверхностного склонового и подземного стока, эрозии на водосборе и стока наносов в формировании переноса ЗВ с водосбора Чебоксарского водохранилища.

Исходная информация и результаты расчетов на модели легли в основу разработанной регио-



**Рис. 2.** Интенсивность выноса минерального азота от диффузных источников с подводосборов бассейна р. Кудьмы (площадь водосбора 3220 км<sup>2</sup>), кг/га в год.

нальной ГИС. Некоторые полученные результаты применения ЛГМ приведены на рис. 2–4.

Сильной стороной ЛГМ является максимальный учет ландшафтной структуры водосборов. К недостаткам следует отнести вынужденное использование ряда эмпирических зависимостей, что может несколько снизить точность расчетов стока ЗВ с водосбора. В этой связи предполагается, что в будущем в отдельные блоки ЛГМ будут включены более строгие физико-математические модели гидролого-геохимических процессов. Это позволит проводить расчеты этих процессов и потоков ЗВ с водосборов с большей точностью, в том числе при задании различных сценариев изменения климата, в соответствии с данными о прогнозируемых разными методами величинах осадков и температуры воздуха и прогнозируемых изменений в системах землепользования.

В целом необходимо отметить, что современный этап развития методов расчетов выноса ЗВ веществ с водосбора в водные объекты основывается на разработке нового поколения моделей гидрологического цикла с использованием ГИС-технологий и развитых баз данных. Эти модели используются для описания процессов цикла,

протекающих в разных временных масштабах и для водосборов разных пространственных размеров. Одновременно с этим осуществляется разработка моделей талой и дождевой водной эрозии почвы. Разработка гидрологических моделей, моделей водной эрозии и выноса химических веществ ведется в настоящее время параллельно, и они не всегда сочетаются друг с другом в решении задач, связанных с оценкой выноса ЗВ. Несомненно, что в ближайшем будущем на основе внедрения современных систем мониторинга произойдет устранение эклектичности подхода к проблеме оценки выноса ЗВ с водосбора путем разработки некоторых обобщенных моделей (комплекса моделей) формирования гидролого-геохимических процессов на водосборах. Они позволят рассчитывать не только их характеристики, но и параметры потоков ЗВ, поступающих с водосбора и обуславливающих качество воды водных объектов.

При разработке этих моделей необходимо решить несколько основных задач, наиболее полно раскрывающих суть процесса диффузного загрязнения водных объектов, в том числе следующие.



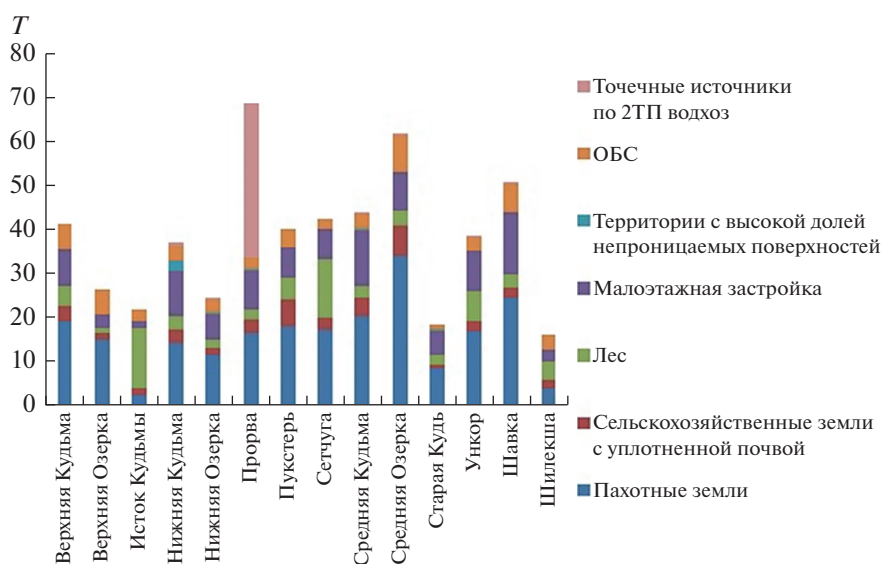


Рис. 3. Вклад диффузных и точечных источников в вынос минерального азота с подводосборов бассейна р. Кудьмы (площадь водосбора 3220 км<sup>2</sup>), т/год.

1. Уже упоминавшаяся выше разработка моделей талой и дождевой эрозии почвы. Несмотря на то, что в решении этой проблемы достигнуты существенные результаты, заключающиеся в разработке физически обоснованных моделей ручейковой эрозии, отрыва почвенных частиц и транспортирующей способности потока (Сухановский, 2019; Шмакова, 2021), входящие в них параметры трудно определять на практике. Вероятно, именно поэтому в настоящее время для оценки объемов эрозии почвы и аккумуляции наносов широко используются аэрокосмические снимки, включая снимки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с различным пространственным разрешением и ГИС-технологии (Жидкин и др., 2021; Пространственно-временные ..., 2019). Основная проблема – интеграция уже разработанных моделей эрозии почвы и их модификаций в модели диффузного выноса ЗВ с водосбора в водные объекты, а также разработка специальной гидролого-географической модели эрозии почвы, с одной стороны – физически обоснованной, с другой – с достаточно просто определяемыми параметрами. Наиболее перспективным путем разработки такой модели является проведение комплексных полевых экспериментальных исследований на оборудованных современными приборами водосборах, позволяющими регистрировать быстропротекающие процессы в сочетании с использованием снимков с БПЛА, космических аппаратов и ГИС-технологий. ГИС-системы должны включать базы данных, содержащие весь набор необходимых исходных данных [гидрометеорологических, геохимических, включая мутность потоков на водосборе и в водотоке и необходимых для рас-

чета параметров водосбора, ручейковой сети и др. (Гарцман, Шамов, 2015; Ясинский и др., 2021)]. Методической основой такой модели могут являться физико-статистические зависимости типа  $Q = f(V)$ ,  $S = f(Q)$ , где  $Q$  – расход воды в русле микроручейка;  $V$  – ширина микроручейка, потока,  $S$  – мутность потока.

2. Важной задачей, тесно связанной с разработкой моделей переноса вещества с потоками воды на водосборе и в русле водотока, является оценка количества и состава ЗВ, адсорбированных на частицах почвы разного гранулометрического размера. При этом перенос загрязнений в водной среде осуществляется как в растворенном, так и в значительной степени в твердой фазе со взвешенными и влекомыми наносами (Касимов и др., 2016). Проблема оценки объема и состава ЗВ при диффузном загрязнении водных объектов важна как для урбанизированных территорий, так для других водосборов. Однако, как уже говорилось, именно для территорий городов характерен самый значительный антропогенный прессинг на все компоненты окружающей среды (воздух, почвогрунты, поверхностные и подземные воды), определяющий как степень трансформации их физических свойств, так и объемы, и расширенный спектр ЗВ. При этом гидроэкологический мониторинг за состоянием водной и окружающей среды в крупных городах России практически отсутствует и его необходимо создавать для научного обоснования мероприятий по управлению городскими территориями.

3. Разработка зависимостей, позволяющих отдельно оценивать редуциацию потоков ЗВ с водосбора и в речной сети. В настоящее время ис-

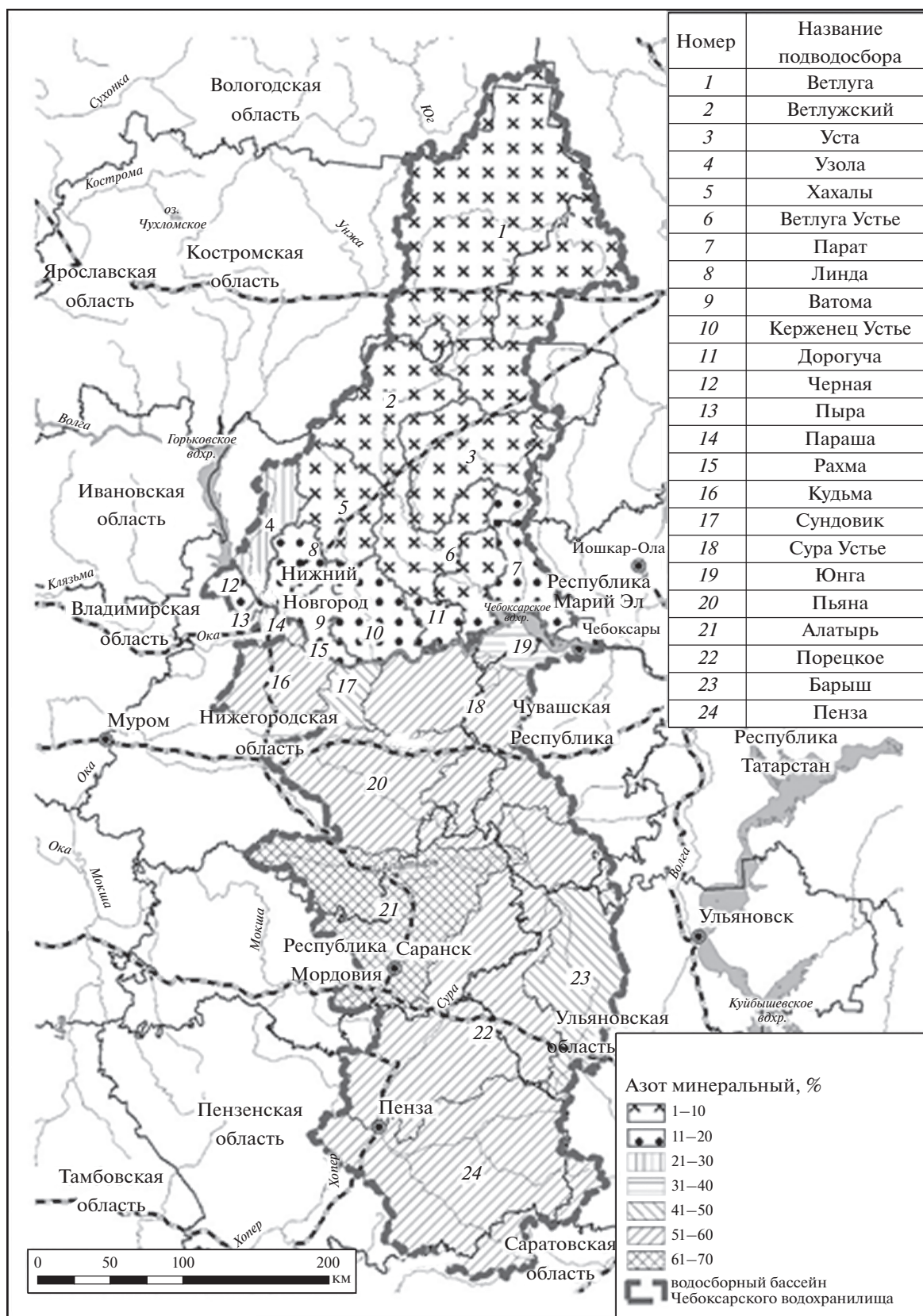


Рис. 4. Доля прямой антропогенной нагрузки (внесения удобрений и поступления отходов жизнедеятельности населения) в сток минерального азота от диффузных источников в Чебоксарское водохранилище, %.

пользуются обобщенная зависимость, интегрально учитывающая снижение объема этих потоков водосбором и руслом самого водотока (Кондратьев, Шамова, 2019). На пути от границы водосбора до русла доходит не более 20% наносов, смываемых с водосбора в процессе эрозии почвы (Чалов, 2021). Склоновый сток, формирующийся на водосборах в период дождей паводков и при снеготаянии, обуславливающий смыв почвы, снижается в зависимости от их длины. При выпадении дождевых осадков снижение объема склонового стока на склонах значительной длины обусловлено большой вероятностью появления значительного количества участков с высокой инфильтрационной способностью почвы (Гусев, 1982). При снеготаянии снижение объема поверхностного весеннего склонового стока связано с высокой пространственной неоднородностью снежного покрова – верхние участки склона с тонким слоем снега находятся, как правило, в мерзлом состоянии, а нижние его участки, покрытые значительно более мощным слоем снега, – в талом состоянии и способны впитывать значительные объемы снеговой воды (Ясинский, 1994). Снижение потока смытой с водосбора и с абразивной берегов почвы и других ЗВ в русле рек обусловлено их депонированием в излучинах, на поймах и других участках, где скорость воды снижается, и образуются застойные зоны, в которых происходит осаждение этого материала. Использование обобщенных зависимостей редукции потоков смытой почвы и ЗВ не позволяет в полной мере раскрыть и в какой-то мере учесть механизмы этого явления, что представляется важным при планировании различных природо- и водоохранных мероприятий на водосборах.

Естественно, перечисленными выше задачами не ограничивается список перспективных направлений комплексных исследований малоизученного процесса диффузного загрязнения водных объектов. Требуется дальнейшего совершенствования схемы расчета водоотдачи и образования стока при дождевых осадках и снеготаянии, при которых начинается образование микроручейковой сети и непосредственно эрозионный смыв, а также впитывания воды, особенно в мерзлую в почву, с учетом образования так называемого “запирающего слоя” (Калужный, Павлова, 1981). Необходим учет агрохимического состояния почвы при оценке переноса ЗВ склоновым стоком и эрозией почв. Важным представляется научное обоснование мероприятий по снижению уровня диффузного загрязнения с водосборов водных объектов. В настоящее время проблема диффузного загрязнения водных объектов находится на начальной стадии своего изучения. Требуется значительные усилия ученых разных специальностей, объединенных единой целью и пониманием ее важно-

сти, чтобы достигнуть значительного прогресса в решении ее основных задач.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации и при поддержке гранта РФФ 22-17-00224 “Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях” (разделы, связанные с формированием диффузного загрязнения, методические подходы), гранта РФФИ № 19-05-50082 Микромир “Диффузный перенос микрочастицами загрязняющих веществ с территории крупного города в водные объекты бассейна Волги (на примере Нижнего Новгорода)” (разделы, связанные с переносом загрязнений в разных фазах в городских условиях), а также в рамках Государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8) (состояние вопроса оценки диффузного загрязнения).

## FUNDING

The work was carried out within the framework of the implementation and with the support of the RSF grant no. 22-17-00224 “Hydrological and geochemical processes formation in the catchments of the cascade of the Upper Volga and Kama reservoirs under different land use and climate changes scenarios in their territories” (sections related to the formation of diffuse pollution, methodological approaches), the RFBR grant no. 19-05-50082 “Diffuse transfer of pollutants by microparticles from the large city territory of the Volga basin to water bodies (the case of Nizhny Novgorod)” (sections related to the formation of pollution in urban and transfer of pollution in different phases), as well as within the framework of the State assignment of the Institute of geography of the Russian Academy of Sciences FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8) (the state of the issue of assessing diffuse pollution, methodological approaches).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобровицкая Н.Н.* Исследование и расчет смыва почвы со склонов // Сб. работ по гидрол. Л.: Гидрометеопиздат, 1977. № 12. С. 93–99.
- Болгов М.В., Голубаш Т.Ю., Лазарева Е.В., Ривар Ж.* Моделирование режима поверхностных вод исторической части Ростова Великого // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2003. № 6. С. 508–518.
- Болгов М.В., Завьялова Е.В., Зайцева А.В., Осипова Н.В.* Оценка диффузного стока с урбанизированных территорий в бассейне р. Волги (на примере г. Ростова) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 483–492.
- Борисов Д.С.* Bentley Systems – моделирование и эксплуатация наружных сетей водоснабжения и канализации // Машиностроение. 2009. № 5. С. 64–68.

- Гарцман Б.И., Шамов В.В.* Натурные исследования стокоформирования в дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 589–599.
- Голосов В.Н.* Эрозивно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2003. 45 с.
- Гордин И.В., Кирпичникова Н.В.* Сравнительная оценка экологической опасности поверхностных стоков с промышленных площадок и городских территорий // Промышленная энергетика. 1993. № 1. С. 32–39.
- Гусев Е.М.* Вариант динамико-стохастического моделирования гидрологических процессов // Метеорология и гидрология. 1982. № 8. С. 75–82.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло-и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А.* Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России: формирование, распределение, использование. М.: Геос, 2015. 320 с.
- Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / науч. рук-ль В.И. Данилов-Данильян. М.: РАН, Ин-т водных проблем РАН, 2020. 512 с.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И.* Гидрологическая яркость равнинной территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 7–25.
- Долгов С.В., Швыдкий В.О., Штамм Е.В.* Закономерности формирования баланса азота и фосфора на речных водосборах в центральной лесостепи Русской равнины в 1990–2020 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 3. С. 355–367.
- Дрюпина Е.Ю., Эйрих А.Н., Эйрих С.С., Папина Т.С.* Влияние крупных городов на качество речных вод (на примере р. Обь в районе г. Барнаула) // Вода: химия и экология. 2014. № 7. С. 3–9.
- Жидкин А.П., Голосов В.Н., Добрянский А.С.* Оценка применимости цифровых моделей рельефа для моделирования эрозии почвы (на примере малого водосбора в Курской обл.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 133–144.
- Зиновьев А.Т., Папина Т.С., Кудишин А.В., Ловцкая О.В., Дьяченко А.В., Марусин К.В., Носкова Т.В.* Экспериментальные исследования и моделирование качества воды для оценки влияния диффузного стока с урбанизированных территорий // Науч. проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. М.: Студия Ф1, 2019. С. 359–365.
- Калужный И.Л., Павлова К.К.* Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 160 с.
- Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов С.Р., Шинкарева Г.Л., Папкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В.* Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга–Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 67–81.
- Китаев Л.М.* Гидроэкологическая оценка урбанизированных территорий // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 3. С. 81–89.
- Китаев Л.М.* Движение химических соединений в системе “атмосфера–поверхностный сток” в условиях города // Изв. РАН. Сер. геогр. 1993. № 6. С. 111–114.
- Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб., 2007. 255 с.
- Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор–водоток–водоем. СПб.: Нестор – История, 2019. 248 с.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С.* Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне р. Москвы и на территории города Москвы // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 133–143.
- Куприянов В.В.* Гидрологические аспекты урбанизации. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 184 с.
- Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф.* Стационарные исследования эрозии почвы при снеготаянии в Центральном Нечерноземье // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 11 / под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 57–76.
- Львович М.И., Чернышев Е.П.* Закономерности водного баланса и вещественного обмена в условиях города // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1983. № 3. С. 23–29.
- Михайлов С.А.* Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели. Барнаул: День, 2000. 131 с.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
- Назаров Н.А.* Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 645–652.
- Назаров Н.А., Леонов А.В.* Моделирование водного и биогеохимического циклов лесного бассейна в течение года // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 1. С. 53–47.
- Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / под ред. В.Н. Голосова, О.П. Ермолаева. Казань–М., 2019. 371 с.
- Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. М.: НИИ ВОДГЕО, 2014. 88 с.
- Сухановский Ю.П., Прущик А.В.* Моделирование водной эрозии почвы // Эрозия Почв / Агенство

- “Apele Moldovei”, Chişinău: S. n., 2019 (Tipogr. “Lexon-Prim”). 200 p.
- Сухановский Ю.П., Пискунов А.Н., Санжарова С.И. Компьютерная модель для расчёта среднемноголетних потерь почвы, обусловленных дождевой эрозией и эрозией почв при весеннем снеготаянии. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2009. 50 с.
- Фащевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Алгушаева А.В. Гидролого-гидрохимические модели формирования диффузного загрязнения // Диффузное загрязнение водных объектов: Проблемы и решения: Кол. монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: ИВП РАН, 2020а. С. 102–125.
- Фащевская Т.Б., Полянин В.О., Кирпичникова Н.В. Диффузное загрязнение водных объектов: источники, мониторинг, водоохранные мероприятия. М., 2020б. 171 с.
- Фролов А.В., Георгиевский В.Ю. Изменения водных ресурсов в условиях потепления климата и их влияние на приток к крупным водохранилищам России // Метеорология и гидрология. 2018. № 6. С. 67–76.
- Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 279 с.
- Чалов Р.С. Речные наносы в эрозионно-русловых системах: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2021. 50 с.
- Черногаева Г.М. Гидрологическая роль урбанизации (на примере г. Москвы) // Вопр. географии. М.: Мысль, 1976. Сб. 102. С. 179–184.
- Чуян Г.А., Бойченко З.А., Тур О.П. Методические рекомендации по оценке выноса биогенных веществ поверхностным стоком. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 32 с.
- Шмакова М.В. Модель почвенной эрозии. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021662286, 26.07.2021. Заявка № 2021661585 от 26.07.2021.
- Ясинский С.В. Пространственная неоднородность и водоотдача снежного покрова на склонах водосборов малых рек центральной лесостепи // Малые реки России. М.: МЦ ГО РФ, 1994. С. 207–229.
- Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Ершова А.А., Макеева И.Н. Вклад микрочастиц в перенос загрязнения реками и подземными водами в крупном городе // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. VIII Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Пермь, 2021. С. 407–411.
- Ясинский С.В., Вишневецкая И.А., Веницианов Е.В. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 232–244.
- Ясинский С.В., Гуров Ф.Н., Шилькрот Г.С. Метод оценки выноса биогенных элементов в овражно-балочную и речную сеть малой реки // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 4. С. 44–53.
- Ясинский С.В., Гусев Е.М. Динамика-стохастическое моделирование процессов формирования весеннего склонового стока на малых водосборах // Почвоведение. 2003. № 7. С. 847–861.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В. Результаты и перспективы гидрологических исследований на Курской биосферной станции Института географии РАН // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 4. С. 529–649.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Нарыков А.Н. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 630–648.
- American Public Works Association. Water Pollution Aspects of Urban Runoff. U.S. Department of Interior, FWPCA (present EPA), Washington D.C. WP-20-15. 1969. 200 p.
- Arheimer B., Olsson J. Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Application in Europe. Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), 2003. 53 p.
- Avellaneda P., Ballesterio T.P., Roseen R.M., Houle J.J. On parameter estimation of urban storm-water runoff model // J. Environ. Engineering. 2009. Vol. 135. P. 595–608.
- Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // Hydrobiologia. 1999. P. 111–122.
- Chen J., Adams B.J. Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes // J. of Environ. Engineering. 2006. Vol. 132. P. 1314–1330.
- Gander W. Buildup / Washoff Model for Dissolved Iron in Stormwater Runoff. Univ. of New Orleans, 5-18-2007. 73 p.
- Gironás J., Roesner L.F., Davis J. Storm water management model. Applications manual. Department of Civil and Environ. Engineering Colorado State Univ., Fort Collins, 2009. 180 p.
- Li R.M. Water and Sediment Routing from Watersheds / Modeling of Rivers. Willey Int. Publ., 1979. P. 9.1–9.88.
- Shaw S.B., Stedinger J.R., Walter M.T. Evaluating urban pollutant buildup/wash-off models using a Madison, Wisconsin catchment // J. Environ. Engineering. 2010. Vol. 136(1). P. 194–203.
- Sutherland R.C., McCuen R.J. Simulation of Urban and Nonpoint Source Pollution // Wat. Res. Bul. 1978. Vol. 14(2). P. 409–428.
- Terstriep M.L., M.T. Lee, E.P. Mills, A.V. Greene, M. Razeur Rahman. Simulation of urban runoff and pollutant loading from the Greater Lake Calumet area. Illinois State Water Survey Champaign, Illinois, October 1990. 99 p.
- Wang L., Wei J., Huang Y., Wang G., Maqsood I. Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County // Environ. Pol. 2011. Vol. 159. P. 1932–1940.
- Yasinsky S.V., Koronkevich N.I., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Diffuse biogenic pollution of water bodies in the Volga river basin-example of Cheboksary reservoir basin // Wat. Res. Management: Methods, Appl. and Challenges. 2020. P. 123–152.

## The Current State of the Problem of Assessing the Characteristics of Water Bodies Diffuse Pollution in Lowland Watersheds

S. V. Yasinsky<sup>1, \*</sup>, E. A. Kashutina<sup>1, \*\*</sup>, and M. V. Sidorova<sup>1, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: yasinski@igras.ru

\*\*e-mail: kashutina@igras.ru

\*\*\*e-mail: sidorova@igras.ru

A review of modern ideas about the nature and specifics of diffuse pollution of water bodies is made. The formation, movement, and transformation of water flows formed in watersheds during periods of snowmelt and rainfall saturated with dissolved and suspended substances is a complex multidimensional process distributed over the catchment area. The main factors in the formation of diffuse pollution of water bodies is the interaction of a complex of hydrological and geochemical processes, depending on the climatic features of the territory and the structure of land use in watersheds. The development of the chemical and biological industries has led to the entry into the natural environment of new pollutants alien to the biota, requiring new methods for monitoring and cleaning sources of diffuse and point pollution. In cities, the issue of entry and pollution of water bodies with a wide range of pollutants, including microplastics, is most acute. Suspension microparticles carry a significant proportion of priority pollutants for large cities (surfactants, oil products, heavy metals). It is noted that diffuse pollution of water bodies, which forms on various types of the underlying surface of watersheds, is not registered and is not regulated by any state water management or environmental department. The main reasons for this are the uncertainty of the consumer of diffuse runoff, the complexity of organizing its monitoring, and the incomplete understanding by state water authorities of its key role in pollution of water bodies due to insufficient scientific knowledge of the problem in Russia. The necessity of developing a modern scientifically substantiated network for monitoring diffuse runoff is noted. A review of modern models developed both in Russia and abroad, used to calculate the release of pollutants into water bodies using GIS technologies and advanced databases, is made. In a number of cases, an imbalance was noted in the degree of development of blocks describing the transfer of water, sediment and chemicals. Examples of the work of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences in the modeling of diffuse pollution in the basin of the Cheboksary reservoir under the program "Improvement of the Volga" are given.

*Keywords:* diffuse pollution, small rivers, urban water environment, modeling, phases of the state of pollutants, transport of pollution with microparticles, xenobiotics

### REFERENCES

- American Public Works Association. *Water Pollution Aspects of Urban Runoff*. Washington D.C.: U.S. Department of Interior, FWPCA (present EPA), WP-20-15. 1969. 200 p.
- Arheimer B., Olsson J. *Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Application in Europe*. Swedish Meteorol. and Hydrol. Inst. (SMHI), 2003. 53 p.
- Avellaneda P., Ballester T.P., Roseen R.M., Houle J.J. On parameter estimation of urban storm-water runoff model. *J. Environ. Eng.*, 2009, vol. 135, pp. 595–608.
- Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load. *Hydrobiologia*, 1999, pp. 111–122. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2163-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2163-9_13)
- Bobrovitskaya N.N. Study and calculation of soil erosion from slopes. In *Sbornik rabot po gidrologii* [Collection of Works on Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977, vol. 12, pp. 93–99.
- Bolgov M.V., Golubash T.Yu., Lazareva E.V., Rivar J. Modeling the surface water regime of the historical part of Rostov the Great. *Geoekologiya, Inzhenernaya Geol., Gidrogeol., Geokriol.*, 2003, no. 6, pp. 508–518. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Zav'yalova E.V., Zaitseva A.V., Osipova N.V. Evaluating the diffuse runoff from urban territories in the Volga basin: case study of Rostov city. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 673–681. <https://doi.org/10.1134/S0097807820050036>
- Borisov D.C. Bentley Systems – modeling and operation of external water supply and sewerage networks. *Mech. Eng.*, 2009, no. 5, pp. 64–68. (In Russ.).
- Chalov R.S. River sediments in erosion-channel systems. *Extended Abstract of Doct. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2021. 50 p.
- Chen J., Adams B.J. Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes. *J. Environ. Eng.*, 2006, vol. 132, pp. 1314–1330.
- Chernogaeva G.M. Hydrological role of urbanization (the case of Moscow). In *Vopr. Geogr.* [Problems of Geography]. Moscow: Mysl' Publ., 1976, vol. 102, pp. 179–184. (In Russ.).
- Chuyan G.A., Boychenko Z.A., Tur O.P. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke vynosa biogennykh veshchestv poverkhnostnym stokom* [Guidelines for Assessing the Removal of Biogenic Substances by Surface Runoff]. Moscow: VASKHNIL, 1985. 32 p.
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Hydrological layering of the flat territory *Izv. Akad. Ser. Geogr.*, 2010, no. 1, pp. 7–25. (In Russ.).

- Dolgov S.V., Shvydkii V.O., Stamm E.V. Patterns of the formation of nitrogen and phosphorus balance in river drainage areas in the central forest-steppe of the Russian Plain in 1990–2020. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, no. 3, pp. 355–367. (In Russ.).
- Dryupina E.Yu., Eirikh A.N., Eirikh S.S., Papina T.S. Influence of large cities on the quality of river waters (the case of the Ob River near Barnaul). *Voda: Khimiya i Ekologiya*, 2014, no. 7, pp. 3–9. (In Russ.).
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Rets E.P., Safronova T.I., Bugrov A.A., Telegina A.A., Telegina E.A. *Sovremennye resursy podzemnykh i poverkhnostnykh vod evropeiskoi chasti Rossii: formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie* [Modern Resources of Underground and Surface Waters of the European Part of Russia: Formation, Distribution, Use]. Moscow: Geos Publ., 2015. 320 p.
- Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G., Algushaeva A.V. Hydrological-hydrochemical models of the formation of diffuse pollution. In *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: Problemy i resheniya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions]. Danilov–Danil'yan V.I., Ed. Moscow: Inst. Vodn. Probl. Ros. Akad. Nauk, 2020a, pp. 102–125. (In Russ.).
- Fashchevskaya T.B., Polyaniin V.O., Kirpichnikova N.V. *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: istochniki, monitoring, vodookhrannye meropriyatiya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Sources, Monitoring, Water Protection Measures]. Moscow, 2020b. 171 p.
- Frolov A.V., Georgievskii V.Y. Changes in water resources under conditions of climate warming and their impact on water inflow to Russian large reservoirs. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 390–396. <https://doi.org/10.3103/S1068373918060067>
- Gander W. *Buildup/Washoff Model for Dissolved Iron in Stormwater Runoff*. Univ. of New Orleans, 2007. 73 p.
- Gartsman B.I., Shamov V.V. Field studies of runoff formation in the far east region based on modern observational instruments. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, pp. 766–775. <https://doi.org/10.1134/S0097807815060044>
- Gironás J., Roesner L.F., Davis J. *Storm Water Management Model. Applications Manual*. Fort Collins: Dep. Civil and Environ. Eng. Colorado State Univ., 2009. 180 p.
- Golosov V.N. Erosion-accumulative processes in the upper links of the fluvial network of the developed plains of the temperate zone. *Extended Abstract of Doct. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2003. 45 p.
- Gordin I.V., Kirpichnikova N.V. Comparative assessment of the environmental hazard of surface runoff from industrial sites and urban areas. *Prom. Energetika*, 1993, no. 1, pp. 32–39. (In Russ.).
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo-i vlagoobmena poverkhnosti sushii s atmosferoi* [Modeling of Heat and Moisture Exchange of the Land Surface with the Atmosphere]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 328 p.
- Gusev Y.M. Dynamics-stochastic simulation of hydrological processes. *Soviet Meteorol. Hydrol.*, 1982, no. 8, 58 p.
- Kalyuzhnyi I.L., Pavlova K.K. *Formirovanie poter' talogo stoka* [Melt Runoff Losses Formation]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1981. 160 p.
- Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Pro-makhova E.V. Catchment based analysis of matter flows in the Selenga–Baikal system. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2016, no. 3, pp. 67–81. (In Russ.).
- Khrisanov N.I., Osipov G.K. *Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov* [Management of Eutrophication of Water Bodies]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1993. 279 p.
- Kitaev L.M. Hydroecological assessment of urbanized territories. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1995, no. 3, pp. 81–89. (In Russ.).
- Kitaev L.M. Movement of chemical compounds in the “atmosphere-surface runoff” system in urban conditions. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1993, no. 6, pp. 111–114. (In Russ.).
- Kondrat'ev S.A. *Formirovanie vneshnei nagruzki na vodoe-my: problemy modelirovaniya* [Formation of External Load on Water Bodies: Modeling Problems]. St. Petersburg, 2007. 255 p.
- Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v sisteme vodosbor–vodotok–vodoem* [Mathematical Modeling of Mass Transfer in the System Catchment Area–Watercourse–Reservoir]. St. Petersburg: Nestor–Istoriya Publ., 2019. 248 p.
- Koronkevich N.I., Mel'nik K.S. Runoff transformation under the effect of landscape changes in the Moskva R. basin and in the territory of Moscow city. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, pp. 159–169. <https://doi.org/10.1134/S0097807815020062>
- Kupriyanov V.V. *Gidrologicheskie aspekty urbanizatsii* [Hydrological Aspects of Urbanization]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 184 p.
- L'vovich M.I., Chernyshev E.P. Patterns of water balance and material exchange in urban conditions. *Izv. Akad. Nauk., Ser. Geogr.*, 1983, no. 3, pp. 23–29. (In Russ.).
- Li R.M. Water and Sediment Routing from Watersheds. In *Modeling of Rivers*. Wiley Int. Publ, 1979, ch. 9.1–9.88.
- Litvin L.F., Golosov V.N., Dobrovolskaya N.G., Ivanova N.N., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F. Stationary studies of soil erosion during snowmelt in the Central Non-Chernozem region. In *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy* [Soil Erosion and Channel Processes]. Chalova R.S., Ed. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998, vol. 11, pp. 57–76.
- Mikhailov S.A. *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ekosistem. Metody otsenki i matematicheskie modeli* [Diffuse Pollution of Aquatic Ecosystems. Estimation Methods and Mathematical Models]. Barnaul: Dei Publ., 2000. 131 p.
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov* [Models of Runoff Formation in the Problems of Hydrology of River Basins]. Moscow: Ros. Akad. Nauk, 2018. 300 p.
- Nazarov N.A. Assessments of erosion loss of soils and removal of biogenic substances with surface runoff of melt and rain water in a river basin. *Water Resour.*, 1996, vol. 23, pp. 597–604. (In Russ.).
- Nazarov N.A., Leonov A.V. Modeling of annual water and biogeochemical cycles in a forest basin. Modeling of water and biogeochemical cycles of the forest basin during the year. *Water Resour.*, 1999, vol. 26, pp. 29–40. (In Russ.).

- Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitiya sovremennykh protsessov prirodno-antropogennoi erozii na Russkoi ravnine* [Spatial and Temporal Patterns of Development of Modern Processes of Natural and Anthropogenic Erosion on the Russian Plain]. Golosov V.N., Ermolaev O.P., Eds. Kazan–Moscow, 2019. 371 p.
- Rekomendatsii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverkhnostnogo stoka s selitebnykh territorii, ploshchadok predpriyatii i opredeleniyu uslovii vypuska ego v vodnye ob'ekty* [Recommendations for the Calculation of Systems for Collecting, Diverting and Treating Surface Runoff from Residential Areas, Enterprise Sites and Determining the Conditions for Its Release into Water Bodies]. Moscow: NII VODGEO Publ., 2014. 88 p.
- Shaw S.B., Stedinger J.R., Walter M.T. Evaluating urban pollutant buildup/wash-off models using a Madison, Wisconsin catchment. *J. Environ. Eng.*, 2010, vol. 136, pp. 194–203.
- Shmakova M.V. *Model' pochvennoi erozii* [Soil Erosion Model]. Certificate of registration of the computer program 2021662286, 07/26/2021. Application No. 2021661585 dated 07/26/2021. (In Russ.).
- Sukhanovskii Yu.P., Prushchik A.V. Modeling of water erosion of soil. In *Eroziya Pochv* [Erosion of Soils]. Lexion-Prim, 2019. 200 p.
- Sukhanovskii Yu.P., Piskunov A.N., Sanzharova S.I. *Komp'yuternaya model' dlya raschyota srednemnogoletnikh poter' pochvy, obuslovlennykh dozhdovoi eroziie i eroziie pochv pri vesennem snegotayanii* [A Computer Model for Calculating Average Annual Soil Losses Due to Rain and Soil Erosion During Spring Snowmelt]. Kursk: VNIIZIPE RAAS Publ., 2009. 50 p.
- Sutherland R.C., McCuen R.J. Simulation of Urban and Nonpoint Source Pollution. *Water Resour. Bull.*, 1978, vol. 14, no. 2, pp. 409–428.
- Terstriep M.L., Ming T. Lee, Evan P. Mills, Amelia V. Greene, M. Razeur Rahman *Simulation of Urban Runoff and Pollutant Loading from the Greater Lake Calumet Area*. Illinois State Water Survey Champaign, Illinois, October 1990. 99 p.
- Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions]. Danilov-Danil'yan V.I., Ed. Moscow: Inst. Vodn. Probl. Ros. Akad. Nauk, 2020. 512 p.
- Wang L., Wei J., Huang Y., Wang G., Maqsood I. Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County. *Environ. Pollut.*, 2011, vol. 159, pp. 1932–1940.
- Yasinsky S.V. Spatial Heterogeneity and Water Loss of Snow Cover on the Slopes of Watersheds of Small Rivers in the Central Forest–Steppe. In *Malye reki Rossii* [Small Rivers of Russia]. Moscow: MTs GO RF Publ., 1994, pp. 207–229. (In Russ.).
- Yasinskii S.V., Gusev E.M. Dynamic-stochastic modeling of spring slope runoff in small drainage areas. *Eurasian Soil Sci.*, 2003, no. 7, pp. 761–774.
- Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Anthropogenic load and the effect of drainage area on the diffuse runoff of nutrients into a large water body: case study of the Cheboksary reservoir. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 810–827.
- Yasinsky S.V., Koronkevich N.I., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Diffuse biogenic pollution of water bodies in the Volga river basin—example of Cheboksary reservoir basin. In *Water Resources Management: Methods, Applications and Challenges*, 2020, pp. 123–152. (In Russ.).
- Yasinsky S.V., Venitsianov E.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Ershova A.A., Makeeva I.N. The contribution of microparticles to the transport of pollution by rivers and groundwater in a large city. In *Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov* [Modern Problems of Reservoirs and Their Watersheds]. Perm, 2021, pp. 407–411. (In Russ.).
- Yasinsky S.V., Vishnevskaya I.A., Venitsianov E.V. Diffuse pollution of water bodies and estimation of export of biogenic elements under different scenarios of water use in the watershed. *Water Resour.*, 2019, vol. 46, pp. 266–277.
- Yasinsky S.V., Gurov F.N., Shilkrot G.S. Method of drifted-over evaluation of biogenic elements to ravine-balka and river system by small river. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 4, pp. 44–53. (In Russ.).
- Yasinsky S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V. Results and Prospects of Hydrological Research at the Kursk Biosphere Station of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 629–640. (In Russ.).
- Zhidkin A.P., Golosov V.N., Dobryansky A.S. Assessment of the accuracy of digital elevation models for modeling soil erosion (by the example of a small catchment area in the kursk region). *Sovr. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2021, vol. 18, no. 5, pp. 133–144. (In Russ.).
- Zinov'ev A.T., Papina T.S., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V., Dyachenko A.V., Marusin K.V., Noskova T.V. Experimental research and modeling of water quality to assess the impact of diffuse runoff from urban areas. In *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiiskikh rek i puti ikh resheniya* [Scientific Problems of Improving Russian Rivers and Ways to Solve Them]. Moscow: Studio F1 Publ., 2019, pp. 359–365.