

## ДИФфуЗНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОЦЕНКА ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ВОДОСБОРЕ<sup>1</sup>

© 2019 г. С. В. Ясинский<sup>1,\*</sup>, Е. В. Веницианов<sup>2</sup>, И. А. Вишневская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт Географии РАН, Россия 119017 Москва

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, Россия 119333 Москва

\*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.03.2016 г.

Принята к публикации 29.12.2016 г.

Сформулировано представление о процессе диффузного загрязнения водных объектов различной размерности. Приведен алгоритм расчета среднесезонного объема выноса основных биогенных элементов – азота и фосфора с водосбора в овражно-балочную и речную сеть малой реки. Приведены результаты серии имитационных расчетов характеристик поверхностного весеннего склонового стока, эрозии почвы и выноса биогенных элементов с водосбора в речную сеть р. Истры при гипотетическом изменении его ландшафтной структуры под влиянием урбанизации и лесовосстановительных мероприятий.

*Ключевые слова:* диффузное загрязнение, водосбор, биогенные элементы.

DOI: 10.31857/S0321-0596462232-244

### СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СУТИ ДИФфуЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Диффузное загрязнение водных объектов – сложнейший процесс, обусловленный совокупностью многих частных гидрологических и геохимических процессов на водосборах водных объектов. Однозначного определения этого понятия пока нет. Это связано с тем, что не выявлены значимость тех или иных частных процессов в различные периоды гидрологического года, масштаб водосборов водных объектов, для качества воды которых влияние этого вида загрязнения существенен. В работах по водохозяйственной статистике [13, 33] отмечено значительное снижение как общего объема водоотведения в водные объекты, так и массы загрязняющих веществ (ЗВ) в составе сточных вод. При этом качество воды в них не улучшается, а во многих водных объектах – ухудшается. Такой парадокс объясняется именно влиянием диффузного за-

грязнения, масштабы которого до настоящего времени остаются неизвестными.

Для большей части территории России период, на протяжении которого в основном происходит формирование водных ресурсов, – весеннее снеготаяние. Лето и осень – это периоды межени, когда питание водных объектов происходит в основном за счет разгрузки подземных вод. Осенью в пополнении водных ресурсов велика роль дождевых паводков.

В летний период поверхностный склоновый сток на водосборах, расположенных на равнинной территории, формируется редко, во время выпадения сильных или катастрофических осадков, поскольку склоны защищены естественной (травяной, лесной) или культурной растительностью [20, 31]. Однако даже если он и формируется на склонах, то вызываемая им эрозия, как правило, приводит к перемещению материала в пределах самого склона и редко достигает овражно-балочной и речной сети.

На пути от водосбора до русла происходит трансформация характеристик жидкого стока, стока наносов и содержащихся в них ЗВ. Если объем жидкого стока, сформированный на склонах, на этом пути увеличивается за счет посту-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 18-05-00479, 17-05-00842), в рамках Государственного задания № 0148-2018-0037; 0148-2019-0007.

пления талых и дождевых вод из гидрографической сети, то значительная часть стока наносов отлагается в задернованных оврагах и балках, на поймах малых рек. При этом в многоводные годы полной промывки отложенного твердого материала не происходит. В маловодные годы мощность слоя этих отложений увеличивается. В результате во многих балках лесостепной зоны мощность балочного аллювия достигает в среднем 0.5–3.5 м [1, 36]. В степной зоне толщина этих отложений достигает уже 8–10 м. Они заполняют все отвершки гидрографической сети, в том числе и устья боковых оврагов [38].

В период снеготаяния и дождевых паводков происходит не только формирование поверхностных водных ресурсов, но и почвенных и грунтовых подземных вод. Содержащиеся в почве химические элементы вместе с талыми и дождевыми водами, просачиваясь через зону аэрации, поступают в грунтовые подземные воды, вызывая их загрязнение, особенно сильное в местах расположения животноводческих, свиноводческих и птицеводческих ферм. В период снеготаяния и сильных дождей питание водных объектов подземными водами практически не происходит, поскольку из-за повышения уровня воды в водном объекте, как правило, наблюдается процесс так называемого берегового регулирования, когда вода, наоборот, из водного объекта поступает в водоносный горизонт. Однако поступившие в водоносный горизонт химические ЗВ при разгрузке подземных вод в летнюю и зимнюю межень поступают в водный объект, приводя к ухудшению качества воды в них. В наибольшей степени влияние загрязнения подземных вод на качество воды поверхностных водных объектов проявляется в лесной зоне, где уровень воды находится на глубине 0.5–3.0 м от поверхности земли, а в некоторых районах в весенний период даже выходит на ее поверхность (Валдайская возвышенность). В лесостепной и степной природных зонах уровень стояния грунтовых подземных вод на плакорных открытых участках находится уже на глубинах примерно 15–20 и 20–40 м соответственно. Поэтому талые воды здесь достигают первого водоносного горизонта в среднем раз в 10 лет [7]. Вероятно, основное питание грунтовых вод в этих природных зонах происходит путем инфильтрации талых вод на лесных участках, а также в балках, где их уровень находится на глубине 1.0–2.0 м. В целом, доля подземного стока в общем среднем годовом суммарном стоке, например в бассейне Волги, составляет ~30% [41]. Влияние диффузного загрязнения на качество

воды зависит также от размера водного объекта. Для крупных по размерам водных объектов, например водохранилищ, загрязняющие вещества поступают в них с атмосферными осадками, речным стоком, в результате абразии берегов, с подземным стоком, от точечных источников, со склоновым стоком и в результате внутриводоемных процессов, в том числе в результате обмена веществом между донными отложениями и водными массами:

$$B_{\text{пр}} = B_{\text{рс}} + B_{\text{аб}} + B_{\text{пс}} + B_{\text{ти}} + B_{\text{скл.с}} + B_{\text{вп}}, \quad (1)$$

$B_{\text{пр}}$  – суммарный приток веществ с водосбора,  $B_{\text{рс}}$  – приток веществ с речным стоком,  $B_{\text{аб}}$  – поступление веществ вследствие абразии берегов,  $B_{\text{пс}}$  – приток веществ с подземным стоком,  $B_{\text{ти}}$  – поступление от точечных источников,  $B_{\text{скл.с}}$  – приток веществ со склоновым стоком,  $B_{\text{вп}}$  – приток веществ в результате внутриводоемных процессов.

Для ряда водохранилищ поступление ЗВ с атмосферными осадками и подземным стоком не учитывается в связи с их незначительной величиной по сравнению с другими потоками [35]. Действительно, доля общей суммы объемов притока напорных, грунтовых и родниковых подземных вод, например в Иваньковское водохранилище, составляет лишь 3.2% общего притока в 9.6 км<sup>3</sup> [3, 14].

Основной поток ЗВ поступает в водохранилища с речным стоком и абразией берегов и зависит от площади водосбора. Речной сток основной реки и притоков не может рассматриваться как диффузное загрязнение. Он представляет собой уже сконцентрированный в русле водный поток, и поэтому его необходимо рассматривать как точечный источник загрязнения наравне с теми, которые поступают от предприятий промышленности, ЖКХ и др.

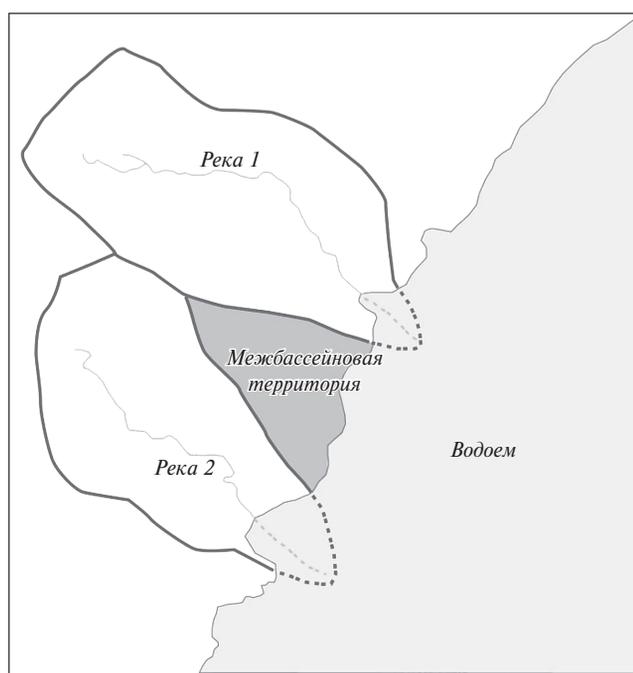
Берега крупных водных объектов – лишь малая часть их водосбора, абразия берегов – результат взаимодействия суши непосредственно с водной средой, существенно отличающегося от происходящего на самом водосборе. Поэтому этот процесс абразии берегов не следует рассматриваться как диффузное загрязнение крупных водных объектов. Обобщенные сведения о характеристиках поступления веществ с водосбора от некоторых источников приведены в табл. 1 [13, 44].

ЗВ выносятся в водные объекты с межбассейновой территории притоков непосредственно диффузным путем со склоновым стоком (рис. 1).

**Таблица 1.** Источники поступления ЗВ непосредственно в водохранилища с водосбора ( $F_{\text{в}}$  – площадь водосбора,  $F_{\text{акв}}$  – площадь акватории)

| Источники поступления ЗВ | Зависимости         | Порядок величины поступающих ЗВ, т |
|--------------------------|---------------------|------------------------------------|
| С речным стоком          | От $F_{\text{в}}$   | $10^3$ – $10^6$                    |
| С абразией берегов       | От $F_{\text{акв}}$ | $10^3$ – $10^6$                    |
| С подземным стоком       | От $F_{\text{в}}$   | $10^2$ – $10^5$                    |

Площадь этой межбассейновой территории по размерам несопоставима с площадью водосбора, на которой формируется речной и подземный сток. Объемы поступления загрязнения этого типа также зависят от размеров этой межбассейновой площади. Для Можайского водохранилища этот тип загрязнения при расчетах вещественного баланса не учитывается [8]. Данные о величине объема поступления ЗВ с межбассейновой площади, как и о размерах самой этой территории, вообще отсутствуют, что не позволяет в полной мере оценить влияние этого типа загрязнения на качество воды водохранилища.



**Рис. 1.** Пример выделения межбассейновой площади водохранилища.

Притоки крупных водных объектов – малые и средние, как правило, не зарегулированные реки, сток которых необходимо рассматривать как точечные источники загрязнения. К малым обычно относятся реки с водосбором <2000 км<sup>2</sup> или имеющие длину <100 км [19]. На малые равнинные реки длиной <100 км приходится ~99% общего числа рек и 92–93% их протяженности. В пределах территории Российской Федерации насчитывается 2.5 млн малых рек. Именно на водосборных территориях малых рек расположены основные источники диффузного загрязнения водных ресурсов (животноводческие фермы, сельскохозяйственные поля, селитебные территории, отвалы горных пород, строительных и промышленных площадок и др.). В последние два десятилетия еще одним мощным источником этого вида загрязнения стала массовая застройка берегов в непосредственной близости от уреза воды, особенно в пределах водоохраных зон и прибрежных защитных полос. В период весеннего снеготаяния диффузный сток, формирующийся на территории малых населенных пунктов, дачных и коттеджных поселков, характеризуется высокими концентрациями всех форм минерального азота (N) и фосфора (P), нефтепродуктов, тяжелых металлов, СПАВ, которые могут превышать рыбохозяйственные ПДК в 5–20 раз [9, 17]. Также поступают продукты жизнедеятельности человека, поскольку далеко не все жилые строения обеспечены индивидуальными системами очистки бытовых стоков. Значительное влияние на них оказывают также свалки твердых бытовых отходов и строительного мусора, часто стихийно возникающие около таких участков, стоянки автомашин и объекты инфраструктуры (магазины и др.).

Таким образом, очевидно, что оценка выноса ЗВ с водосбора диффузным путем в такие водные объекты, как водохранилища, должна осуществляться с двух территориальных единиц – с водосборов притоков и с межбассейновой территории.

Загрязняющие вещества могут поступать непосредственно в водохранилище диффузным путем только с межбассейновой территории при условии расположения источника загрязнения достаточно близко к урезу воды. При значительном расстоянии источника от уреза воды непосредственно в водохранилище попадает часть загрязнения в связи с регулированием склонового стока самой межбассейновой территорией и овражно-балочной сетью (ОБС).

Аналогично не весь объем диффузного загрязнения, формирующийся на водосборах притоков, поступает в водный объект. По длине реки происходит редукция потока ЗВ в связи с поглощением этих веществ высшей водной растительностью и донными отложениями, а также процессами самоочищения [44].

Исходя из приведенных выше представлений только для периода весеннего снеготаяния, в течение которого формируется основной объем диффузного загрязнения на большей части водосборов равнинной территории, сформулируем понятие диффузного рассеянного загрязнения водных объектов как процесс выноса загрязняющих веществ с расположенных на водосборе источников загрязнения в результате гидролого-геохимических процессов на его территории в период весеннего снеготаяния и их трансформацию в овражно-балочной сети.

#### ЛАНДШАФТНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО МНОГОЛЕТНЕГО ГОДОВОГО ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВОДОСБОРА В ОВРАЖНО-БАЛОЧНУЮ И РЕЧНУЮ СЕТЬ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Проблема диффузного загрязнения водных объектов рассматривается во многих исследованиях, результаты которых обобщены в обзорах [15, 25, 30, 34, 35]. Суть часто используемых методов оценки характеристик диффузного загрязнения, их достоинства и недостатки раскрыты в [42, 43]. Показано, в частности, что метод постоянных коэффициентов выноса не позволяет учесть все многообразие ландшафтных условий реальных речных бассейнов. Именно поэтому величины коэффициентов выноса даже для сравнительно однородных водосборов могут отличаться на порядок [44]. Существенный недостаток физико-статистического метода Всероссийского института земледелия и защиты почв от эрозии [40] — его применимость для оценки выноса химических элементов только с сельскохозяйственных водосборов, хотя пространственная ландшафтная структура реальных водосборов включает в себя более широкий спектр геосистем (леса, урбанизированные территории и др.). Другой недостаток этого метода — не учет влияния ОБС, трансформирующей потоки ЗВ на пути от водосбора до водного объекта. Физико-математическое и динамико-стохастическое моделирование процессов диффузного загрязнения водных объектов наиболее перспективно в отношении как точности получаемых резуль-

татов, так и его применения для прогноза эффективности различных водо- и природоохранных мероприятий [17, 18, 26, 27]. Однако слабая информационная обеспеченность этих моделей данными наблюдений ограничивают их широкое применение для решения большого круга практических задач.

Недостатки современных методов оценки выноса ЗВ с водосбора обуславливают необходимость разработки новых методов расчета их характеристик. Они должны быть основаны на однородных методах расчета характеристик частных гидролого-геохимических процессов и самого диффузного загрязнения водных объектов с приемлемой для практики точностью.

Для оценки вклада диффузного загрязнения в формирование качества воды нужно учесть трансформирующее влияние ОБС, а также пространственное распределение потоков ЗВ по длине речной сети. Для решения этих задач представляется перспективным использование ландшафтно-гидрологического подхода, основы которого разработаны в [10], развиты и обобщены в [2, 20, 22, 23]. В рамках этого подхода предполагается, что на участках водосбора с разными характеристиками рельефа, почвенного и растительного покрова, особенностями хозяйственной деятельности формируются разные по объему потоки воды и сток наносов с разной концентрацией взвешенных и растворенных веществ. Сумма потоков ЗВ с этих участков, трансформированных ОБС, формирует диффузное загрязнение водных ресурсов рек и других водных объектов.

Среднемноголетний объем склонового стока и эрозии почвы за год является основной расчетной характеристикой при проектировании противозерозионных мероприятий в ландшафтно-адаптивном земледелии [24]. Для значительной территории РФ склоновый сток формируется в период весеннего снеготаяния, поэтому его величина, определенная для этого периода, принимается для всего года.

В целом, алгоритм оценки потоков ЗВ основан на использовании различных эмпирических зависимостей и их аппроксимации уравнениями, полученными только для Европейской части России (ЕЧР) с точностью  $\geq 10\%$ . В частности, расчет величины склонового стока проводится по зависимости:  $Y_{bc} = f(Y_{pb})$  ( $Y_{bc}$  — слой склонового стока,  $Y_{pb}$  — речной сток в период весеннего половодья).

Зависимость  $Y_{\text{вс}} = f(Y_{\text{рв}})$  получена по данным наблюдений за весенним склоновым стоком ( $Y_{\text{вс}}$ ), формирующимся на разных видах подстилающей поверхности (поле, лес, пашня и др.), расположенных на склонах и водосборах более 30-ти воднобалансовых станций Росгидромета, и стоком ( $Y_{\text{вс}}$ ) за период весеннего половодья, измеренным на гидрометрических створах на реках, протекающих вблизи этих воднобалансовых станций [20].

Расчет эрозии почвы в весенний период проводится уже по зависимостям объема смытой почвы  $M$  от величины склонового стока, сформировавшегося в этот период:  $M = f(Y_{\text{вс}})$  [43]. Другие формулы, используемые в алгоритме расчета диффузного выноса ЗВ, получены также для ЕЧР. Поэтому для других регионов России необходима разработка аналогичных зависимостей по данным специально поставленных экспериментальных исследований.

По этому алгоритму рассчитан средний многолетний объем потоков основных биогенных элементов (БЭ) – азота и фосфора для малого водосбора р. Истры [42]. Он предусматривает выполнение действий и расчетов, описанных ниже.

1. Дается краткая характеристика природных условий и характеристика хозяйственной деятельности на исследуемом водосборе.

2. По топографическим картам масштаба 1:50000 или 1:100000 определяются границы основного водосбора, частных водосборов притоков и вся гидрографическая сеть, площадь межбассейновой территории. На карту наносятся створы гидрологических наблюдений и метеорологические станции.

3. Определение для каждого частного водосбора набора и площади основных видов подстилающей поверхности, слагающих его территорию, включая площадь ОБС. Все картографические работы осуществляются с использованием геоинформационной системы типа ArcGIS.

4. Характеристики поверхностного склонового стока (ПВСС) рассчитываются для двух геоморфологических элементов водосбора: склонов (вс), гидрографической сети (гс):

$$Y_{\text{вб}} = Y_{\text{вс}} + Y_{\text{гс}}. \quad (2)$$

Для каждого вида подстилающей поверхности склонов частного водосбора слой ПВСС рассчитывается по зависимостям [42, 43]:

для зяби

$$Y_{\text{всз}} = 0.07 Y_{\text{рв}}^{1.47}, \quad (3)$$

для угодий с уплотненной почвой

$$Y_{\text{всуп}} = 7.23 Y_{\text{рв}}^{0.53}, \quad (4)$$

для леса

$$Y_{\text{всл}} = 9.0 \times 10^{-4} Y_{\text{рв}}^{2.22}, \quad (5)$$

$Y_{\text{всз}}$ ,  $Y_{\text{всуп}}$ ,  $Y_{\text{всл}}$  – слой ПВСС на полях с зяблевой пашней, с уплотненной почвой, в лесу соответственно;  $Y_{\text{рв}}$  – слой речного стока за период половодья.

Средний многолетний слой речного стока в период весеннего половодья следует определять по данным многолетних гидрологических наблюдений, в отсутствие наблюдений – по данным по рекам-аналогам. Изменение этой гидрологической характеристики по территории РФ показано на карте, приведенной в нормативных документах [3, 4]. Для конкретного места величина слоя этого стока может быть определена путем интерполяции данных, содержащихся на этой карте, согласно нормативным документам с учетом региональных особенностей [3, 4]. Объем речного стока за половодье и подземного стока определяется по гидрографу или многолетним характеристикам в замыкающем створе водосбора или водосбора-аналога. Объем стока верховодки ( $Q$ ) определяется как разница между стоком половодья и суммой подземного и склонового стока. Расчет слоя речного стока за год для водосборов, расположенных в различных природных зонах, может также осуществляться по региональным зависимостям [5]:

$$Y_{\text{рг}} = f(H_{\text{ср}}), \quad (6)$$

$Y_{\text{рг}}$  – величина среднемноголетнего речного стока, мм;  $H_{\text{ср}}$  – средняя высота водосбора, м.

5. Для урбанизированных территорий (малых населенных пунктов, дачных и коттеджных поселков) ПВСС рассчитывается с использованием соотношения между коэффициентами стока с урбанизированных ( $\eta_{\text{ур}} = 0.75$ ) и сельскохозяйственных ( $\eta_{\text{сх}} = 0.58$ ) территорий [6, 7]:

$$Y_{\text{сх}} = 1.3 Y_{\text{урб}}, \quad (7)$$

$$Y_{\text{сх}} = (Y_{\text{всз}} F_{\text{з}} + Y_{\text{всуп}} F_{\text{уп}}) / (F_{\text{з}} + F_{\text{уп}}),$$

$F_{\text{з}}$  и  $F_{\text{уп}}$  – площади полей с зяблевой пашней и полей с уплотненной почвой соответственно.

6. Расчет весеннего склонового стока с площади гидрографической сети проводится по уравнению [8]:

$$Y_{гс} = a\eta_{гс}/\eta_{п}Y_{п}, \quad (8)$$

где  $a$  – переходной коэффициент, учитывающий разницу снегозапасов на поле и в гидрографической сети:  $a = 1.5$ ;  $\eta_{гс}$  – коэффициент склонового стока в гидрографической сети:  $\eta_{гс} = 0.9$ ;  $\eta_{п}$  – коэффициент склонового стока с поля:  $\eta_{п} = 0.58$ ;  $Y_{п}$  – склоновый сток с поля.

7. Расчет эрозии почвы на склонах, занятых сельскохозяйственными полями, проводится по уравнению [9]:

$$M = aY_{вс}^n, \quad (9)$$

где  $a$ ,  $n$  – параметры, значения которых для разных природных зон приведены в [10].

Влияние видов сельскохозяйственных культур на снижение эрозии почвы по отношению к яблечной пашне учитывается введением поправочных коэффициентов [11].

Для урбанизированных территорий сток наносов рассчитывается по уравнению [12]:

$$M_{урб} = W_{всу}, \quad (14)$$

где  $\rho$  – мутность талых вод,  $W_{всу}$  – объем весеннего склонового стока с урбанизированной территории (7). Для лесных геосистем расчет эрозии почвы не проводится в связи с ее полным отсутствием [13].

Концентрация БЭ задается либо по данным лабораторных исследований проб воды, отобранных в склоновом, в речном и подземном стоке в период весеннего снеготаяния и в 10-сантиметровом слое почвы в осенний период (без растительности), либо по литературным данным. Детальная характеристика почв водосбора приведена в Едином государственном реестре почвенных ресурсов России [45], в котором для большинства почв имеется информация о содержании в разных слоях почв основных питательных элементов растений: азота, фосфора, калия.

8. Расчет поступления БЭ в гидрографическую сеть с частных водосборов. Коэффициент трансформации потока БЭ, поступающих в гидрографическую сеть с жидким стоком, может быть принят таким:  $D_{жс} = 1$ .

Для оценки притока БЭ со стоком наносов ( $M_p$ ) в речную сеть частных водосборов используется уравнение:

$$M_p = D_n R_{срв}, \quad (15)$$

где  $D_n$  – коэффициент доставки наносов,  $R_{срв}$  – средневзвешенные значения потока БЭ в стоке наносов, поступающего с водосбора. Величина

$D_n$  рассчитывается в зависимости от площади водосбора  $F$  [14]:

$$D_n = 0.65 F^{-0.27}. \quad (16)$$

Рассчитываются потоки БЭ со склоновым, подземным стоком, стоком верховодки и эрозией почвы с каждого вида подстилающей поверхности.

Определение выноса ЗВ с жидким стоком ( $S$ ) проводится по формуле:

$$S = 10^{-3} C W_p F_p, \quad (17)$$

где  $S$  – вынос ЗВ, кг;  $C$  – концентрация ЗВ в стоке, мг/дм<sup>3</sup>;  $W_p$  – объем весеннего склонового стока вероятностью превышения  $p$ , м<sup>3</sup>/га;  $F_p$  – площадь, га, для которой проводится расчет.

Вынос ЗВ со стоком наносов ( $R$ ) определяется аналогично:

$$R = 10^{-3} m M_p F_p, \quad (18)$$

$R$  – вынос ЗВ со стоком наносов, кг;  $m$  – содержание ЗВ в твердом стоке, мг/кг наносов, определяется по их концентрациям в верхнем 10-сантиметровом слое почвы;  $M_p$  – модуль твердого стока за период весеннего половодья заданной вероятности превышения, т/га.

Вынос БЭ с подземным стоком определяется так:

$$G = 10^{-3} n G_p F_p, \quad (19)$$

$G$  – вынос БЭ с подземным грунтовым стоком, кг;  $n$  – содержание БЭ в подземном стоке, мг/дм<sup>3</sup>;  $G_p$  – объем подземного грунтового стока за период весеннего половодья заданной вероятности превышения, м<sup>3</sup>/га;  $F_p$  – площадь, га, для которой проводится расчет.

Для каждого частного водосбора малой реки величины потоков БЭ с каждого вида подстилающей поверхности суммируются:

$$B = S + R + G + Q. \quad (20)$$

Общий поток этих элементов со всего водосбора рассчитывается как сумма потоков с частных водосборов притоков:

$$B_b = \sum B_i, \quad (21)$$

$i$  – число частных водосборов.

9. Районирование территории водосбора по величине выноса БЭ проводится с целью выявления водосборов с наибольшей биогенной нагрузкой на водосбор и водные ресурсы малой реки и для определения приоритетов при про-



**Таблица 2.** Площадь основных геосистем на водосборах малых рек в бассейне р. Истры, км<sup>2</sup> ( $F$  – водосбора,  $F_l$  – лесов,  $F_{с/х}$  – сельскохозяйственных угодий,  $F_3$  – полей, распаханых с осени под зябь,  $F_{уп}$  – полей с уплотненной почвой (многолетние травы, пастбища),  $F_{ур}$  – урбанизированных территорий,  $F_{ОБС}$  – ОБС)

| Водосбор       | $F$  | $F_l$ | $F_{с/х}$ |          | $F_{ур}$ | $F_{ОБС}$ |
|----------------|------|-------|-----------|----------|----------|-----------|
|                |      |       | $F_3$     | $F_{уп}$ |          |           |
| р. Истра       | 420  | 180   | 38.3      | 80.0     | 80.0     | 41.7      |
| р. Малая Истра | 229  | 122   | 20.2      | 42.3     | 20.8     | 23.6      |
| р. Молодильня  | 70   | 21.9  | 11.4      | 23.7     | 5.93     | 7.22      |
| р. Маглуша     | 184  | 107   | 9.62      | 19.9     | 29.3     | 19.0      |
| р. Нудоль      | 397  | 290   | 10.1      | 21.0     | 36.2     | 39.7      |
| р. Раменка     | 58   | 36.2  | 3.35      | 7.00     | 5.7      | 5.80      |
| р. Черная      | 77   | 36.4  | 8.6       | 17.9     | 6.5      | 7.70      |
| р. Каменка     | 22   | 15.3  | 0.47      | 0.97     | 3.06     | 2.20      |
| р. Катмыш      | 128  | 87.8  | 3.82      | 7.97     | 15.6     | 12.8      |
| р. Песочная    | 152  | 64.7  | 17.6      | 36.7     | 17.3     | 15.7      |
| р. Грязева     | 91   | 42.1  | 8.34      | 17.4     | 13.8     | 9.40      |
| р. Беяна       | 87   | 37.1  | 10.7      | 22.3     | 7.9      | 9.00      |
| р. Лопца       | 62   | 28.9  | 7.13      | 14.9     | 7.4      | 3.70      |
| р. Палишня     | 33   | 24.5  | 1.07      | 2.22     | 3.20     | 2.00      |
| р. Катмышка    | 26   | 14.6  | 1.90      | 3.95     | 2.97     | 2.60      |
| р. Чернушка    | 14   | 2.8   | 2.77      | 5.78     | 1.26     | 1.40      |
| Сумма          | 2050 | 1111  | 155       | 324      | 257      | 204       |

3. за счет сокращения полей с зяблевой пашней на 20% и площади лесов на 10% от современных значений на всех водосборах притоков р. Истры;

– увеличение площади лесов

4. за счет сокращения площади полей с зяблевой пашней на 10% водосборах всех притоков р. Истры;

5. за счет сокращения площади полей с уплотненной почвой на 10% и с зяблевой пашней на 10% на всех водосборах притоков р. Истры;

6. на 20% на водосборах с большими объемами выноса БЭ за счет сокращения площади агросистем на этих водосборах;

7. на 30% на водосборах с большими объемами выноса БЭ за счет сокращения площади агросистем на этих водосборах.

Для каждого сценария изменения структуры землепользования на каждом из 16-ти малых водосборов бассейна р. Истры по изложенному выше алгоритму проведен расчет величин поверхностного весеннего склонового стока,

эрозии почвы и выноса БЭ в его речную сеть (табл. 3 и 4).

#### АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СКЛОНОВОГО СТОКА, ЭРОЗИИ ПОЧВЫ И ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ВОДОСБОРЕ р. ИСТРЫ

**Сценарии 1–3** гипотетически предполагают рост урбанизированных территорий за счет уменьшения площади агросистем и леса на всех водосборах. Наиболее показателен сценарий 3 – рост урбанизированных территорий за счет сокращения полей с зяблевой пашней на 20 и площади лесов на 10% современных величин. Поверхностный склоновый сток увеличится на 81 и смыв почвы – на 10%. Модуль выноса БЭ увеличивается на 11.5% преимущественно за счет увеличения выноса N на 11.2% современных величин. При этом пространственная картина распределения модуля выноса на водосборах не меняется. Этот пример наглядно показывает роль урбанизации в усилении выноса биогенных

**Таблица 3.** Поверхностный склоновый сток  $Y$  и эрозия почвы  $M$  при разных сценариях землепользования на водосборе р. Истры

| Сценарии          | $Y$ , мм | $\Delta$ , мм | %    | $M$ , т | $\Delta$ , т | %    |
|-------------------|----------|---------------|------|---------|--------------|------|
| Исходная величина | 38.7     |               |      | 3.8     |              |      |
| 1                 | 56.7     | 18            | 46.3 | 3.5     | -0.3         | 8    |
| 2                 | 58.6     | 19.9          | 51.3 | 3.9     | 0.1          | 2.5  |
| 3                 | 70.6     | 31.9          | 82   | 3.4     | -0.4         | 10.8 |
| 4                 | 31.2     | -7.5          | 19   | 3.1     | -0.7         | 18.4 |
| 5                 | 29.9     | -8.8          | 23   | 2.9     | -0.9         | 23.7 |
| 6                 | 36.7     | -2.7          | 7    | 3.4     | -0.4         | 8    |
| 7                 | 34.1     | -4.6          | 12   | 3.2     | -0.6         | 12   |

ЗВ и диффузного загрязнения водных объектов. Даже сравнительно небольшое уменьшение площади лесов и сельскохозяйственных угодий и замена их урбанизированными территориями приводит к увеличению склонового стока и эрозии почвы более чем в 1.5 раза и существенному повышению выноса БЭ с водосбора (рис. 3).

В сценариях 4 и 5 увеличивается площадь леса за счет сокращения площади сельскохозяйственных угодий на всех водосборах бассейна р. Истры. При увеличении площади леса на 10% за счет соответственного уменьшения площади зяби поверхностный сток и эрозия почвы снижаются на 19 и 18% соответственно. Модуль выноса немного уменьшается (на 3%) за счет уменьшения эрозии почвы. Дальнейшее увеличение площади леса на 20% современной величины за счет снижения площади зяби на 10% и полей с уплотненной почвой на 10% приводит к еще большему снижению поверхностного сто-

ка и эрозии почвы – на 23 и 23.7% соответственно. Модуль выноса БЭ снижается на 6%, в основном, за счет уменьшения потока  $P$  на 35% от современной величины, поток  $N$  уменьшается незначительно – на 2.2%. Этот сюжет показывает, что только существенное увеличение площади леса (до 20%) за счет снижения площади сельскохозяйственных полей с разными видами обработки почвы при сохранении площади урбанизированных территорий может приводить к заметному уменьшению величин выноса БЭ.

Сценарии 6 и 7 предполагают увеличение площади леса за счет снижения площади агросистем на 20 и 30% только на водосборах с высокими величинами выноса БЭ. Поверхностный склоновый сток и эрозия почвы на всем водосборе снижаются, но незначительно – только на 7–12%. Модули выноса уменьшаются на 3.5 и 4.5% соответственно, в основном, за счет уменьшения выноса  $P$  с продуктами эрозии почвы, которое в сценарии 7 достигает 62%. В сценарии 6 на общем фоне небольшого снижения модулей выноса со всего водосбора увеличение площади леса на 20% за счет полей с зяблевой пашней на водосборах с начальными высокими значениями модулей выноса приводит к уменьшению числа этих водосборов, но с сохранением водосборов с самыми высокими значениями. В сценарии 7 при увеличении площади леса на 30% за счет снижения площади зяби и полей с уплотненной почвой на 20% модули выноса с водосборов с их высокими начальными величинами становятся меньше, чем с водосборов с начальными более низкими величинами. Пространственная картина распределения модулей выноса БЭ на водосборе существенно меняется (рис. 4). Из этого следует, что

**Таблица 4.** Потоки БЭ при различных сценариях землепользования на водосборе р. Истры ( $B_N$  и  $B_P$  – вынос с водосбора  $N$  и  $P$  соответственно, т;  $\Delta_N$  и  $\Delta_P$  – изменение выноса  $N$  и  $P$  в каждом из сценариев по сравнению с исходной величиной, т;  $V$  – сумма выноса азота и фосфора, т;  $\Delta V$  – изменение суммы выноса  $N$  и  $P$  в каждом из сценариев по сравнению с исходной величиной, т;  $V/F$  – модуль суммы выноса БЭ с водосбора, кг/км<sup>2</sup>;  $\Delta V/F$  – изменение модуля суммы выноса БЭ с водосбора, кг/км<sup>2</sup>)

| Сценарии          | $B_N$ | $\Delta_N$ | %   | $B_P$ | $\Delta_P$ | %   | $V$ | $\Delta_V$ | %    | $V/F$ | $\Delta_{V/F}$ | %    |
|-------------------|-------|------------|-----|-------|------------|-----|-----|------------|------|-------|----------------|------|
| Исходная величина | 627   |            |     | 51.1  |            |     | 678 |            |      | 335   |                |      |
| 1                 | 620   | 7          | 1.1 | 50.9  | -0.2       | 0.4 | 671 | -7         | 1.0  | 332   | -3             | 0.9  |
| 2                 | 664   | 38         | 6.0 | 54    | 2.9        | 5.7 | 720 | 42         | 6.3  | 356   | 21             | 6.3  |
| 3                 | 706   | 79         | 11  | 55    | 3.9        | 7.2 | 760 | 82         | 11.4 | 376   | 41             | 11.5 |
| 4                 | 623   | -4         | 0.6 | 45.2  | 5.9        | 11  | 668 | -10        | 0.8  | 326   | -9             | 2.7  |
| 5                 | 613   | -14        | 2.2 | 33    | -18        | 35  | 646 | -17        | 2.5  | 315   | -20            | 5.9  |
| 6                 | 630   | -3         | 0.4 | 38    | -13        | 25  | 668 | 10         | 2.0  | 325   | -10            | 3.3  |
| 7                 | 637   | -10        | 1.6 | 19    | -32        | 62  | 656 | 22         | 3.3  | 320   | -15            | 4.5  |

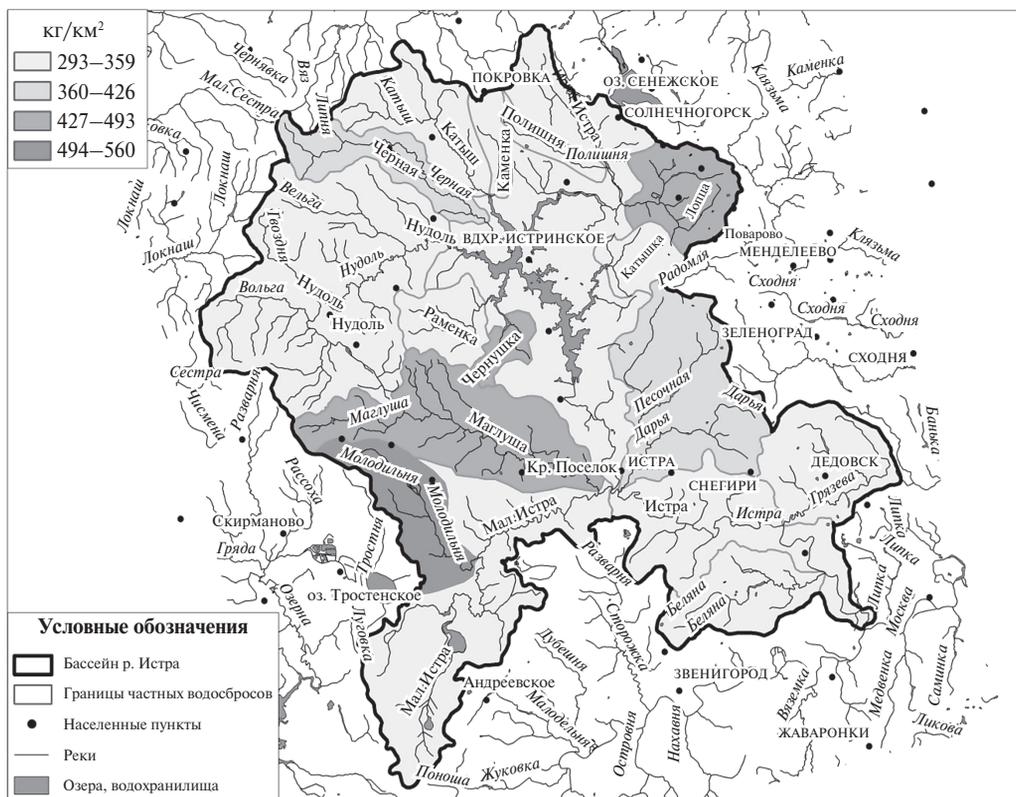


Рис. 3. Изменения выноса БЭ с частных водосборов бассейна р. Истры при сценарии 3 землепользования: увеличение площади урбанизированных территорий.

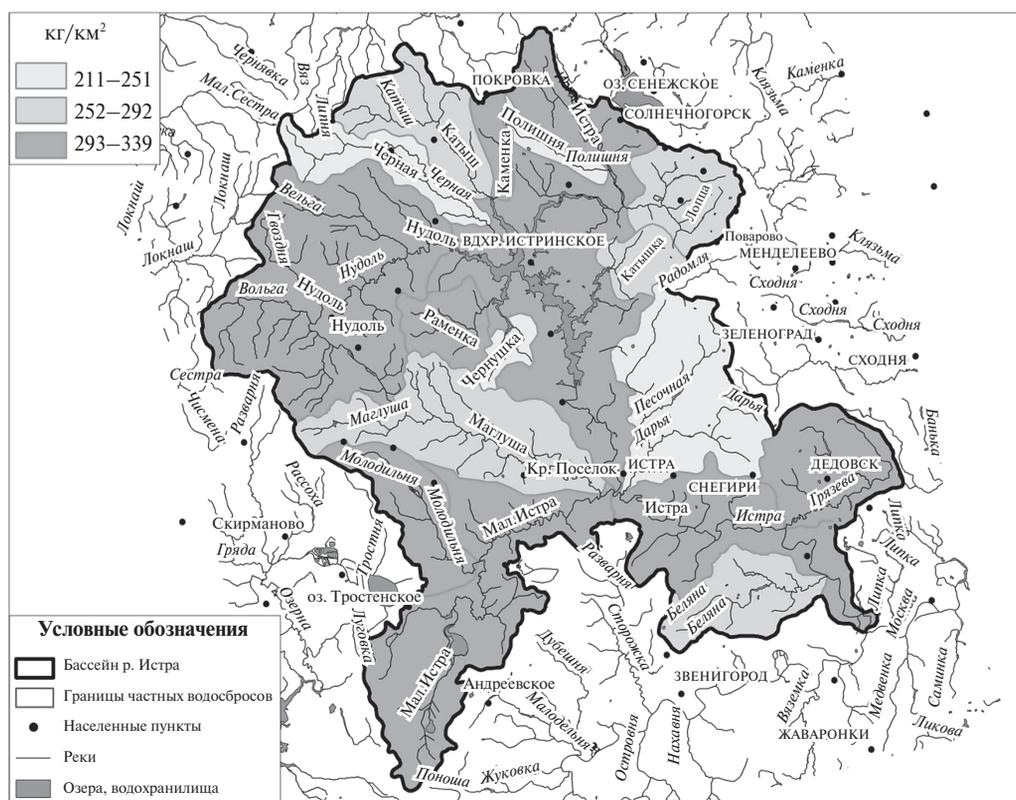


Рис. 4. Изменения выноса БЭ с частных водосборов бассейна р. Истры при сценарии 7 землепользования (увеличение площади леса за счет уменьшения площади агрогеосистем).

только значительное увеличение лесистости на водосборах с высокими модулями выноса БЭ способно обеспечить существенное уменьшение выноса БЭ со всего водосбора. Отметим, что проведение лесовосстановительных мероприятий на всех водосборах экономически нецелесообразно и практически трудно осуществимо.

С использованием представленной методики и полученных модулей стока можно сформулировать задачу оптимизации системы водоохранных мероприятий по снижению диффузного стока. Переменные параметры – площади основных геосистем (табл. 2), сумма которых ограничена общей площадью водосбора (в данном случае 2050 км<sup>2</sup>). Расширение площадей геосистем с минимальным стоком БЭ происходит за счет других, имеющих более высокие показатели модулей стока БЭ. Привлекаются экономические показатели: стоимости изменения профиля использования площадей геосистем. Критерий – суммарный сток в соответствии с формулой (21).

### ВЫВОДЫ

Диффузное загрязнение водных объектов представляет собой вынос ЗВ от различных источников загрязнения, неравномерно расположенных на водосборе реки. Поступление этих веществ с речным стоком в крупные водные объекты, например водохранилища, необходимо рассматривать как еще один точечный источник загрязнения.

Для оценки диффузного загрязнения малых равнинных рек, являющихся притоками более крупных водных объектов, на примере бассейна р. Истры разработан ландшафтно-гидрологический метод и алгоритм оценки средних многолетних объемов потоков основных биогенных элементов N и P, поступающих с водосбора в ОБС и речную сеть для периода весеннего снеготаяния.

Вклад диффузного загрязнения малых равнинных рек южной части лесной зоны может быть весьма значительным и составлять от 40 до 90% всего потока БЭ в русле рек.

Серия имитационных расчетов потоков БЭ с водосбора в речную сеть бассейна р. Истры при различных сценариях землепользования показала, что урбанизация территории приводит к существенному увеличению как поверхностного весеннего склонового стока и эрозии почвы, так и потоков БЭ. Увеличение лесистости водосборов за счет снижения площади сельскохозяйственных полей может снизить вынос БЭ

не только с частных водосборов, особенно с высокими модулями выноса, но и с малого речного водосбора в целом.

Разработанный подход может быть использован при планировании различных мелиоративных и других мероприятий на водосборах малых равнинных рек.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И., Чалов Р.С.* Движение наносов и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1997. 166 с.
2. *Антипов А.Н., Корытный Л.М.* Географические аспекты гидрологических исследований. Новосибирск: Наука, 1981. 176 с.
3. *Ахметьева Н.П., Ланина Е.Е.* Генетическая структура подземного стока в Ивановское водохранилище // *Вод. хоз-во России. Проблемы. Технологии. Управление.* 2013. № 1. С. 33–51.
4. *Барabanов А.Т.* Агроресомелиорация в почвозащитном земледелии. Волгоград: ВНИИАЛМ, 1993. 155 с.
5. *Бобровицкая Н.Н.* Исследование и расчет смыва почвы со склонов // *Сб. работ по гидрологии.* № 12. Л.: Гидрометеоздат, 1977. С. 93–99.
6. *Борисова Г.Г., Дальков М.П., Макарова Е.Н.* Модель расчета массы биогенных элементов, поступающих в водные объекты с поверхностным стоком с сельскохозяйственных угодий // *Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием / Под ред. Черняева А.М.* Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2000. С. 140–150.
7. *Вериго С.А., Разумова П.П.* Почвенная влага. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 328 с.
8. *Виноградова Н.Н.* Исследование баланса взвешенного вещества в Можайском водохранилище // *Вод. ресурсы.* № 6. 1991. С. 38–49.
9. *Вода России. Малые реки / Под ред. Черняева А.М.* Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. 803 с.
10. *Глушков В.Г.* Вопросы теории и методы гидрологических исследований. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 416 с.
11. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса. Автореф. ... докт. географ. наук. М.: Изд-во МГУ, 2003. 45 с.
12. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды в Российской Федерации в 1992 г. // *Зеленый мир.* 1993. № 9 (17). 106 с.
13. *Дёмин А.П., Болгов М.В., Филиппова И.А.* Влияние климатических и антропогенных факторов на изменение нагрузки на водные ресурсы в бассейне реки Волги // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Тр. IV Всерос. конф. с междуна-*

- род. участием / Отв. ред. Болгов М.В. М.: ИВП РАН, 2015. С. 278–281.
14. Ивановское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
  15. Имитационное моделирование системы “водосбор — река — морской залив”. Таллин: Валгус, 1989. 428 с.
  16. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противозонозных мероприятий на Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 62 с.
  17. Кондратьев С.А. Оценка возможных антропогенных изменений стока и выноса биогенных элементов с малых водосборов лесной зоны на основе математической модели // Вод. ресурсы. 1990. № 3. С. 24–32
  18. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Крейман К.Д., Игнатьева Н.В. Моделирование гидрологических процессов и массопереноса в системе “водосбор—водоем” // Вод. ресурсы. 1998. № 2. С. 571–580.
  19. Концепция рационального использования и охраны малых рек. М.: Росгипроводхоз, 1991. 36 с.
  20. Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 204 с.
  21. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: ИГ СО РАН, 2001. 163 с.
  22. Ландшафт и воды. Вопросы географии. Вып. 102. М.: Мысль, 1976. 208 с.
  23. Львович М.И. Вода и жизнь. М.: Мысль, 1986. 254 с.
  24. Методика разработки систем земледелия на ландшафтной основе. Курск: ВНИИЗ и ЗПЭ, 1996. 132 с.
  25. Михайлов С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели. Барнаул: День, 2000. 131 с.
  26. Назаров Н.А. Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Вод. ресурсы. 1996. № 6. С. 645–652.
  27. Назаров Н.А., Леонов А.В. Моделирование водного и биогеохимического циклов лесного бассейна в течение года // Вод. ресурсы. 1999. № 1. С. 53–47.
  28. Носаль А.П., Черняев А.М. Изменения качества воды // Вода России. Малые реки / Под ред. Черняева А.М. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. С. 404–424.
  29. Оценка ресурсов и качества поверхностных вод (на примере Московского региона). М.: Изд-во МГУ, 1989. 197 с.
  30. Пряжинская В.Г. Математические модели выноса биогенных веществ с сельскохозяйственных угодий // Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием / Под ред. Черняева А.М. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. С. 130–140.
  31. Субботин А.И. Сток талых и дождевых вод. М.: Гидрометеоздат, 1966. 375 с.
  32. Субботин А.И., Дыгало В.С. Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне р. Москвы. М.: Гидрометеоздат, 1991. 264 с.
  33. Тенденции и динамика загрязнения окружающей среды Российской Федерации в начале XX века. Вып. 2 М.: Росгидромет, 2013. 43 с.
  34. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 279 с.
  35. Цхай А.А. Мониторинг и управление качеством вод речного бассейна. Барнаул: Алтайское кн. изд-во, 1995. 174 с.
  36. Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология и динамика русел малых рек России и их антропогенные изменения // Малые реки России. М.: ИГРАН, 1994. С. 66–79.
  37. Черногаева Г.М. Влияние городов на водный баланс территории // Вопросы антропогенных изменений водных ресурсов. М.: ИГ АН СССР, 1976. С. 125–132.
  38. Чернышев Е.П., Барымова Н.А. Ландшафтные аспекты структуры и трансформации склонового стока и связанного с ним вещественного обмена (на примере речных систем Центральной лесостепи) // Изв. РАН. Сер. географ. 1992. № 1. С. 41–53.
  39. Черняго Л.С. Методические рекомендации по оценке антропогенного загрязнения малых рек (на примере бассейна р. Малая Истра Московского региона). М.: МПУ, 1993. 43 с.
  40. Чуян Г.А., Бойченко З.А., Тур О.П. Методические рекомендации по оценке выноса биогенных веществ поверхностным стоком. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 32 с.
  41. Ясинский С.В. Водный баланс природных зон бассейна Волги в разные по водности фазы многолетнего периода // Изв. РАН. Сер. географ. 2013. № 6. С. 86–101.
  42. Ясинский С.В., Гуров Ф.Н. Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Вод. хоз-во России. 2006. № 2. С. 63–91.
  43. 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. географ. 2007. № 4. С. 44–53.
  44. Reckhow K.H., Beanlac M.N., Simpson J.T. Modeling phosphorus loading and lakeresponce under uncertainty: a manual and compilation of export coefficients. 1980. EPA – 440/s-80-0.
  45. <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1sem.html>.

## Diffuse Pollution of Waterbodies and Assessment of Nutrient Removal under Different Land-Use Scenarios in a Catchment Area

S. V. Yasinskiy<sup>1,\*</sup>, E. V. Venitsianov<sup>2</sup>, I. A. Vishnevskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017, Russia;*

<sup>2</sup>*Institute of Water Problem, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333, Russia*

*\*e-mail: yasisergej@yandex.ru*

Received: 14.03.2016 г.

Accepted: 29.12.2016 г.

The concept of the process of diffuse pollution of waterbodies of various dimensions is presented. The algorithm for calculating the average annual volume of removal and migration of the main nutrients—nitrogen and phosphorus—from the catchment into the ravine and river network of a small river is demonstrated. The results of simulating the characteristics of the spring runoff, soil erosion, and removal of nutrients from the catchment area into the Istra River (Russia) with hypothetical changes in its landscape structure under the influence of urbanization and reforestation are developed through a series of calculations.

**Keywords:** diffuse pollution, water catchment, nutrient elements.

**DOI:** 10.31857/S0321-0596462232-244