

МАСШТАБ И МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ БАССЕЙНА ОКИ

Джамалов Р. Г., Власов К. Г., Григорьев В. Ю., Галагур К. Г.,
Решетняк О. С., Сафронова Т. И.

SCALE AND LONG-TERM DYNAMICS OF OKA RIVER BASIN POLLUTION

Dzhamalov R. G., Vlasov K. G., Grigorev V. Y., Galagur K. G.,
Reshetnyak O. S., Safronova T. I.

Аннотация

Введение. В статье представлена многолетняя динамика загрязнения речных вод бассейна Оки. Бассейн реки является основным источником питьевого водоснабжения и приемником стоков ряда областей Европейской части России. **Методы.** Оценка качества проведена по основным 12 гидрохимическим показателям, построены карты их распределения с разбивкой на два основных периода (1990–1999 гг. и 2000–2017 гг.). Также был произведен расчет антропогенной нагрузки по створу в г. Горбатов. Рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и их статистическая значимость. **Результаты.** Для 18 постов с 25 и более годами наблюдений были выполнены оценка величины линейного тренда (%/год) с помощью функции Тейла–Сена и статистической значимости линейного тренда (тест Манна–Кендалла) для отдельных постов и для всего бассейна с помощью модифицированного теста Волкера (Walker). Расчет стока загрязняющих веществ (ЗВ) с территории городов проведен между створами выше и ниже городов в верховьях бассейна р. Оки. Проведен расчет объемов ЗВ р. Оки с территорий городов Орёл, Белёв и Калуга за период 1990–2017 гг. Выполненный расчет стока ЗВ на участках между створами выше и ниже города позволил определить роль городов в формировании точечного загрязнения в верховьях р. Оки. Уровень антропогенной нагрузки по длине реки Оки по притоку химических веществ варьирует от категории «малая» до категории «высокая». Нагрузка во многом обусловлена поступлением ЗВ и остается довольно высокой, водоемы и водотоки городов являются приемниками очищенных и недостаточно очищенных сточных вод различных предприятий. **Заключение.** Практически по всему бассейну Оки наблюдается напряженное состояние качества воды. Статистический анализ показал существующую взаимосвязь между определенным типом землепользования и концентрациями веществ в поверхностных водах. Выявлено, что самоочищающая способность реки достаточна для того, чтобы загрязняющие вещества не накапливались по течению реки.

Ключевые слова: река Ока, речной сток, качество воды, антропогенная нагрузка, приток химических веществ.

Abstract

Introduction. This article addresses the long-term dynamics of Oka River basin pollution. The basin serves as the main source of drinking water and a receiver of wastewater from a number of regions in European Russia. **Methods.** We assessed the water quality by 12 main hydrochemical indicators and constructed maps of their distribution with a breakdown into two periods (1990–1999 and 2000–2017). The anthropogenic load along the section in the city of Gorbatov was determined. Spearman's rank correlation coefficients and their statistical significance were calculated. **Results.** For 18 gauging stations with 25 and more years of observations, the magnitude of the linear trend (%/year) was estimated using the Theil–Sen estimator, and the statistical significance of the linear trend (Mann–Kendall test) was assessed for individual stations and the entire basin, using a modified Walker test. The runoff of pollutants from the urban territory was estimated between the sections upstream and downstream the cities in the upper reaches of the Oka River basin. The volumes of pollutants in the Oka River from the cities of Orel, Belev and Kaluga were determined for the period of 1990–2017. The calculations of the pollutant runoff, performed between the sections upstream and downstream the cities, made it possible to determine the role of the cities in the formation of point pollution in the upper reaches of the Oka River. The anthropogenic load along the length of the river in terms of the influx of chemicals varies from “low” to “high”. The load is largely due to the intake of pollutants since water bodies and watercourses serve as receivers of both treated and insufficiently treated wastewater from various enterprises. **Conclusion.** Almost throughout the basin, the water quality is under stress. The statistical analysis showed the existing relationship between a certain type of land use and the concentration of substances in surface waters. It was revealed that the self-cleaning capacity of the river is sufficient to prevent pollutants from accumulating along it.

Keywords: Oka River, river flow, water quality, anthropogenic load, influx of chemicals.

Введение

Многолетняя динамика загрязнения речных вод рассмотрена на примере бассейна р. Оки, где практически нет крупных гидротехнических сооружений и антропогенное воздействие связано с многочисленными селитебными поселениями, предприятиями и сельскохозяйственным освоением территории. Формирование химического состава речных вод и большинства участков их загрязнения связано в основном с диффузными источниками.

Река Ока — одна из крупных рек Европейской части России (ЕЧР). Бассейн реки является основным источником питьевого водоснабжения и приемником стоков ряда областей ЕЧР [9]. Химический состав речных вод бассейна Оки в естественных условиях зависит от различных факторов природно-техногенного характера.

Методы и материалы

Оценка качества воды в бассейне р. Оки проведена по основным показателям: общая минерализация, хлориды, сульфаты, легкоокисляемые органические вещества (по БПК₅), трудноокисляемые органические вещества (по ХПК), нефтепродукты, азот аммонийный, азот нитратный, азот нитритный, фосфор фосфатный, соединения железа и меди. В качестве исходной информации послужили многолетние режимные данные об изменчивости химических показателей состояния вод участков рек, а также многолетняя режимная гидрологическая информация об объеме водного стока за год в исследуемых пунктах наблюдений.

По данным гидрохимических показателей построены карты их распределения с разбивкой на два периода (1990–1999 гг. и 2000–2017 гг.), что позволило выявить пространственно-временную динамику изменения химического состава воды и стока химических веществ в бассейне р. Оки.

Был проведен расчет антропогенной нагрузки по длине реки Оки. Расчет и оценка уровня антропогенной нагрузки на речной участок выполнены согласно Р 52.24.819 по максимальным значениям модулей притока отдельных химических веществ [10]. Оценка проводится по показателю БПК₅ как условной характеристике содержания легкоокисляемых органических веществ в речной воде, азоту аммонийному и нефтепродуктам.

Выбор данных показателей обусловлен тем, что резкое изменение содержания данных компонентов в воде «может оказывать негативное воздействие на состояние экосистемы в целом, а также вызывать нарушение структурно-функциональных характеристик сообществ водных организмов» [9].

Рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (r) и их статистическая значимость (p - val) для выявления взаимосвязи между площадью сельскохозяйственных угодий и среднемноголетней величиной выноса фосфора фосфатного и нитратов.

Для удобства оценки влияния источников загрязнения по имеющимся данным разработана методика и предложено деление территории бассейна на точечные — городские территории с высоким уровнем антропогенных земель, и диффузные — межгородские. Подобное деление связано с расположением пунктов отбора проб, которые находятся до и после городов. На водосборной площади между этими пунктами наблюдений (выше и ниже города) могут располагаться не только урбанизированные территории, но и сельскохозяйственные земли.

Результаты исследования и обсуждение

За 2000–2017 гг. годовой сток р. Оки несколько уменьшился (по сравнению с многоводными 1990-ми годами). При этом довольно существенное сокращение стока наблюдалось в течение 2005–2017 гг. (исключение составил 2013 г. с максимальными величинами снегонакопления). В целом годовой сток рек бассейна Оки в 1990–2017 гг. характеризуется положительной аномалией. Так, среднегодовой расход р. Оки — г. Горбатов за 1990–2017 гг. превышал таковой за 1921–1989 гг. на 9,6 % (рис. 1).

Многоводная фаза в бассейне Оки началась с середины 1970-х гг. и связана с положительной аномалией осадков за этот период [6, 7].

Для более детального анализа динамики годового и сезонного стока в бассейне Оки использовались величины среднегодового расхода воды ($Q_{\text{год}}$), максимального ($Q_{\text{макс}}$) и минимального ($Q_{\text{мин}}$) среднемесячного расхода, а также месяц их наступления ($T_{\text{мин}}$ и $T_{\text{макс}}$). Для расчета использовались данные 18 постов с 25 и более годами наблюдений за 1990–2017 гг. Для них была проведена оценка величины линейного тренда

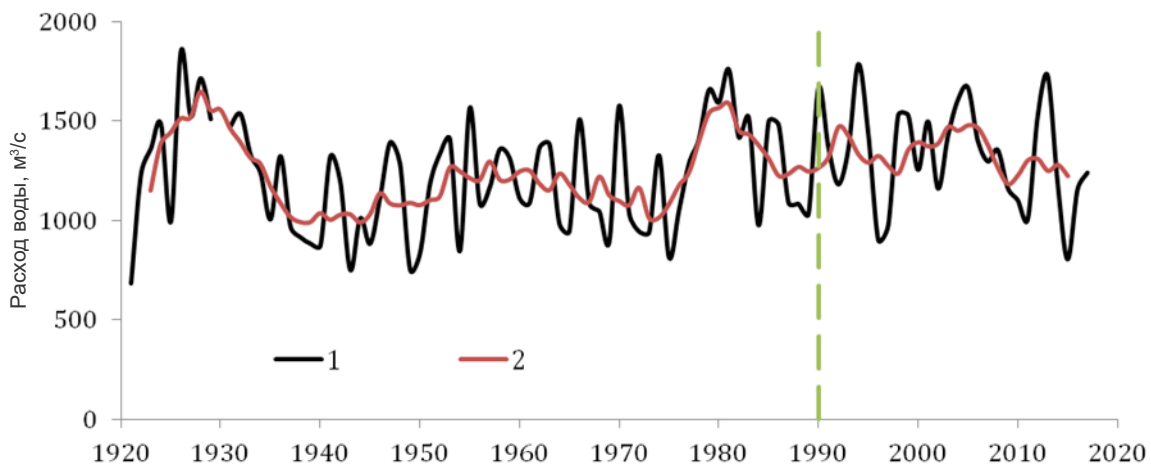


Рис. 1. Среднегодовые расходы воды р. Оки — г. Горбатов, м³/с (1) и скользящие средние среднегодовых расходов воды с окном в 5 лет, м³/с (2)

(%/год) с помощью функции Тейла–Сена, статистическая значимость линейного тренда (тест Манна-Кендалла) для отдельных постов и для всего бассейна с помощью модифицированного теста Волкера (Walker) [15, 16].

Из 18 рассмотренных постов среднегодовые расходы воды ($Q_{\text{год}}$) имели тенденцию к уменьшению на 15 постах (на трех из них при $p\text{-value} < 0,05$). Для замыкающего створа $Q_{\text{год}}$ уменьшались со скоростью 0,77 %/год. Небольшой рост $Q_{\text{год}}$ выявлен лишь для двух рек запада бассейна (Цна и Теша) и одной реки северо-востока (Истра). При этом выявленные три случая нестационарности величин $Q_{\text{год}}$ (р. Ока — посты г. Белёв и г. Калуга и р. Москва — г. Звенигород) по критерию Манна–Кендалла не противоречат гипотезе о том, что все 18 рассмотренных рядов не имеют линейного тренда (с вероятностью более 5 % оценка линейного тренда с помощью теста Манна–Кендалла для 18 рядов даст три и менее ложноположительных результата).

Уменьшение максимального расхода ($Q_{\text{макс}}$) не было выявлено лишь на р. Истре. Для остальных 17 постов $Q_{\text{макс}}$ уменьшился, но лишь для одного из них значимо на 5 %-ном уровне (р. Ушна — д. Новлянская), что не противоречит гипотезе об отсутствии линейного тренда $Q_{\text{макс}}$ в бассейне р. Оки. Скорость снижения $Q_{\text{макс}}$ для поста р. Ока — г. Горбатов составила 1 % в год.

В отличие от $Q_{\text{год}}$ и $Q_{\text{макс}}$ предположение об отсутствии линейного тренда $Q_{\text{мин}}$ в бассейне р. Оки уже отвергается. Для пяти постов выявлен

статистически значимый отрицательный тренд (в том числе для р. Оки в нижнем течении) и для одного поста — положительный.

Изменения месяца наступления максимальных и минимальных расходов воды ни для одного из постов выявлено не было.

Водные ресурсы рассматриваемой территории используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, промышленности, сельскохозяйственного водоснабжения, орошения, теплоэнергетики, рыбного хозяйства.

В целом по бассейну основным источником водоснабжения являются поверхностные воды. Кроме водных ресурсов бассейна р. Оки, используются ресурсы поверхностных вод р. Волги с забором из Иваньковского водохранилища и подачей по каналу им. Москвы.

Ведущая роль при заборе воды принадлежит поверхностным источникам в бассейнах р. Москвы (98 %) и р. Оки (80 %). Показатели забора свежей воды в бассейне Оки приведены в табл. 1.

Забор воды из природных источников за 2017 год сократился на 2041,1 млн м³ по сравнению с 2000-ми годами (см. табл. 1). Также уменьшился и сброс сточных вод в поверхностные водные объекты. Самые большие объемы забора воды и водоотведения имеют города Москва и Нижний Новгород, а также ряд других промышленных и селитебных центров.

В целом по бассейну качество речных вод характеризуется 4-м классом качества (4А и 4Б — «грязная»), а также 3-м классом (3А и 3Б — «за-

Забор, использование и сброс воды по бассейну р. Оки, млн м^{3*}

Бассейн р. Оки	Забор воды из природных водных объектов		Использование свежей воды				Сброс сточных вод в поверхностные водные объекты
	Всего	В том числе из подземных источников	Всего	В том числе на нужды			
				хозяйственно- питьевые	производ- ственные	орошения, с/х водоснабжения	
2000	5951	1836	5582	2260	2899	1610	5746
2005	5199	1720	5043	2239	2456	71	5077
2007	5062	1646	4848	2065	2471	55	4784
2009	4742	1545	4395	1726	2346	38	4619
2011	4583	1405	4293	1823	2155	37	4061
2013	4800	1417	4518	1884	2028	26	4138
2015	4350,1	1310,0	4084,5	1743,0	1804,7	27,4	3696,9
2017	3909,9	1277,6	3620,9	1602,8	1441,0	27,2	3358,3

* По данным Федеральной службы государственной статистики РФ [12].

грязненная» и «очень загрязненная»). Практически для всех рек критическими загрязнителями являются азот нитритный и аммонийный, БПК₅, соединения меди, марганца и железа, фенолы и нефтепродукты [2–5].

В единичных случаях в разряд критических показателей загрязненности (КПЗ) за многолетний период выходили такие химические вещества, как соединения цинка и никеля, сульфаты, ХПК. Особое внимание необходимо уделять именно этим веществам (которые являются КПЗ воды), поскольку их высокие концентрации значительно ухудшают качество речной воды в бассейне р. Оки [11, 13, 14].

Периоды 1990–1999 гг. и 2000–2017 гг. отличаются по условиям формирования водного и особенно гидрохимического стока. Для первого периода характерно сокращение масштабов хозяйственной деятельности и, как следствие, объемов сбросов коммунально-бытовых и промышленных сточных вод. Значительно был сокращен объем внесения удобрений и площадь обрабатываемых сельскохозяйственных земель. Вместе с тем значительно ослабла способность государства контролировать выполнение природоохранного законодательства, начался износ водоочистных сооружений. В целом для ЕЧР 1990-е гг. были многоводными, что обеспечило условия для разбавления загрязняющих веществ.

С начала 2000-х гг. объем сбросов промышленных сточных вод прекратил уменьшаться. Сброс коммунально-бытовых сточных вод в результате роста тарифов и установления платы

в зависимости от объема потребляемой воды продолжил падение, что, однако, привело к росту концентрации загрязняющих веществ в них. Усилился контроль за сбросом загрязняющих веществ, продолжилось совершенствование технологий очистки и оборотного водоснабжения, однако во многих регионах продолжился износ водоочистных сооружений. При средней водности второго периода для юга ЕЧР он отличился несколькими крупными маловодьями — 2002, 2010, 2014 гг.

В течение рассматриваемых периодов происходил рост температуры воздуха и величины прямой солнечной радиации, что привело к сокращению периода ледостава на реках и водоемах, повышению температуры воды, уменьшению стока взвешенных веществ и времени затопления поймы, что косвенно также повлияло на гидрохимию бассейна р. Оки.

В целом по бассейну содержание биогенных веществ меняется от нулевых значений до 23,20 мг/дм³ по азоту аммонийному, до 1,64 мг/дм³ по азоту нитритному, до 46,60 мг/дм³ по азоту нитратному и до 3,72 мг/дм³ по фосфору фосфатному (рис. 2). Среднемноголетние концентрации биогенных веществ меняются в более узких диапазонах, но даже эти значения превышают ПДК. Так, содержание по среднемноголетним концентрациям биогенных соединений в речных водах бассейна Оки колеблется и превышает ПДК до 6,5 раза по азоту аммонийному, до 14,0 раз по азоту нитритному (рис. 2) и до 1,8 раза по фосфору фосфатному.

В среднем за многолетний период воды бассейна р. Оки отличаются высоким содержанием органического вещества, чья концентрация меняется в пределах от 0,70 до 150,0 мг/дм³ по трудноокисляемым органическим веществам (ТООВ) и от 0,60 до 24,5 мг/дм³ по легкоокисляемым органическим веществам (ЛООВ) (рис. 3). Содержание нефтепродуктов — от н. о. до 3,48 мг/дм³. При этом среднемноголетние концентрации органических соединений в бассейне р. Оки изменяются незначительно и колеблются от 14,87 до 38,25 мг/дм³ по ТООВ, от 1,80 до 6,46 мг/дм³ по ЛООВ и от 0,01 до 0,29 мг/дм³ по нефтепродуктам.

В бассейне р. Оки и ее притоках наблюдается превышение ПДК по легко- и трудноокисляемым органическим веществам. Органические вещества являются приоритетными загрязнителями вод Окского бассейна, превышение фиксируется более чем в 50 % проб.

По всему бассейну содержание соединений железа и меди высокое и меняется в пределах от нулевых значений до 5,50 мг/дм³ и до 54,6 мкг/дм³ соответственно. Среднемноголетняя концентрация соединений тяжелых металлов в водах Окского бассейна колеблется от 0,04 до 0,81 мг/дм³ по железу и от н. о. до 8,63 мкг/дм³ по меди (рис. 4).

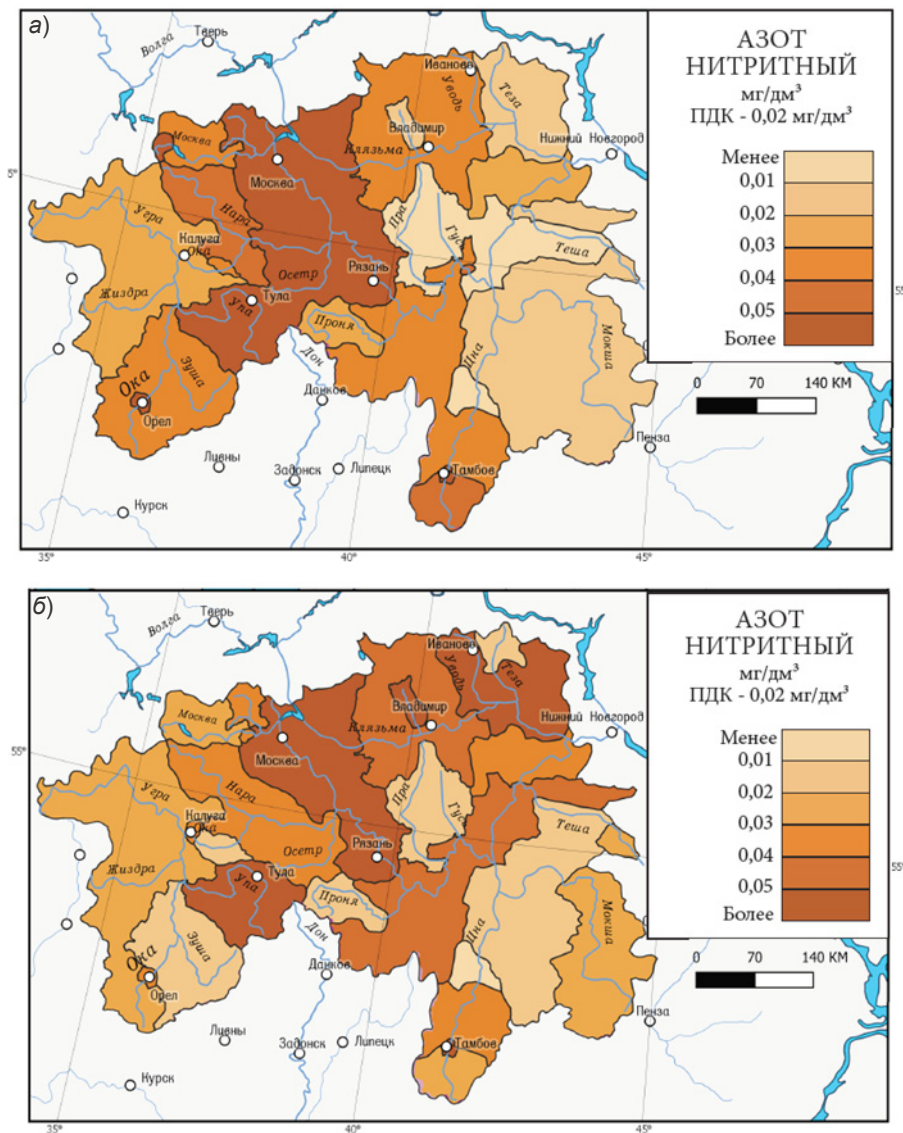


Рис. 2. Распределение азота нитритного в бассейне р. Оки: а — 1990–1999 гг.; б — 2000–2017 гг.

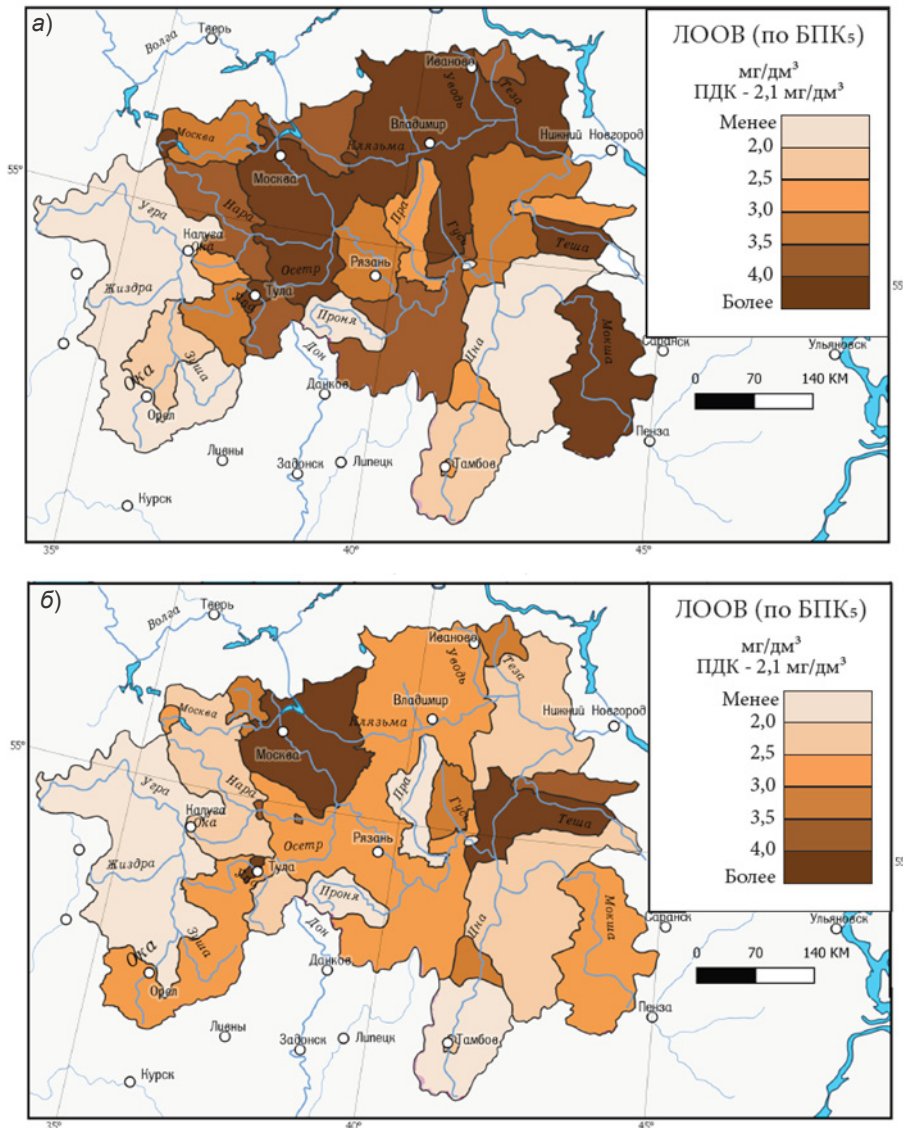


Рис. 3. Распределение легкоокисляемых органических веществ в бассейне р. Оки по периодам: а — 1990–1999 гг.; б — 2000–2017 гг.

Загрязнение металлами речных вод носит устойчивый характер — отмечается превышение ПДК по соединениям железа и меди.

Расчет стока загрязняющих веществ с территории городов проведен между створами выше и ниже городов в верховьях бассейна Оки (табл. 2). Все показатели разделены на две группы: первая — показатели выше ПДК_{р.х}, вторая — показатели ниже ПДК_{р.х}.

Проведен расчет объемов загрязняющих веществ р. Оки с территорий городов Орёл, Белёв и Калуга за период 1990–2017 гг. (табл. 3). Выполненный расчет стока ЗВ на участках между

створами выше и ниже города позволил определить роль городов в формировании точечного загрязнения в верховьях р. Оки.

Одним из основных источников в речных водах таких компонентов, как нефтепродукты, соединения железа и меди, служат городские стоки, к которым при данном анализе следует отнести недоочищенные и неочищенные сточные воды (включая ливневые стоки) и смыв с городских территорий атмосферных выпадений и поливных вод. Городское загрязнение этими веществами составляет около 30 %.

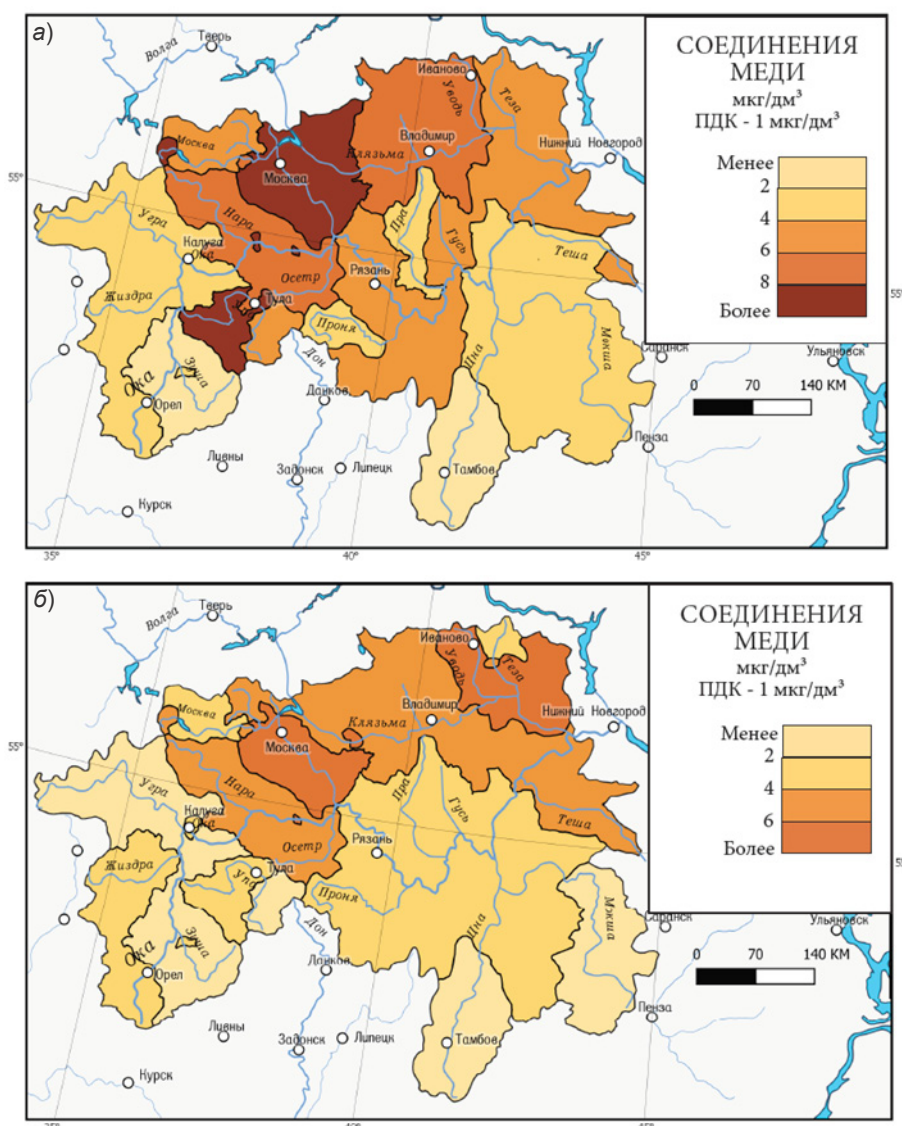


Рис. 4. Распределение соединений меди в бассейне Оки: а — 1990–1999 гг.; б — 2000–2017 гг.

Кроме того, городские территории существенно загрязняют воды органическими и биогенными веществами, при этом их вынос с таких территорий достигает более 50 % от его общего поступления в реки. Причиной этого, вероятно,

является использование некачественных фосфорсодержащих моющих средств и смыл с территории городов жидких атмосферных выпадений, особенно ливневого характера последних лет. В качестве ведущего фактора следует рас-

Таблица 2

Информация о пунктах наблюдения в верховьях р. Оки

Пункт наблюдения	Площадь водосбора, км ²	Среднеголетний расход воды, м ³ /с	Численность населения на 1 января 2020 г.
Орёл	4890	20,6	308 838 чел.
Белёв	17 500	79,2	13 180 чел. (1 января 2018 г.)
Калуга	54 900	297	332 039 чел.

Таблица 3
Расчетные значения загрязняющих веществ с городских территорий за период 1990–2017 гг.

Населенный пункт	Среднегодовой объем ЗВ, тыс. т/год	Вклад городских территорий в загрязнение реки, %
Показатели, не превышающие ПДК _{р.к.} Общая минерализация		
Орёл	42,5	14
Белёв	2,15	
Калуга	206	
Сульфаты		
Орёл	6,3	19
Белёв	4,01	
Калуга	28,2	
Хлориды		
Орёл	6,7	36
Белёв	0,16	
Калуга	23,3	
БПК ₅		
Орёл	0,0312	11
Белёв	0,041	
Калуга	1,04	
Нефтепродукты		
Орёл	0,0037	30
Белёв	0,0057	
Калуга	0,016	
Фосфор фосфатный		
Орёл	0,081	55
Белёв	0,0014	
Калуга	0,186	
Азот нитратный		
Орёл	0,411	44
Белёв	0,017	
Калуга	0,96	
Показатели, превышающие ПДК _{р.к.} · ХПК		
Орёл	1,18	14
Белёв	0,58	
Калуга	10,7	
Азот аммонийный		
Орёл	0,195	37
Белёв	0,013	
Калуга	0,72	
Азот нитритный		
Орёл	0,014	42
Белёв	0,0005	
Калуга	0,05	
Соединения железа		
Орёл	0,0006	13
Белёв	0,026	
Калуга	0,109	
Соединения меди		
Орёл	0,0008	28
Белёв	0,0002	
Калуга	0,003	

смагивать недостаточную очистку ливневых вод или полное ее отсутствие. Кроме того, в зимне-весенний период ведущая роль в этом виде загрязнений принадлежит талым водам.

Как уже отмечалось ранее, «антропогенная нагрузка на водные объекты в бассейне р. Оки остается довольно высокой, водоемы и водотоки городов являются приёмниками очищенных и недостаточно очищенных сточных вод различных предприятий. При этом ухудшение качества водных ресурсов и их экологическая трансформация напрямую зависят от степени урбанизации территории» [9].

Так, по данным Е. А. Абрамовой [1] антропогенная нагрузка по объемам сточных вод в бассейне р. Оки характеризуется как умеренная, при этом наибольшей нагрузкой (категории «очень большая») отличается бассейн р. Москвы из-за влияния крупных городов с развитой промышленностью. При этом общий объем сточных вод, отводимых в реку Москву и ее притоки, превышает среднегодовой сток.

Если рассматривать соотношение источников загрязнения в бассейне р. Оки, то «наибольший сброс сточных вод приходится со стороны г. Москвы (70 % от общего объема сточных вод) и на Московскую область — 30 %» [8].

Поступление в речную сеть загрязняющих веществ в составе сточных вод является одним из основных (но не единственным) факторов ухудшения качества воды рек и экологической ситуации в бассейне р. Оки в целом. Повышение антропогенной нагрузки может происходить и за счет «увеличения выноса наносов с водосборов в результате сведения лесов и интенсивной распашки земель, особенно сельскохозяйственного освоения поймы, возрастающих объемов водозаборов на промышленные, коммунальные и сельскохозяйственные нужды, в том числе безвозвратные» [9].

Выполненные нами ранее расчеты и оценка уровня антропогенной нагрузки по длине реки Оки показали, что ее уровень по притоку химических веществ варьирует от «малой» до «высокой» (табл. 4).

Как видно из данных табл. 4, уровень антропогенной нагрузки по притоку аммонийного азота изменяется от категории «умеренная» (г. Белёв) до «высокой» (г. Кашира), по притоку легкоокис-

Таблица 4

Антропогенная нагрузка по модулю притока химических веществ на различных участках р. Оки [9]

Пункт наблюдений	Максимальные значения модуля притока, т/км ² в год	Антропогенная нагрузка
Азот аммонийный		
Белёв, в черте города	0,033–0,096	Умеренная
Белёв, ниже города	0,029–0,099	Умеренная
Калуга, выше города	0,071–0,141	От умеренной до критической
Калуга, ниже города	0,100–0,178	Критическая
Кашира, выше города	0,146–0,265	От критической до высокой
Кашира, ниже города	0,183–0,296	От критической до высокой
Муром, выше города	0,090–0,157	От умеренной до критической
Муром, ниже города	0,073–0,147	От умеренной до критической
Горбатов	0,075–0,136	От умеренной до критической
Легкоокисляемые органические вещества (по БПК ₅)		
Белёв, в черте города	0,328–0,604	От малой до умеренной
Белёв, ниже города	0,328–0,531	Малая
Калуга, выше города	0,346–0,496	Малая
Калуга, ниже города	0,385–0,579	От малой до умеренной
Кашира, выше города	0,602–1,29	От умеренной до критической
Кашира, ниже города	0,878–1,41	От умеренной до критической
Муром, выше города	0,754–0,933	Умеренная
Муром, ниже города	0,599–0,928	Умеренная
Горбатов	0,577–0,707	Умеренная
Нефтепродукты		
Белёв, в черте города	0,014–0,049	Малая
Белёв, ниже города	0,013–0,036	Малая
Калуга, выше города	0,018–0,027	Малая
Калуга, ниже города	0,029–0,037	Малая
Кашира, выше города	0,027–0,076	От малой до умеренной
Кашира, ниже города	0,034–0,066	От малой до умеренной
Муром, выше города	0,030–0,110	От малой до умеренной
Муром, ниже города	0,015–0,028	Малая
Горбатов	0,014–0,064	От малой до умеренной

ляемых органических веществ — от категорий «малая» или «умеренная» до переходной в «критическую» (в районе г. Кашира). Наименьшая нагрузка выявлена по притоку нефтепродуктов и оценивается как «малая» (гг. Белёв и Калуга) или переходная к «умеренной» (гг. Кашира, Муром, Горбатов) [9].

Таким образом, «наиболее напряженная ситуация наблюдается в среднем течении р. Оки в районе г. Кашира, где уровень антропогенной нагрузки наибольший по всем компонентам. Это можно объяснить тем, что в среднем течении река пересекает Московскую область с высокой

плотностью населения и высокой техногенной нагрузкой на водные объекты» [9].

Вся территория бассейна р. Оки была разбита на водосборные участки: до города и после города. Для этих участков рассчитаны соотношения площади различного назначения к общей площади водосбора и коэффициенты корреляции с концентрациями гидрохимических компонентов на замыкающем створе водосборного бассейна. Данные о типе земель получены из открытой базы данных OpenStreetMap (OSM). В ней пользователи наносят объекты в ручном режиме по спутниковым снимкам Bing, MapBox, DigitalGlobe,

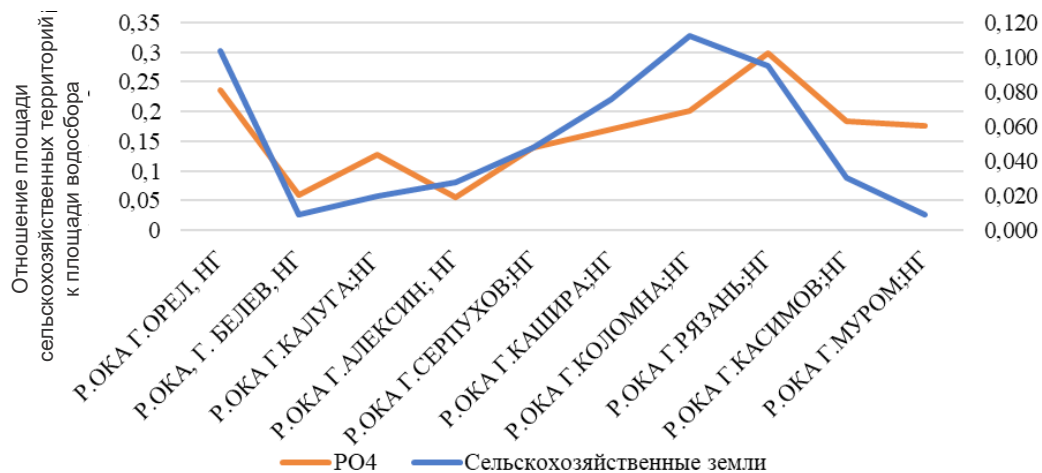


Рис. 5. Корреляция между содержанием фосфора фосфатного и сельскохозяйственными территориями городов

IRS, SPOT4 и SPOT, ASTER, OrbView-3 и ряду других. Для определения назначения территорий используется система тегов, пользователи стараются классифицировать каждый отдельный участок земли.

Классифицируемые городские территории (водосборные площади между постами выше и ниже города) более компактны, имеют меньшие площади и расположены в непосредственной близости к постам гидрохимических наблюдений, межгородские — наоборот, имеют обширные территории, а посты измерений расположены на значительном удалении от источников загрязнения.

Исследуемые диффузные источники загрязнения в бассейне р. Оки показывают, что связь фосфора фосфатного с территориями межгородского пространства незначительна. Однако с территориями сельского хозяйства вблизи городов (рассчитанные площади сельскохозяйственных земель между постами выше и ниже городов) определяется тесная взаимосвязь ($r = 0,73, p < 0,05$), что, возможно, связано с непосредственной близостью таких сельхозугодий к поверхностным водам и пунктам гидрохимических наблюдений. Однако замечено чем больше сельскохозяйственных земель находится до гидрохимического поста, тем выше концентрация (рис. 5–7).

В непосредственной близости от г. Орел находится большое количество сельскохозяйственных земель, что отражается на концентрациях фосфора фосфатного в пунктах наблюдения,

а у г. Белёв сельскохозяйственные поля почти отсутствуют и в воде р. Оки ниже города Белёв обнаруживаются незначительные концентрации фосфора фосфатного.

Доля сельскохозяйственных земель от общей площади бассейна Верхней Волги составляет 6 %, а для исследуемого участка р. Оки — 4,5 %.

Азот аммонийный показывает наиболее значимые корреляции с территориями городского пространства, занятыми под жилые комплексы ($r = 0,85, p < 0,05$) (рис. 8). С сельскохозяйственными территориями, находящимися непосредственно вблизи городов, положительно коррелирует как аммонийный ($r = 0,89, p < 0,05$), так и нитритный азот ($r = 0,81, p < 0,05$). Для азота аммонийного характерна связь с территориями индустриальной зоны ($r = 0,63, p < 0,05$). Для нефтепродуктов проведенный анализ показывает взаимосвязь с территориями индустриальной зоны и городской территорией, занятой жилым комплексом ($r = 0,68, p < 0,05$).

Концентрации легкоокисляемых органических веществ с территориями жилых зданий в городских агломерациях коррелируют значительно ($r = 0,84, p < 0,05$), так же как концентрации ХПК ($r = 0,75, p < 0,05$). Обнаружены значимые корреляции между концентрациями ХПК и БПК₅ и индустриальными территориями: корреляции составили $r = 0,79, p < 0,05$ и $r = 0,75, p < 0,05$ соответственно. Концентрации трудноокисляемых и легкоокисляемых органических веществ кор-

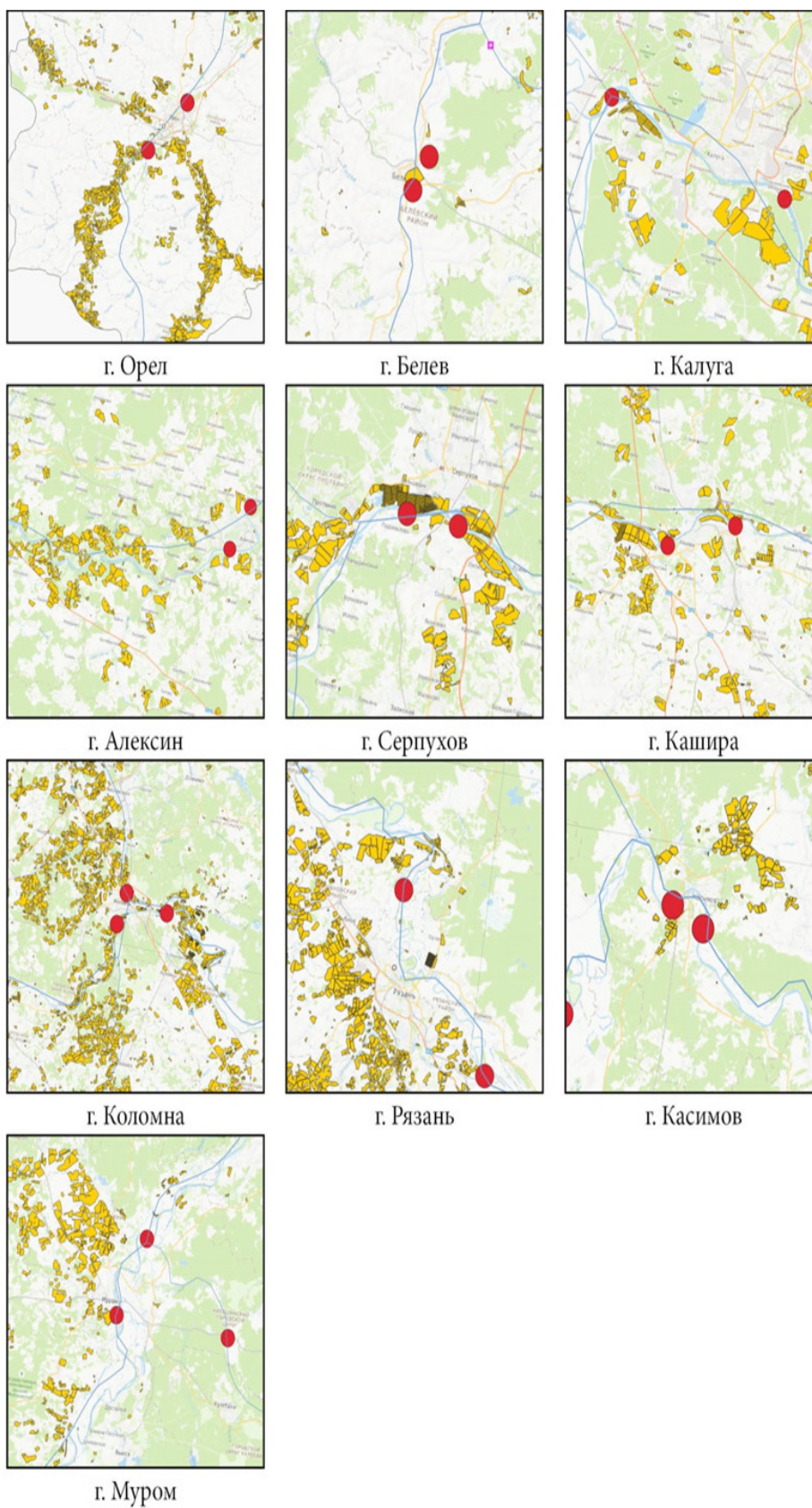


Рис. 6. Сельскохозяйственные земли между гг. Москва и Коломна

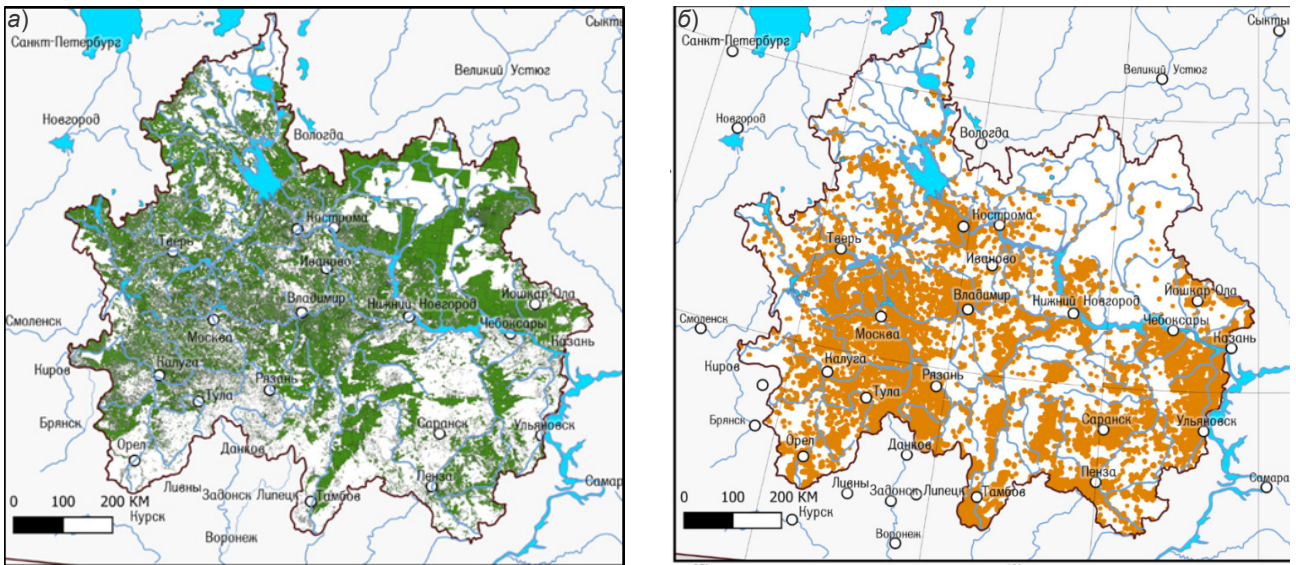


Рис. 7. Территории сельхозугодий и лесов на водосборе Верхней Волги (а), соотношение по данным OSM (б)

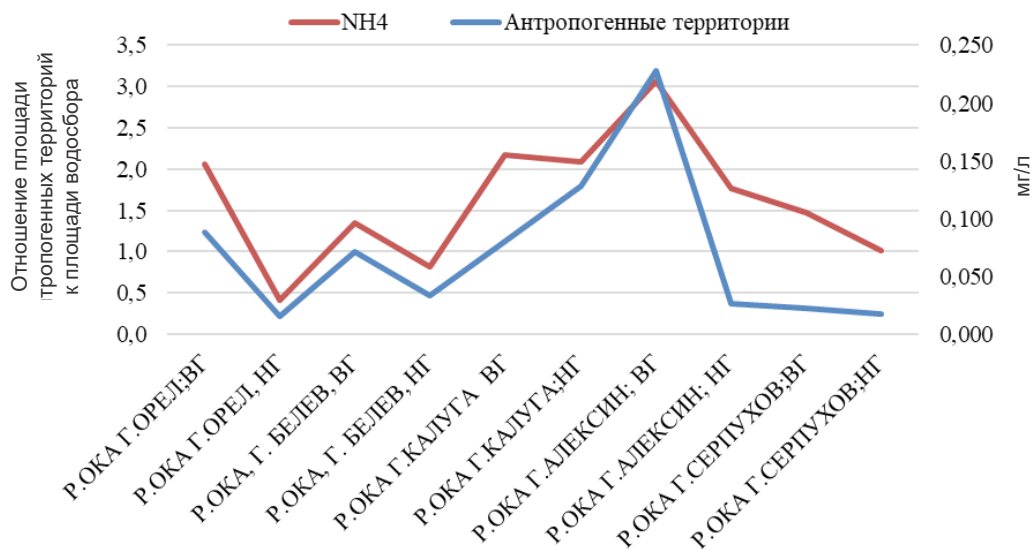


Рис. 8. Корреляция между содержанием азота аммонийного и площадями антропогенных территорий городских агломераций в бассейне Оки

релируют с территориями сельскохозяйственных угодий сходным образом ($r = 0,66, p < 0,05$).

Данный анализ может лишь указать на существующую взаимосвязь между определенным типом землепользования и концентрациями веществ в поверхностных водах. Минусом является невозможность определить качество связи в связи с отсутствием данных по производству на промышленных территориях, плотности населения на жилых территориях, количеству вно-

сов удобрения на сельскохозяйственные поля и по поголовью скота.

Площади лесов на межгородских территориях показывают обратные корреляции для большинства исследуемых химических ингредиентов. Наиболее значимые корреляции отмечаются для азота аммонийного ($-0,5$) и азота нитратного ($-0,4$). Концентрации железа показывают положительную корреляцию ($0,4$). Отрицательная корреляция объясняется низкой степенью антропогенного воздействия на наиболее залесенных

водосборах. Положительная корреляция площади лесов с содержанием железа, вероятно, связана с тем, что остатки хвойной растительности дают кислую реакцию, что способствует переходу соединений железа в более мобильные формы.

Заключение

Практически по всему бассейну р. Оки наблюдается напряженное состояние качества воды. Наиболее загрязненными остаются реки Москва и Клязьма за счет влияния крупных городов и промышленных предприятий, а также недостаточно очищенных сточных вод.

Оценка влияния точечных и диффузных источников показывает, что азот аммонийный, азот нитритный, нефтепродукты, трудноокисляемые и легкоокисляемые вещества коррелируют более тесно с точечными источниками, чем с диффузными, что связано с непосредственной близостью источника загрязнения к точке пробоотбора. Несмотря на превышение ПДК по ряду компонентов, самоочищающая способность реки достаточна для того, чтобы эффект от поступления органического вещества и биогенных веществ с городских территорий не накапливался по течению реки.

Благодарности

Работа проводилась в рамках научной программы Института водных проблем, проект № АААА-А18-118022090056-0.

Литература

1. Абрамова, Е. А. (2011). Оценка уровня антропогенной нагрузки на бассейн реки Оки в пределах Московской области. Электронный журнал «Вестник Московского государственного областного университета», № 2. сс. 20–26.
2. Григорьев, В. Ю., Фролова, Н. Л. и Джамалов, Р. Г. (2018). Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 4. сс. 36–47.
3. Джамалов, Р. Г., Мягкова, К. Г., Никаноров, А. М., Решетняк, О. С., Сафронова, Т. И. и Трофимчук, М. М. (2017). Гидрохимический сток рек бассейна Оки. Вода и экология: проблемы и решения, № 4, сс. 26–39. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.22.4.26–39.
4. Джамалов, Р. Г., Никаноров, А. М., Решетняк, О. С., Мягкова, К. Г. и Сафронова, Т. И. (2017). Качество вод бассейна р. Оки и степень их загрязнения. Избранные труды Института водных проблем РАН: 1967–2017, Т. 2, сс. 671–689.
5. Джамалов, Р. Г., Никаноров, А. М., Решетняк, О. С. и Сафронова, Т. И. (2017). Воды бассейна Оки: химический состав и источники загрязнения. Вода и экология: проблемы и решения, № 3, сс. 114–132. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.21.3.114–132.

6. Джамалов, Р. Г., Решетняк, О. С. и Трофимчук, М. М. (ред.) (2020). Гидрохимический сток рек Европейской части России. Атлас. М.: ИВП РАН, 155 с.

7. Джамалов, Р. Г. и Фролова, Н. Л. (ред.) (2015). Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России. М.: ИВП РАН, 96 с.

8. Джамалов, Р. Г. и Фролова, Н. Л. (ред.) (2015). Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России. М.: ГЕОС, 320 с.

9. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (2014). Р 52.24.819–2014. Рекомендации. Оценка антропогенной нагрузки на речные экосистемы с учетом их региональных особенностей. Ростов н/Д: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 35 с.

10. Орлов, М. С., Абрамова, Е. А. и Щерба, В. А. (2014). К оценке антропогенной нагрузки на воды речных бассейнов Подмосковья и Крыма. Геополитика и экогеодинамика регионов, т. 10, Вып. 2, сс. 681–684.

11. Решетняк, О. С. (2018). Антропогенная нагрузка и изменчивость состояния экосистем на различных участках реки Ока. Вода: химия и экология, № 7–9 (116), сс. 110–118.

12. Решетняк, О. С., Лямперт, Н. А. и Гришанова, Ю. С. (2015). Пространственная изменчивость химического состава и качества воды р. Ока. В: Материалы научной конференции с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод», т. 2, ч. 2. Ростов н/Д: Гидрохимический институт, сс. 278–282.

13. Решетняк, О. С., Никаноров, А. М., Трофимчук, М. М. и Гришанова, Ю. С. (2017). Оценка гидроэкологического риска в бассейне реки Ока. Вода и экология: проблемы и решения, № 3, сс. 158–170. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.21.3.159–171.

14. Федеральная служба государственной статистики (2020). Окружающая среда [online]. Доступно по ссылке: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> [Дата обращения: 15.06.2020].

15. Dzhmalov, R. G., Vlasov, K. G., Myagkova, K. G., Reshetnyak, O. S., and Safronova, T. I. (2019). The space and time variations of water quality and water pollution dynamics in the Oka basin. *Water Resources*, Vol. 46, Suppl. Issue 1. pp. 74–84. DOI: 10.1134/S0097807819070078.

16. Wilks, D. S. (2006). On “field significance” and the false discovery rate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 45, Issue 9, pp. 1181–1189. DOI: 10.1175/JAM2404.1.

Reference

1. Abramova, E. (2011). The estimation of the level of anthropogenic loading on the Oka basin within Moscow region. *Bulletin of the Moscow Region State University (electronic journal)*, No. 2, pp. 20–26.
2. Grigoryev, V. Y., Frolova, N. L. and Dzhmalov, R. G. (2018). The water balance change of large river basins of the European Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, No. 4, pp. 36–47.
3. Dzhmalov, R. G., Myagkova, K. G., Nikanorov, A. M., Reshetnyak, O. S., Safronova, T. I. and Trofimchuk, M. M. (2017). Hydrochemical runoff of the Oka basin's rivers. *Water and Ecology*, No. 4, pp. 26–39. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.22.4.26–39.
4. Dzhmalov, R. G., Nikanorov, A. M., Reshetnyak, O. S., Myagkova, K. G. and Safronova, T. I. (2017). Water quality in the Oka River basin and the degree of its pollution. *Selected*

Works of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences: 1967–2017, Vol. 2, pp. 671–689.

5. Dzhamaalov, R. G., Nikanorov, A. M., Reshetnyak, O. S. and Safronova, T. I. (2017). The water of the Oka River basin: chemical composition and sources of pollution. *Water and Ecology*, No. 3, pp. 114–132. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.21.3.114–132.

6. Dzhamaalov, R. G., Reshetnyak, O. S. and Trofimchuk, M. M. (eds.) (2020). *Hydrochemical runoff of rivers in European Russia. Atlas*. Moscow: Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, 155 p.

7. Dzhamaalov, R. G. and Frolova, N. L. (eds.) (2015). *Atlas of renewable water resources in European Russia*. Moscow: Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, 96 p.

8. Dzhamaalov, R. G. and Frolova, N. L. (eds.) (2015). *Current resources of ground and surface waters in European Russia*. Moscow: GEOS, 320 p.

9. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation (2014). *R 52.24.819–2014. Recommendations. Assessment of the anthropogenic load on river ecosystems with account for their regional characteristics*. Rostov-on-Don: Roshydromet, Hydrochemical Institute, 35 p.

10. Orlov, M., Abramova, E. and Shcherba, V. (2014). Estimating the anthropogenic load on water river basins near Moscow and Crimea. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, Vol. 10, Issue 2, pp. 681–684.

11. Reshetnyak, O. S. (2018). The anthropogenic load and variability of ecosystems conditions in various sites of the Oka River. *Water: Chemistry and Ecology*, No. 7–9 (116), pp. 110–118.

12. Reshetnyak, O. S., Lyampert, N. A. and Grishanova, Yu. S. (2015). Spatial variability of the chemical composition and water quality of the Oka River. In: *Proceedings of the Scientific Conference with International Participation “Modern problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality”*, Vol. 2, Part 2. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute, pp. 278–282.

13. Reshetnyak, O. S., Nikanorov, A. M., Trofimchuk, M. M. and Grishanova, Yu. S. (2017). Estimation of hydroecological risk in the Oka river basin. *Water and Ecology*, No. 3, pp. 158–170. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.21.3.159–171.

14. Federal State Statistics Service (2020). Environment [online]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> [Date accessed June 15, 2020].

15. Dzhamaalov, R. G., Vlasov, K. G., Myagkova, K. G., Reshetnyak, O. S., and Safronova T. I. (2019). The space and time variations of water quality and water pollution dynamics in the Oka basin. *Water Resources*, Vol. 46, Suppl. Issue 1. pp. 74–84. DOI: 10.1134/S0097807819070078.

16. Wilks, D. S. (2006). On “field significance” and the false discovery rate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 45, Issue 9, pp. 1181–1189. DOI: 10.1175/JAM2404.1.

Авторы

Джамалов Рональд Гамидович, д-р геол.-минер. наук, профессор

ФГБУ «Институт водных проблем РАН», г. Москва, Россия

E-mail: roald@iwp.ru

Власов Константин Григорьевич, м.н.с.

ФГБУН «Институт водных проблем РАН», г. Москва, Россия

E-mail: vlkg99@gmail.com

Григорьев Вадим Юрьевич, м.н.с.

ФГБУН «Институт водных проблем РАН», г. Москва, Россия

E-mail: vadim308g@mail.ru

Галагур Кристина Геннадьевна, м.н.с.

ФГБУН «Институт водных проблем РАН», г. Москва, Россия

E-mail: kristina3286@yandex.ru

Решетняк Ольга Сергеевна, канд. геогр. наук, доцент

ФГБУ «Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону, Россия

Институт наук о Земле Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: olgare1@mail.ru

Сафронова Татьяна Ивановна, вед. инженер

ФГБУН «Институт водных проблем РАН», г. Москва, Россия

E-mail: tisafr@yandex.ru

Authors

Roald Gamidovich Dzhamaalov, DSc in Geology and Mineralogy, Professor

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: roald@iwp.ru

Konstantin Grigoryevich Vlasov, Junior Research Associate

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: vlkg99@gmail.com

Vadim Yuryevich Grigorev, Junior Research Associate

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: vadim308g@mail.ru

Kristina Gennadyevna Galagur, Junior Research Associate

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: kristina3286@yandex.ru

Olga Sergeyevna Reshetnyak, PhD in Geography, Associate Professor

Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia
Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

E-mail: olgare1@mail.ru

Tatiana Ivanovna Safronova, Lead Engineer

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: tisafr@yandex.ru