

## Критерии оценки экологического состояния водосборов малых рек и выноса биогенных веществ в Иваньковское водохранилище

Н.В. Кирпичникова ✉, В.О. Полянин,  
И.Е. Курбатова, Ю.Д. Черненко

✉ nkirp@list.ru

ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук»,  
Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В статье рассматривается подход к прямой и косвенной оценке биогенной нагрузки, формирующейся в пределах водосборов малых притоков Иваньковского водохранилища в условиях интенсивного изменения структуры землепользования и освоения водосборных территорий под коттеджное и дачное строительство в период 1980–2014 гг. На исследуемых реках, как и на их водосборах, не проводятся регулярные гидрологические и гидрохимические наблюдения. Между тем, рассматриваемые водные объекты относятся к источникам питьевого водоснабжения и поэтому их санитарно-экологическое состояние, а также количественные и качественные оценки поступления загрязняющих веществ с речными водами представляют особый практический интерес. **Методы.** Исследование базируется на проведении гидролого-гидрохимических наблюдений на малых реках и анализе динамики землепользования на основе картографических данных и космических снимков. **Результаты.** Выработан критерий, позволяющий получить относительно простую оценку самоочищающей способности водотоков в условиях сильной ограниченности данных мониторинга. Оценочные расчеты выноса биогенных веществ (общего азота и общего фосфора) с талыми и дождевыми водами с пашен, расположенных в пределах исследуемых водосборов, показывают, что вклад малых рек в загрязнение участков акватории Иваньковского водохранилища, тяготеющих к их устьям, весьма значителен.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** малые реки, биогенная нагрузка, источники загрязнения воды, геоэкологический мониторинг, космические снимки.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0002 Государственного задания Института водных проблем Российской академии наук.

© Кирпичникова Н.В., Полянин В.О., Курбатова И.Е., Черненко Ю.Д., 2021

**Для цитирования:** Кирпичникова Н.В., Полянин В.О., Курбатова И.Е., Черненко Ю.Д., Критерии оценки экологического состояния водосборов малых рек и выноса биогенных веществ в Ивановское водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 6. С. 81-105. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-5.

Дата поступления 15.09.2021.

**CRITERIA FOR ASSESSMENT OF THE SMALL RIVERS  
CATCHMENT ECOLOGICAL STATE AND THE FLOW  
OF NUTRIENTS INTO THE IVANKOVO RESERVOIR**

**Natalya V. Kirpichnikova** ✉, **Vladislav O. Polyandin**, **Irina E. Kurbatova**,  
**Yulia D. Chernenko**

✉ nkirp@list.ru

*Institute of Water Problems Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

**ABSTRACT**

**Significance.** The paper considers an approach to direct and indirect assessment of nutrient loads based on both time series field observations in tributaries of Ivankovo reservoir and satellite imagery in the period (1980–2014) of the land use structure active changing and development of the catching area. The rivers under study as well as their catchment territories were not subjected to regular hydrological and hydro/chemical observations. Meanwhile, the water bodies under study are sources of drinking water supply and their sanitary-ecological status, as well as quantitative and qualitative assessments of pollutants input with river waters have special practical significance. **Methods.** This research is based on hydrological/hydro/chemical observations of small rivers and analysis of the dynamics of the land use based on map data and satellite images. **Results.** The study suggests an ecological criterion for relatively simple evaluation of stream ability to mitigate water pollution under conditions of scarcity in monitoring data. Estimations of the nutrients (total nitrogen and total phosphorous) carryover with snow-melt and rain waters from arable lands located within the catchment areas under study show that the small rivers' contribution to polluting of the Ivankovo reservoir ranges close to their mouths is rather significant.

**Keywords:** small rivers, nutrient load, water pollution sources, geo/ecological monitoring, satellite imagery.

**Financing:** The work has been done in the framework of theme No. 0147-2019-0002 of the State Assignment for the Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems.

**For citation:** Kirpichnikova N.V., Polyandin V.O., Kurbatova I.E., Chernenko Y.D. Criteria for assessment of the small rivers catchment ecological state and the flow of nutrients into the Ivankovo reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 6. P. 81-105. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-6-5.

Received 15.09.2021.

## ВВЕДЕНИЕ

Экологическое состояние малых рек служит индикатором негативных тенденций, связанных с формированием экологических рисков более крупных речных систем и водохранилищ, притоками которых они являются. Эти риски проявляются в ухудшении качества воды и условий водопользования, усилении эвтрофирования, снижении экономической ценности и туристического потенциала прилегающих земель, сокращении биоразнообразия и в долгосрочной перспективе создают предпосылки для утраты водными объектами своих экосистемных функций. По данным ежегодных государственных докладов о состоянии окружающей среды и ряда научных исследований<sup>1</sup> для многих речных бассейнов в пределах Центральной России характерны интенсификация процессов загрязнения водных объектов, зарастания и обмеления рек, ведущих к сокращению протяженности гидрографической сети в основном за счет деградации малых водотоков.

Высокая значимость и целесообразность исследования малых рек определяется рядом характерных особенностей данных водных объектов:

- относительно небольшие дренируемые площади и расходы воды определяют высокую уязвимость малых рек к антропогенным воздействиям;
- ухудшение экологического состояния малых рек представляет один из основных предикторов развития негативных процессов большего масштаба, которые можно выявить и предотвратить на ранних стадиях развития;
- относительно небольшие размеры водосборов позволяют проводить на них локальные природоохранные мероприятия и получать более быстрый и измеряемый эффект от их реализации, чем на крупных речных бассейнах;
- на небольших водосборах легче получить представление об условиях формирования качества воды, проводить мониторинг с одновременным отслеживанием хозяйственной деятельности на водосборной территории, т. е. получать достоверные связи в системе «воздействие–отклик»;
- состояние ручьев и малых рек легче контролировать, в т. ч. с привлечением общественности и негосударственных экологических организаций.

Особый интерес представляет исследование малых рек, относящихся к источникам питьевого водоснабжения, их санитарно-экологического состояния и тенденций его изменения, условий самоочищения и оценки поступления загрязняющих веществ с водосборной территории.

В данной работе в обсуждаемом аспекте представлен сравнительный анализ результатов различных методов наблюдений за качеством воды на

<sup>1</sup> Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». Минприроды РФ. М., 2017.

притоках Иваньковского водохранилища – крупнейшего водного объекта в системе водоснабжения Москвы, выполнена количественная оценка объемов выноса загрязняющих веществ, содержащих азот и фосфор, и способствующих эвтрофированию водохранилища, исследован подход к выбору критериев ранжирования малых рек по водному стоку, характеру антропогенной нагрузки, уровням выноса биогенных элементов, способности рек к самоочищению.

В последние годы ощущается дефицит наземных наблюдений, представлявших оперативную информацию о состоянии водохранилища: сеть наземных систематических наблюдений за поступлением загрязняющих веществ с водосборов малых рек отсутствует; специальные тематические экспедиционные исследования, направленные на оценку влияния рассредоточенных источников диффузного загрязнения, значительно сокращены.

В этих условиях организация геоэкологического мониторинга по любому из видов неконтролируемой антропогенной нагрузки является весьма сложной задачей. Возможны следующие подходы:

- организация комплекса наземных наблюдений и экспедиционных работ на ключевых участках водосборов боковых притоков и их устьях в паводковые и меженные периоды;
- совместное использование аэрофотосъемок, включая беспилотные летающие аппараты (БПЛА), и наземных наблюдений;
- совместное использование дистанционной, картографической информации, ГИС-технологий и соответствующих экспертных оценок (в условиях дефицита наземных данных).

Актуальность выполнения данной работы обусловлена необходимостью поиска альтернативных методов организации наблюдений и получения предварительных оценок объема загрязняющих веществ, поступающих в главный источник водоснабжения Москвы. Исследования включали два основных этапа: экспериментальный – проведение синхронных гидролого-гидрохимических съемок на рассматриваемых водотоках и дистанционный, – с помощью которого был выполнен анализ структуры землепользования на основе дешифрирования космических снимков разных лет.

Изучению гидрохимического состава вод малых боковых притоков Иваньковского водохранилища посвящено несколько публикаций, в которых, в основном, обсуждаются уровни осредненных сезонных концентраций без сравнительного анализа гидрологических сезонов, расчетных модулей выноса биогенных соединений и самоочищающей способности рек [1]. Некоторые оценки по балльной системе антропогенной нагрузки на водосборы малых притоков Иваньковского водохранилища приведены в работе [2]. Наиболее расширенный научный поиск в отношении процессов

самоочищения проведен авторами [3, 4] относительно р. Дойбицы. Выводы по этим работам и результатам спутникового мониторинга малых водосборов боковых притоков водохранилища [5, 6] сопоставлены в данной статье с результатами полевых экспедиционных обследований конца 1970-х – начала 1980-х годов и 1998 г.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были выбраны пять малых рек – правобережных притоков Ивановского водохранилища: Инюха, Гусевка, Сучок, Дойбица и Донховка (рис. 1).



**Рис. 1.** Картограмма боковых правобережных притоков Ивановского водохранилища (цифрами обозначены участки местного стока).

Fig. 1 Schematic map of lateral right bank tributaries of the Ivankovo reservoir (the figures indicate the local runoff sites).

Иваньковское водохранилище имеет статус эвтрофного водоема [7] и подвержено сильному «цветению» в теплый период года, несмотря на интенсивный водообмен. Следует отметить, что суммарно на долю малых рек, непосредственно впадающих в водохранилище, приходится не более 5 % общего притока воды [8]. Тем не менее, выбор объектов исследования был обусловлен следующими немаловажными факторами:

- недостаточной изученностью указанных рек, ввиду отсутствия на них постоянных постов наблюдений за речным стоком и гидрохимическим режимом;

- репрезентативностью для бассейна Иваньковского водохранилища условий формирования речного стока с антропогенно преобразованных водосборов;

- необходимостью изучения условий функционирования ландшафтно-экологического каркаса территории, одними из основных составляющих которого являются выбранные водные объекты [9];

- наличием данных экспедиционных гидрохимических наблюдений в многоводный период года (летние дождевые паводки) за 1983 и 1998 гг., т. е. до и после начала интенсивного изменения структуры хозяйственного использования земель (коттеджная застройка берегов водохранилища и образование на водосборах малых рек многочисленных садовых товариществ в конце 1980-х – середине 1990-х годов). Кроме того, до 1990-х годов в хозяйствах применялись достаточно высокие дозы удобрений, значительно сократившиеся к началу 2000-х годов [10].

В административно-территориальном отношении большая часть водосборной площади рассматриваемых рек расположена в пределах Конаковского района – крупнейшего по численности населения муниципального района в Тверской области<sup>2</sup>. Все реки имеют сходный гидрологический режим и условия питания, берут свое начало из болот, одинаковых по генезису и типу. Некоторые гидрологические характеристики исследуемых рек приведены в табл. 1.

По характеру антропогенной нагрузки реки подвержены влиянию диффузных источников загрязнения со стороны сельскохозяйственного сектора и селитебных территорий, но заметно отличаются по интенсивности общей антропогенной нагрузки на водосборную территорию (рис. 2).

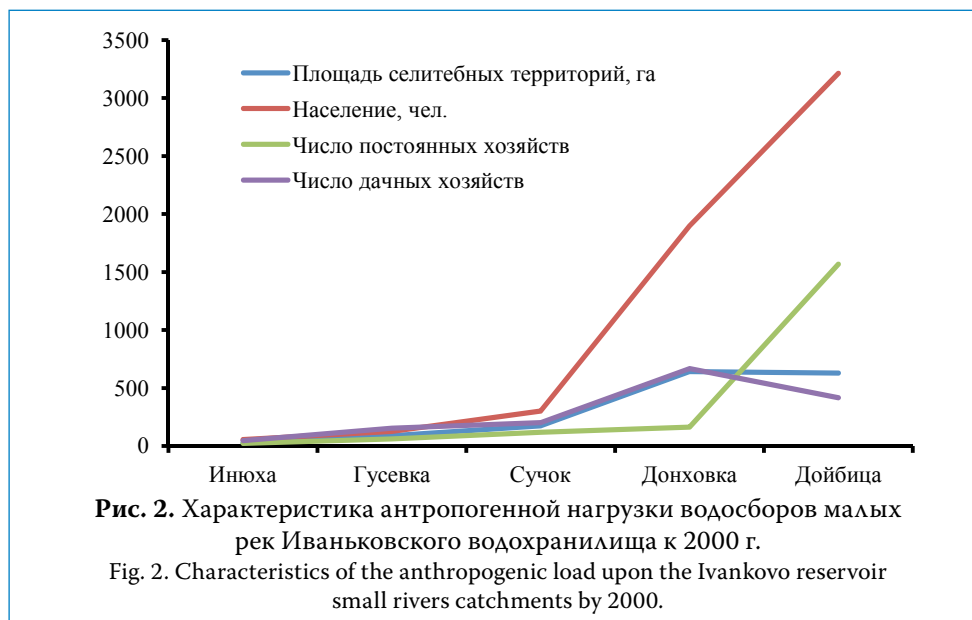
В пределах рассматриваемых водосборов расположены преимущественно уголья сельскохозяйственного предприятия «Шошинское». По данным

<sup>2</sup> Численность населения Тверской области по муниципальным образованиям. 2021. Официальный интернет-сайт территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Тверской области. Режим доступа: <https://tverstat.gks.ru/folder/26784> (дата обращения 05.09.2021).

**Таблица 1.** Основные характеристики малых рек Иваньковского водохранилища [11]

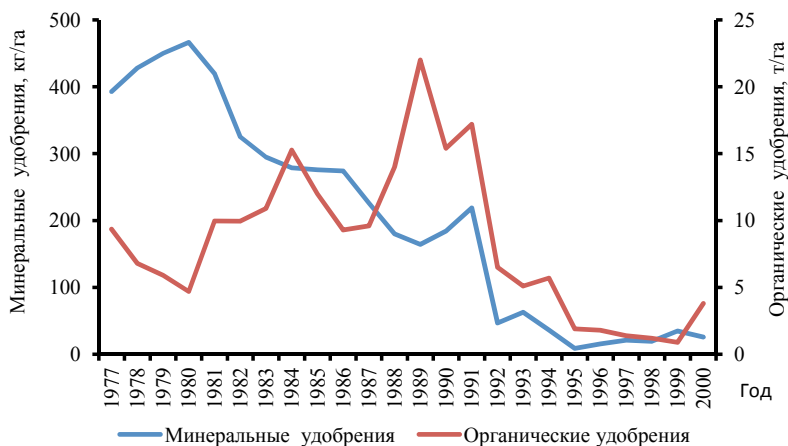
Table 1. Main characteristics of the Ivankovo reservoir small rivers

Приток	Длина, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средний много-летний сток		Годовой сток расчетной обеспеченности, м <sup>3</sup>		
			м <sup>3</sup> /год	м <sup>3</sup> /с	50 %	75 %	95 %
р. Дойбица	24	192	39,42	1,25	1,22	1,02	0,79
р. Донховка	27	158	32,48	1,03	1,00	0,84	0,65
р. Сучок	16,5	58,3	11,98	0,38	0,37	0,31	0,24
Приток	Минимальные среднемесячные расходы воды, м <sup>3</sup> /с						
	летний период				зимний период		
	50 %	75 %	85 %	95 %	50 %	95 %	
р. Дойбица	0,35	0,29	0,26	0,22	0,10	0,067	
р. Донховка	0,095	0,079	0,071	0,016	0,070	0,045	
р. Сучок	0,042	0,035	–	0,032	0,023	0,014	



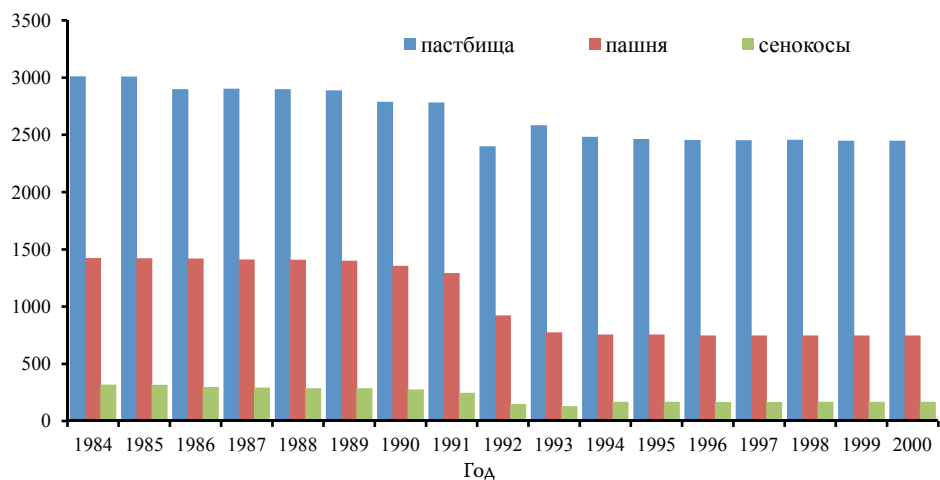
**Рис. 2.** Характеристика антропогенной нагрузки водосборов малых рек Иваньковского водохранилища к 2000 г.

Fig. 2. Characteristics of the anthropogenic load upon the Ivankovo reservoir small rivers catchments by 2000.



**Рис. 3.** Дозы минеральных и органических удобрений, применяемые в сельскохозяйственном предприятии «Шошинский» (Тверская область, Конаковский район, 1977–2000 гг.).

Fig. 3. Doses of mineral and organic fertilizers applied at the “Shoshinskiy” agricultural enterprise (Tver Oblast, Konakovo Rayon, 1977–2000).



**Рис. 4.** Динамика площадей сельскохозяйственных угодий в сельскохозяйственном предприятии «Шошинский» (Тверская область, Конаковский район, 1984–2000 гг.).

Fig. 4. Dynamics of agricultural land areas at the “Shoshinskiy” agricultural enterprise (Tver Oblast, Konakovo Rayon, 1984–2000)

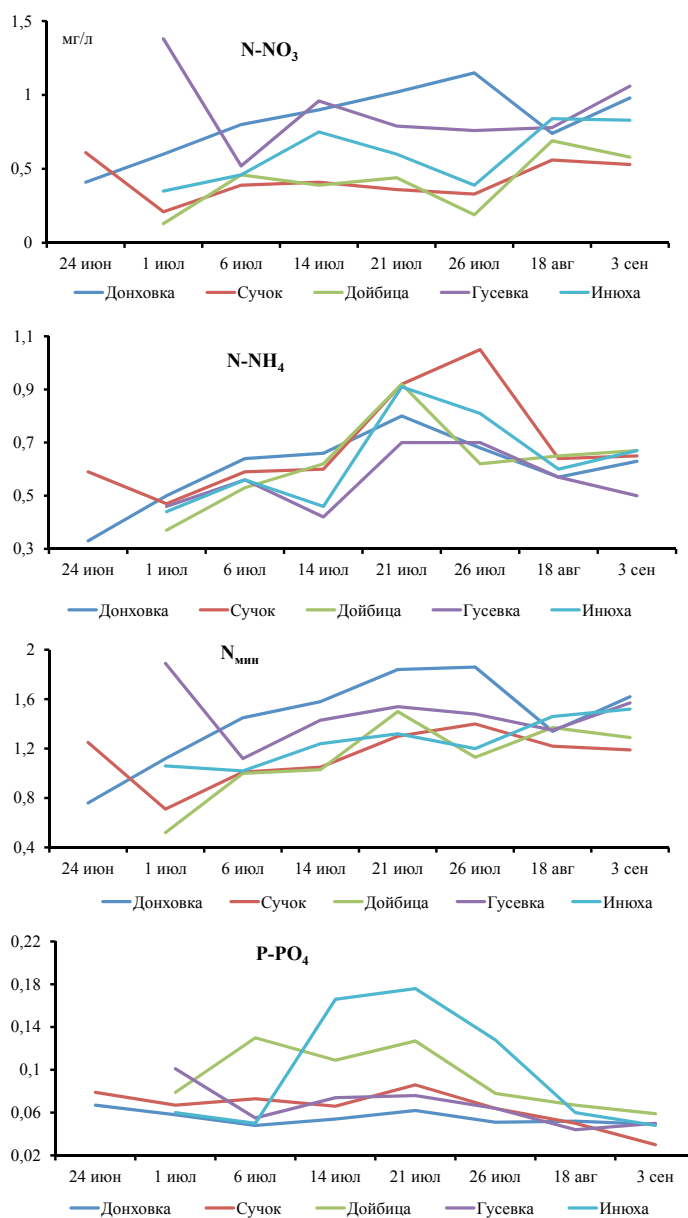


территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Тверской области, за период 1983–1998 гг. произошли значительные изменения в сельскохозяйственном секторе рассматриваемого района, особенно заметный спад в применяемых дозах удобрений наблюдался с 1992 г. (рис. 3). Однако относительно основных типов угодий уменьшилась только площадь пашни – в 1,5 раза (рис. 4).

**Методика проведения работ по геоэкологическому мониторингу.** Первый экспериментальный этап проведения работ включал синхронные гидролого-гидрохимические измерения, которые были организованы летом 1998 г. в период прохождения серии дождевых паводков. В замыкающих створах наблюдений площади водосборов составили: р. Инюха – 20,5 км<sup>2</sup>, р. Гусевка – 23 км<sup>2</sup>, р. Сучок – 46 км<sup>2</sup>, р. Донховка – 122,8 км<sup>2</sup>, р. Дойбица – 147,2 км<sup>2</sup>, т. е. охватывали бóльшую часть площади рассматриваемых водосборов. Работы включали организацию временных водомерных постов, измерение расходов воды при помощи гидрометрических вертушек с одновременным отбором проб воды в тех же створах. Параллельно проводили измерения сумточных сумм осадков при помощи осадкомера Третьякова, установленного в прибрежной зоне Ивановского водохранилища в районе д. Плоски. Расходы воды при помощи гидрометрической вертушки с одновременным отбором проб измеряли с частотой 2–3 раза в месяц; всего выполнено 52 измерения расходов воды с отбором проб. Анализ проб воды проводили в лаборатории Ивановской НИС (ИВП РАН) по следующим показателям: электропроводность, цветность, минерализация (катионово-анионовый состав), азот (нитратный, нитритный, аммонийный), фосфор (фосфор фосфатов, общий).

Следует отметить, что лето 1998 г. оказалось дождливым – сумма осадков составила за июль 138 мм (норма – 83 мм), за август – 117 мм (норма 76 мм). Первые измеренные расходы воды, выполненные во второй половине июня, и показатели качества воды характеризуют меженный период. Далее, с начала июля по начало сентября, весь период наблюдений (64 дня) характеризуется как паводочный. Расходы воды, измеренные в конце августа и начале сентября, были максимальными за весь период наблюдений и близки к максимальным расходам воды весеннего половодья того же года. Расходы воды за период наблюдений в основных створах реки изменялись в следующих пределах: р. Гусевка – от 0,026 до 0,77 м<sup>3</sup>/с; р. Инюха – от 0,035 до 0,92; р. Сучок – от 0,009 до 1,61; р. Донховка – от 0,042 до 3,07; р. Дойбица – от 0,13 до 3,20 м<sup>3</sup>/с.

Результаты гидрохимических наблюдений показали, что на пике паводка содержание нитратного и минерального азота было максимальным в р. Донховке, аммонийного азота – в р. Сучок, минерального фосфора – в р. Инюхе (рис. 5).



**Рис. 5.** Динамика нитратного, аммонийного, минерального азота и минерального фосфора в малых боковых притоках Иваньковского водохранилища в летний паводок 1998 г.

Fig. 5 Dynamics of nitrite, ammonia, and mineral nitrogen and mineral phosphorous in small lateral tributaries of the Ivankovo reservoir during the summer flood of 1998.

После того, как были получены оценки объемов и модулей выноса биогенных веществ, они сравнивались с аналогичными значениями результатов упомянутых выше исследований 1983 г.

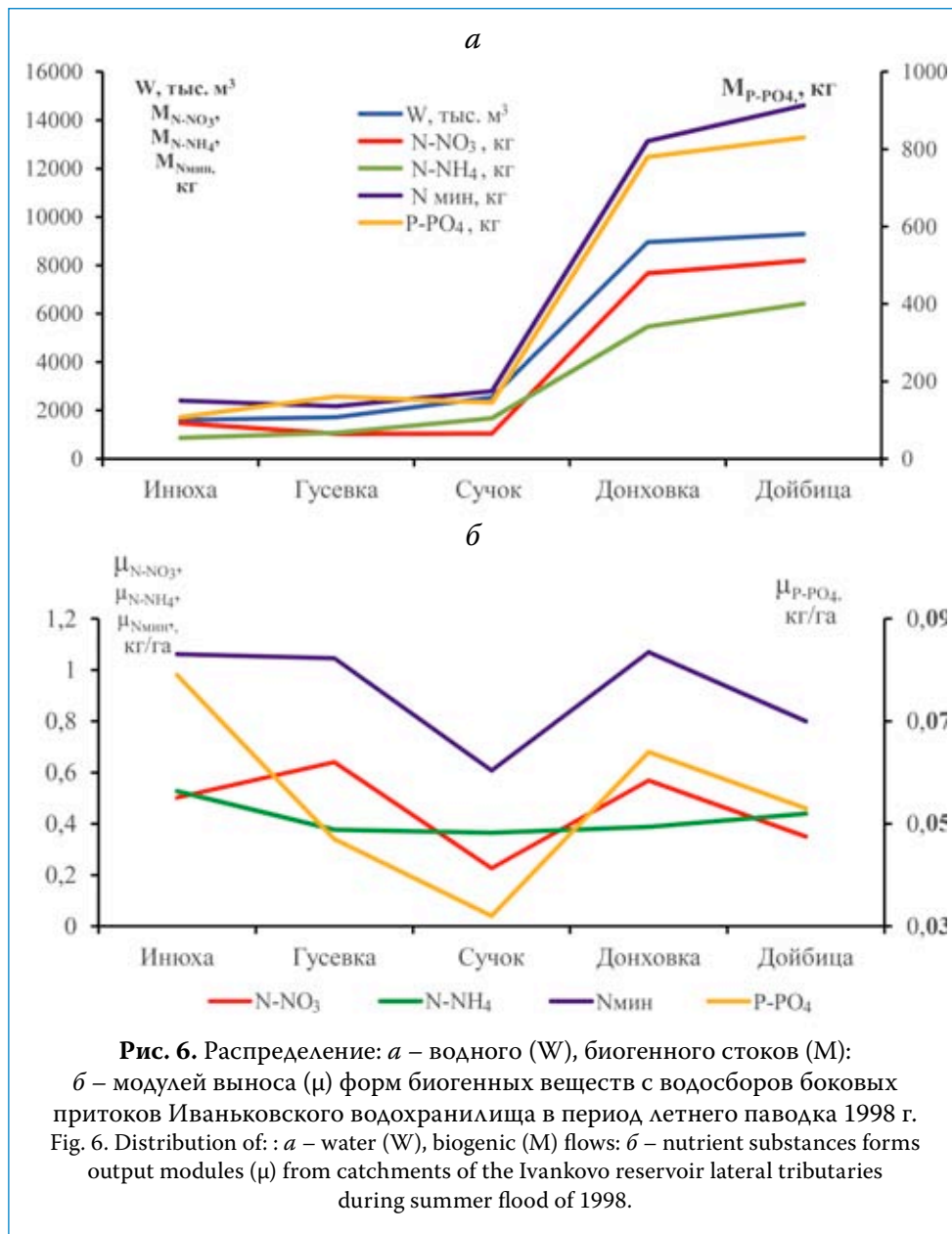
На втором этапе работ проводили сравнительный анализ изменения характера землепользования и степени антропогенной нагрузки по топографическим картам и космическим снимкам соответствующей территории водосборов, тяготеющей к Иваньковскому водохранилищу. Топокарты характеризуют состояние водосбора на конец 1970-х – начало 1980-х годов, космические снимки подбирали так, чтобы определить состояние местности на конец 1990-х годов и на современный период (2014 г.)

Поскольку на снимках отображены все компоненты природной среды и хозяйственного использования водосборов, в условиях дефицита наземных наблюдений это позволило проследить динамику трансформации элементов ландшафта, а также дать оценку современному состоянию территории. Обработка спутниковой информации включала привязку космических изображений к топографической основе, обновление содержания топографической карты, векторизацию изображения, определение топологических связей между объектами, их инвентаризацию, проведение необходимых расчетов и пространственного анализа. Исследования выполняли с помощью продуктов компании Adobe Systems (Illustrator, InDesign) в геоинформационной системе Quantum GIS.

Спутниковые изображения высокого разрешения оптимальны для выявления и инвентаризации объектов неконтролируемых загрязнений, имеющих площадной характер. Такого рода объекты, например, сельскохозяйственные поля и селитебные территории, имеют конкретную конфигурацию и визуально надежно распознаются на космических изображениях, не требуя дополнительных преобразований. Накопленный архивный фонд спутниковой информации позволяет осуществлять мониторинг источников антропогенных и природных загрязнений, определять характер природопользования, состояние водных объектов. На снимках отчетливо идентифицируются природные и антропогенные объекты (населенные пункты разных типов, отдельные строения, сады, пашни, животноводческие фермы, карьеры, полигоны ТБО и др.), в той или иной степени являющиеся источниками поступления загрязняющих веществ диффузного характера.

В распределении водного (W) и биогенного (M) стоков для исследуемых водосборов наблюдается общая закономерность: объем воды и общая масса стока биогенных соединений в створах рек синхронно возрастают от малых водосборов к более крупным. Соответственно, наибольшие массы биогенного стока имеют реки Дойбица и Донховка с максимальной площадью водосборов. Для сравнительной характеристики водосборов по интенсив-

ности выноса каждого биогенного соединения рассчитывали модуль смыва вещества с единицы площади водосбора  $\mu$  (кг/га) за период проведения эксперимента (рис. 6).



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных расчетов выявлены следующие закономерности. Минимальные значения модуля выноса большинства содержащих биогенные элементы веществ характерны для р. Сучок: 0,23 кг/га – для азота нитратов, 0,36 кг/га – для аммонийного азота, 0,61 кг/га – для минерального азота, 0,032 кг/га – для фосфора. Этот водосбор является наиболее чистым по всем рассчитанным модулям биогенного стока, что определяется меньшим воздействием диффузных источников загрязнения.

Вынос аммонийного азота для всех рек близок и меняется в довольно узких пределах – от 0,36 до 0,53 кг/га. По интенсивности выноса наиболее загрязнены биогенами водосборы рек Дойбицы и Инюхи. Причем р. Дойбица доминирует как с точки зрения общего объема загрязнения, выносимого в Иваньковское водохранилище, так и по удельным показателям. Следует отметить, что по результатам обработки проб воды р. Инюха показала максимальное для всех малых рек удельное загрязнение фосфатами.

В работе [3] выполнена аналогичная оценка выноса минерального азота для некоторых из исследованных рек. Так, расчетный вынос минерального азота со всего водосбора р. Дойбицы составил 1,59 кг/га в год, а р. Донховки – 5,46 кг/год. Учитывая тот факт, что в 1970-е годы в рассматриваемом районе в почву вносились высокие дозы удобрений [10] и приведенные в данной статье расчеты относятся только к одному паводочному сезону в период двух месяцев (1998 г.), полученные оценки вполне сопоставимы.

С позиции оценки экологического состояния малых рек в задачи исследований 1998 г. входило также изучение их самоочищающей способности. Результаты экспериментов приведены по р. Дойбице, для которой были выделены участки с разной антропогенной нагрузкой, проводились измерения расходов воды и концентрации биогенных соединений в воде с частотой один раз в 10 дней. Следует отметить, что створы наблюдений соответствовали тем, которые были установлены для аналогичных исследований в 1983 г. [4]. Это позволило провести сопоставление результатов наблюдений 1983 и 1998 гг. относительно выноса биогенов с данного водосбора и оценить самоочищающую способность реки с разным уровнем антропогенной нагрузки диффузного характера.

Сумма осадков в период эксперимента с 9 июня по 1 ноября 1983 г., согласно данным Росгидромета по метеорологической станции в г. Твери, составила 404 мм, измерения проводились в четырех створах, примерное расположение которых было определено и в 1998 г. (табл. 2).

**Таблица 2.** Морфометрические параметры экспериментальных створов на р. Дойбице в 1983 и в 1998 гг.

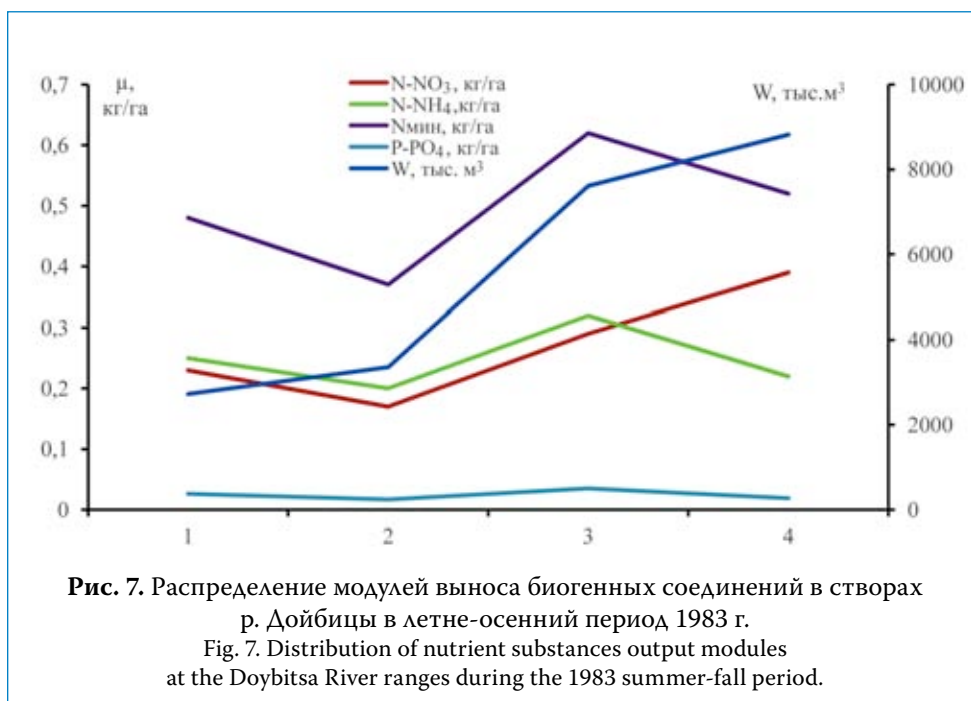
Table 2. Morphometric parameters of experimental ranges at the Doybitsa River in 1983 and 1998

Параметры	Створы наблюдений в 1983 г.			
	1	2	3	4
Длина от истока, км	4,8	7,0	13,2	18,6
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	52,5	76,8	122	145,1
	Створы наблюдений в 1998 г.			
Длина от истока, км	8,4	11,6	14,0	18,4
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	67,2	92,8	124	142,7

Следует отметить, что в летне-осенний период наблюдений 1983 г. значительное количество осадков выпало в июне (107 мм) и июле (167 мм), экстремальный дождь (46 мм) наблюдался 9 сентября. Общий объем притока по створам за весь период наблюдений изменялся от 2725 тыс. м<sup>3</sup> (створ № 1) до 8820 тыс. м<sup>3</sup> (створ № 4), т. е. увеличился в три раза.

В работе 1986 г. [4] отмечено, что в июле нитратный азот по длине реки увеличивался, в сентябре – снижался, фосфор фосфатов, наоборот, в июле по длине снижался, в сентябре наблюдался резкий всплеск в створе № 3. По средним значениям концентраций за период наблюдений преобладал аммонийный азот, в устьевом створе несколько выше была нитратная форма, значения минерального азота практически одинаковы во всех створах и близки к 1 мг/л. Фосфор фосфатов по длине реки колебался в пределах 0,03–0,07 мг/л.

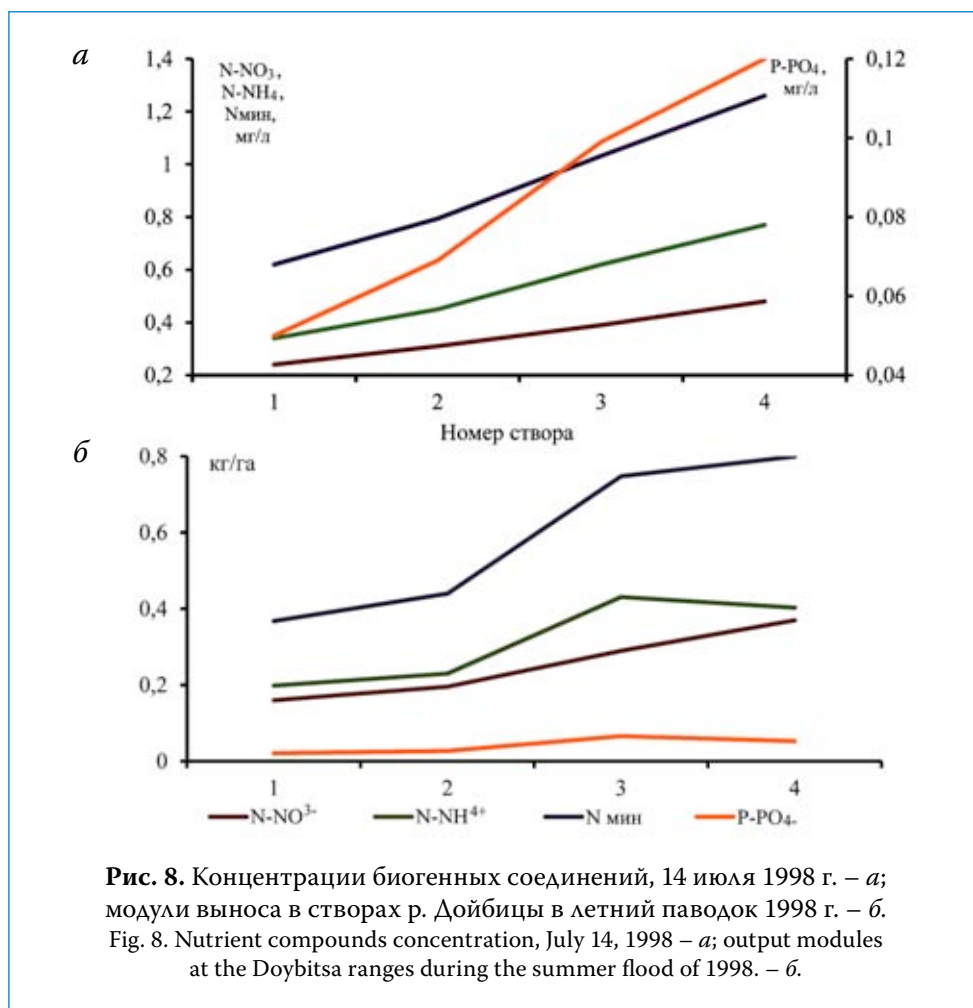
В условиях эксперимента 1983 г. для количественной оценки выносимых с водосбора р. Дойбицы биогенных элементов можно рассчитать модуль выноса. По исследованиям [4] авторами данной работы проведены расчеты модулей выноса биогенов и отмечено, что по длине реки к устьевому створу возрастает вынос нитратного азота – от 0,2 до 0,4 кг/га. Это обусловлено тем, что именно на устье реки приходилась наибольшая доля сельскохозяйственных угодий и постоянных хозяйств. Вынос аммонийного азота примерно одинаков по длине реки – 0,2–0,3 кг/га. Фосфор фосфатов выносятся в пределах 0,017–0,035 кг/га, но одинаков как в истоке, так и в замыкающем створе (рис. 7), на участке от створа № 2 к створу № 3 резко возрастает, что связано с нарастанием воздействия диффузных источников загрязнения (в основном за счет увеличения площади селитебных территорий) и точечных сточных вод.



В период летнего паводка 1998 г. при значительном увеличении водности в створе № 4 концентрации азотных форм были практически на одном уровне, содержание минерального фосфора в начале паводка резко увеличилось от 0,035 до 0,13 мг/л, но далее в процессе разбавления уменьшилось до начальных значений (рис. 4). Однако все измерения показали, что по мере увеличения расходов воды от истока к устью концентрации биогенных соединений нарастают (рис. 8а). Интенсивность выноса биогенных соединений от истока к устью увеличивалась по всем формам азота и незначительно по минеральному фосфору (рис. 8б).

Таким образом, по отношению к азоту проявлялось влияние нарастающей к устью площадной нагрузки селитебных территорий. За рассматриваемый период 1983–1998 гг. по параметрам диффузных источников загрязнения увеличилась численность населения, число постоянных хозяйств, а также садовых товариществ, не оборудованных системами канализации (рис. 9).

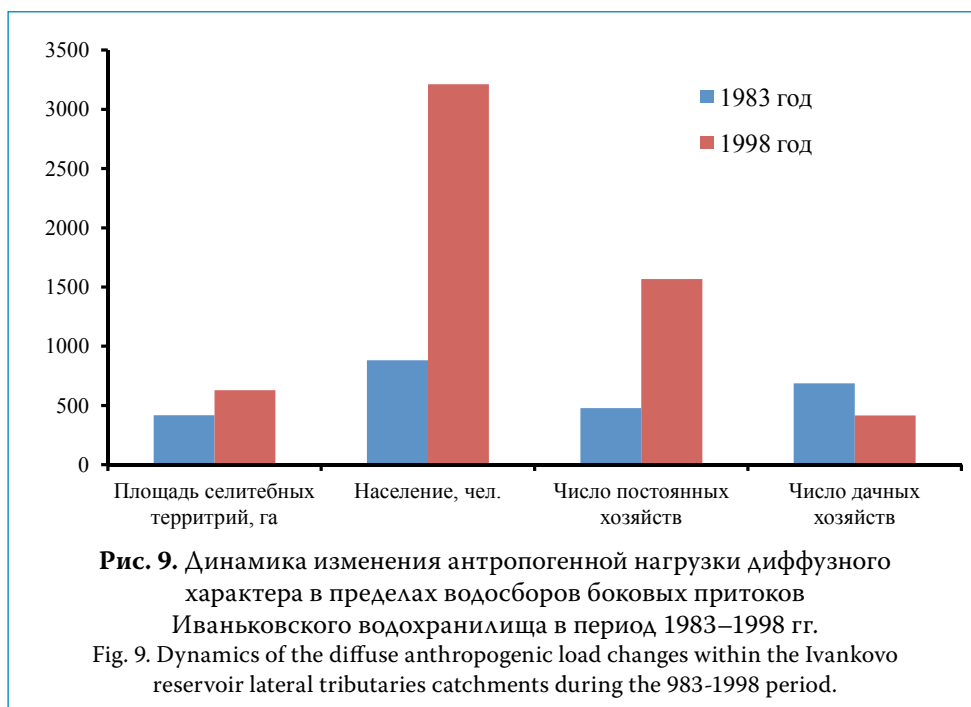
Очевидно, что такая нарастающая динамика может компенсировать уменьшение доз вносимых на поля удобрений (рис. 3), что частично объясняет относительно близкие значения удельного выноса биогенных элементов для сравниваемых периодов времени.



Важным фактором в оценке самоочищающей способности экосистемы водотока является интенсивность процессов нитрификации ( $I_{\text{нитр}}$ ), которая определяется по отношению концентрации азота нитратного  $\text{N-NO}_3^-$  к концентрации азота общего минерального  $\text{N}_{\text{мин}}$ . [12]:  $I_{\text{нитр}} = \text{N}(\text{NO}_3^-) \cdot 100 / \text{N}_{\text{мин}}$ , %, где  $\text{N}_{\text{мин}} = \text{N}(\text{NO}_3^-) + \text{N}(\text{NO}_2^-) + \text{N}(\text{NH}_4^+)$ .

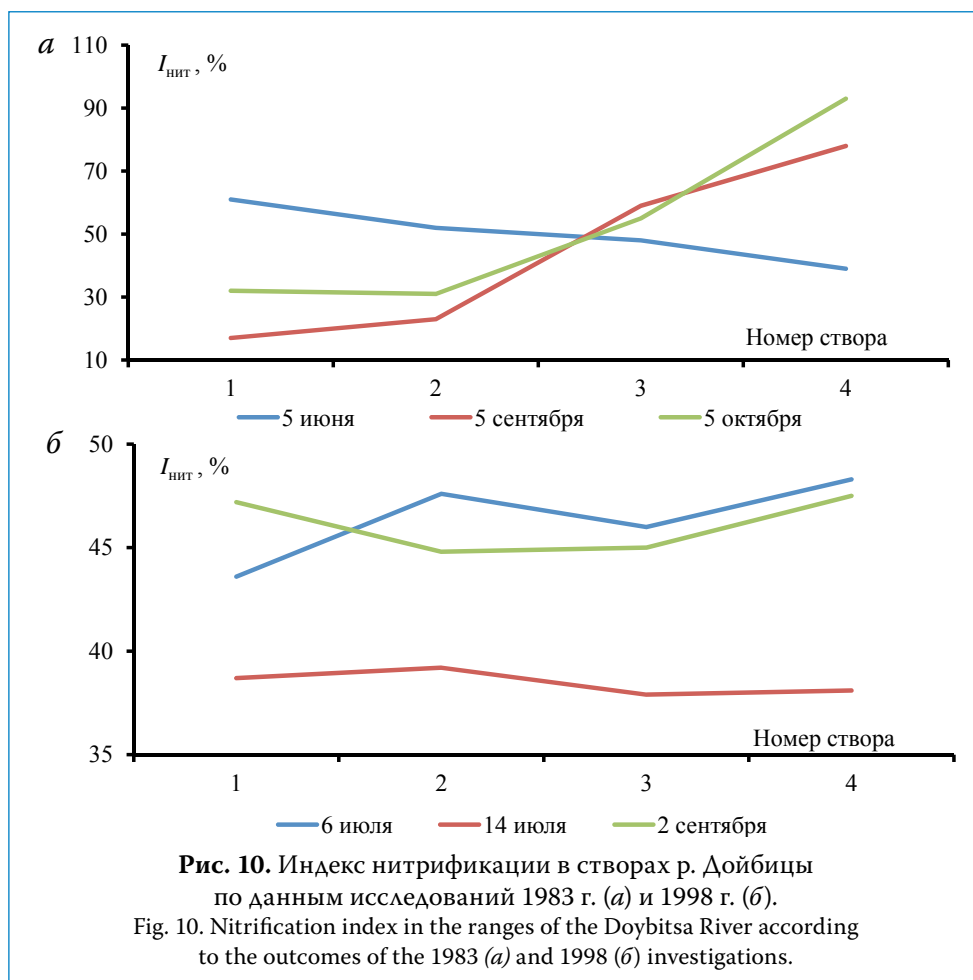
По данным исследований 1983 г., индекс нитрификации изменялся незначительно с понижением к устью в период межени (измерения 5 июня). После прохождения серии дождей (измерения 5 сентября и 5 октября) в процессе наполнения русла водой заметно возросла способность реки к самоочищению, по индексу нитрификации 80–90 % (рис. 10а).





Индекс нитрификации р. Дойбицы от истока к устью летом 1998 г. изменялся незначительно в пределах 40–50 %, т. е. способность к самоочищению была очень слабой (рис. 10б). Все постворные измерения проводились после интенсивных ливней, и река явно не справлялась с дополнительным стоком биогенов с водосбора. Вследствие нарастания нагрузки на водосбор р. Дойбицы по индексу нитрификации можно сделать вывод, что поверхностный сток дождевого паводка приносит массы биогенных соединений, критически влияющие на выполнение самоочищающей функции малой реки.

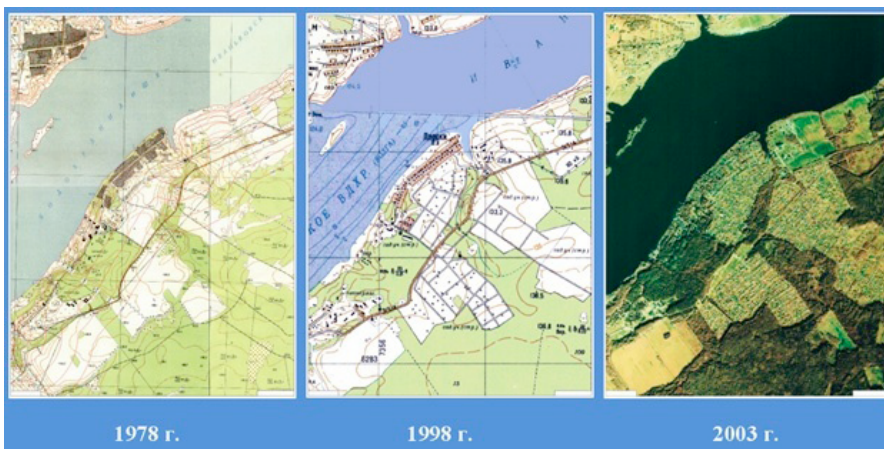
**Оценка выноса загрязняющих веществ по результатам анализа структуры землепользования по картографическим материалам и спутниковым данным.** Сравнительный анализ топографических карт масштаба 1:100 000 (1980–1983 гг.) и космических изображений 2003–2014 гг. проводился в качестве дополнительной оценки характера антропогенной нагрузки на водосборы рассматриваемых рек. Он показал, что наиболее интенсивное освоение водосборов малых рек включает прибрежные полосы вдоль их русел и берегов водохранилища и приходится на конец 1990-х – начало 2000-х годов [13], причем плотным коттеджным строительством охвачены земли непосредственно у уреза воды (рис. 11). Такой неконтроли-



руемый и нерегулируемый процесс не только противоречил положениям действующего на тот момент Водного кодекса Российской Федерации<sup>3</sup>, но и негативно отразился на общей экологической ситуации в границах водосборов малых рек. Этот фактор стал одной из наиболее существенных причин их деградации и ухудшения качества воды водохранилища в многоводные фазы гидрологического режима [14].

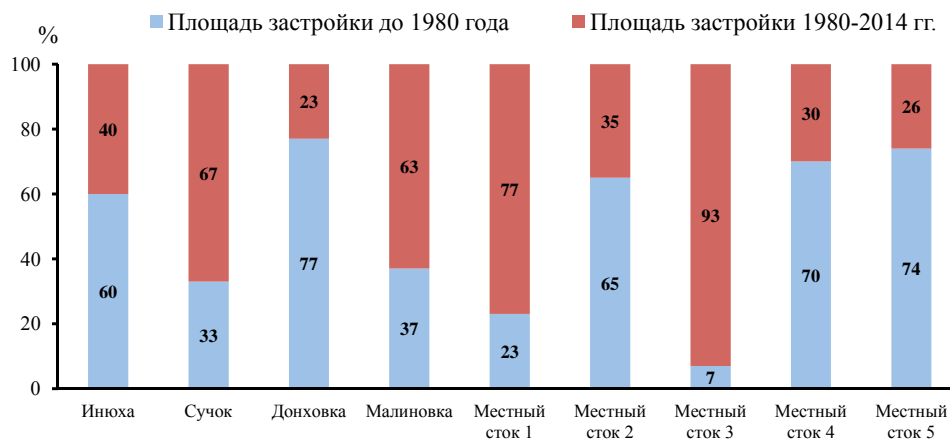
Синтез топографических карт и космических изображений (рис. 11) позволил оценить увеличение площади селитебных территорий и провести необходимые расчетные и графические работы. На рис. 12 представлена диаграмма прироста площадей селитебных территорий (в т. ч. коттеджных

<sup>3</sup> Водный кодекс Российской Федерации от 16.11.1995. № 167-ФЗ.



**Рис. 11.** Геоэкологический мониторинг динамики коттеджно-дачной застройки в береговой зоне Иваньковского водохранилища по топографическим картам (масштаба 1:100 000) и космоснимку (источник – Яндекс карты).

**Fig. 11.** Geo/ecological monitoring of the dynamics of cottage building in the bank zone of the Ivankovo reservoir according to the topographic maps (1:100 000 scale) and a satellite image (the source: Yandex maps).



**Рис. 12.** Динамика площадей селитебных территорий в пределах водосборов малых боковых притоков Иваньковского водохранилища.

**Fig. 12.** Dynamics of potentially intended for development territories within the limits of the Ivankovo reservoir small lateral tributaries catchments.

поселков и дачных садовых товариществ), дополнительно включающая водосбор правобережного притока р. Малиновка и местного стока (согласно нумерации на рис. 1). Площадь застройки 2014 г. принималась за 100 %. Как следует из диаграммы, больший прирост площадей наблюдается у водосборов рек Инюха, Сучок, Малиновка и руч. Плоски (местный сток 3).

По космическим снимкам прослеживается неравномерность пространственного распределения населенных пунктов и их тяготение к береговой зоне, что позволяет сделать вывод о значительном увеличении объемов поступающих в водохранилище загрязняющих веществ.

На основе геоэкологического мониторинга проведен анализ топографических карт и космической информации, а также расчеты площадей населенных пунктов, расположенных в двухкилометровой береговой зоне. Установлено, что в 1980 г. суммарная площадь населенных пунктов в прибрежной зоне составляла около 10 км<sup>2</sup>, а в 2014 г. – 17,5 км<sup>2</sup>, т. е. площадь застройки увеличилась на 75 %. Для отдельных участков, тяготеющих к устьям малых рек – значительно больше [6].

Подход к определению объема азота и фосфора, поступающего с природных и природно-хозяйственных территорий, базируется на использовании осредненных экспертных данных, полученных экспериментальным путем на опытных полигонах, близких по природным условиям к исследуемому. По результатам дешифрирования территория каждого водосбора была районирована по степени антропогенной нарушенности: ненарушенные (ООПТ, леса, болота), слабо нарушенные (пастбища, луга, сенокосы) и интенсивно нарушенные (пашни и т. д.) территории. В данной работе количество биогенных веществ, выносимых талыми снеговыми и дождевыми водами с каждого водосбора (табл. 3), рассчитывалось по экспертным оценкам, приведенным в работе [15] (табл. 4).

Расчеты показали, что самое большое количество биогенных веществ выносятся за год с водосборов рек Инюхи и Дойбицы. Доля всех пашен от суммарной площади рассматриваемых водосборов составляет всего 7,2 %. Вместе с тем, объемы суммарного выноса фосфора по предварительным оценкам [15] могут составить от 1,7 до 3,4 т в год, азота общего – от 10 до 17 т.

Таким образом, привнос биогенных веществ в водохранилище с боковым притоком может быть довольно существенным, даже если рассматривать какой-то один источник загрязнения (например, пашни), занимающий относительно небольшой процент от площади водосбора. Несмотря на то что массовые значения выноса биогенных элементов получены косвенным путем, они могут быть использованы для предварительных оценок баланса загрязняющих веществ при отсутствии систематических наблюдений за

**Таблица 3.** Количество биогенных веществ, выносимых талыми снеговыми и дождевыми водами с площади пашен водосборов малых рек, кг/год  
Table 3. An amount of biogenic substances discharged with snow-melt and rain waters from arable areas of the small rivers catchments, kg/year [15]

Водосбор, река	Площадь водосбора, га	Площадь пашен		Фосфор общий, кг	Азот общий, кг
		га	в % от площади водосбора		
Инюха	5920	955	16,1	477–955	2865–4775
Гусевка	1434	40	2,8	20–40	120–200
Сучок	5830	73	1,3	36–73	219–365
Донховка	15 280	380	2,5	190–380	1140–1900
Дойбица	19 200	1960	10,2	980–1960	5880–9800
<b>ИТОГО</b>	<b>47664</b>	<b>3408</b>	<b>7,2</b>	<b>1682–3408</b>	<b>10 224–17 040</b>

**Таблица 4.** Количество веществ, выносимых с занятых различными угодьями территорий, кг/га в год [15]  
Table 4. An amount of substances discharged from various agricultural territories, kg/hectare per year [15]

Элементы ландшафта	Фосфор общий	Азот общий
Леса, болота	0,05–0,10	1–2
Луга, малоосвоенные земли	0,1–0,5	2–3
Обрабатываемые земли (пашни)	0,5–1,0	3–5

качеством воды. Дифференцирование водосборов по степени антропогенной нарушенности на основании результатов дешифрирования космической информации и использование экспертных оценок позволяют в первом приближении в условиях дефицита наземных наблюдений оценить объем поступления загрязняющих веществ (азота и фосфора) в водохранилище.

### ВЫВОДЫ

Полученные в рамках проведенной работы результаты показали принципиальную применимость и целесообразность использования комбинированного подхода к мониторингу качества воды, антропогенной нагрузки и экологического состояния малых рек – правобережных притоков Ивань-

ковского водохранилища в условиях недостатка гидроэкологической информации и интенсивного изменения структуры землепользования на исследуемой территории.

Экспериментальные гидрохимические исследования позволили напрямую оценить вынос отдельных форм азота и фосфора с водосборов малых рек за период проведения исследования. Рассчитанный по результатам полевых гидрохимических исследований индекс нитрификации в качестве критерия самоочищения речных вод показал, что в условиях многоводного летнего периода 1998 г. способности экосистемы р. Дойбицы восстанавливать исходное качество воды в отношении загрязнения биогенными элементами сильно ограничены практически на всем ее протяжении.

Привлечение полученной дистанционным путем информации позволило проследить изменения в структуре хозяйственного использования территории и определить долю пахотных земель от общей площади малых водосборов. На основе литературных данных по удельному выносу биогенных элементов были выполнены приближенные расчеты годовых объемов поступления общего азота и фосфора в Иваньковское водохранилище с исследуемой территории. Следует отметить, что объем выноса азота и фосфора сравнительно велик и может играть определяющую роль в ухудшении экологического состояния рек и их устьевых участков, расположенных в зоне влияния водохранилища.

Сравнительный анализ серии космических снимков и топографических карт позволил проследить динамику освоения прибрежных территорий под частное жилищное строительство и косвенным образом дополнительно оценить рост антропогенной нагрузки на водосборы малых рек – притоков Иваньковского водохранилища.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьева И.А., Ланцова И.В. Современное экологическое состояние малых притоков Иваньковского водохранилища // Гидротехническое строительство. 1999. № 7. С. 14–20.
2. Алексеевский Н.И., Гриневский С.О., Ефремов П.В., Заславская М.Б., Григорьева И.А. Малые реки и экологическое состояние территории // Водные ресурсы. 2003. Т. 30. № 5. С. 586–595.
3. Башкин В.Н. Вымывание азота и фосфора природными водами // Круговорот и баланс азота в системе почва–удобрение–растение–вода. М.: Наука, 1979. 118 с.
4. Бойченко В.К., Эйнон А.О., Ланцов В.Ф., Дмитриева Н.Г., Букреева О.П., Шимина Н.П. К вопросу о загрязнении и самоочищении воды в малой реке // Водные ресурсы. 1986. № 2. С. 102–110.
5. Кирпичникова Н.В., Курбатова И.Е. Динамика нарастания неконтролируемой антропогенной нагрузки на береговые зоны источников водоснабжения:

- разработка методов геоэкологического мониторинга // Сб. докладов Всеросс. научно-практ. конф. «Водные ресурсы России: современное состояние и управление». Сочи. 2018. 8–14 октября. Новочеркасск: Лик, 2018. С. 284–291.
6. Курбатова И.Е. Выявление современных тенденций формирования антропогенной нагрузки на Ивановское водохранилище и его водосборы: методы и подходы // Сб. Великие реки 2018. Тр. научного конгресса 20-го Международного научно-промышленного форума. 2018. Т. 1. С. 85–87. ISBN: 978-5-528-00299-6.
  7. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги / под ред. А.И. Копылова. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
  8. Абакумов В.А., Бреховских В.Ф. и др. Ивановское водохранилище. Современные проблемы и охрана. 2000. 74 с.
  9. Курбатова И.Е. Восстановление экологического каркаса речного бассейна как метод оздоровления водных экосистем // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: мат-лы VI Международной научно-практ. конф. Ч. 1. Майкоп: Изд-во ИП Кучеренко В.О., 2021. С. 168–178.
  10. Кирпичникова Н.В., Лапина Е.Е. Кудряшова В.В. Многолетняя динамика содержания азота и фосфора в грунтовых водах водосбора Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 536–545.
  11. Мирзоев Е.С., Мирзоев А.Е. Конаковский район: краеведческий справочник. Тверь: ДК «Современник», 1995. 98 с.
  12. Лаврентьева Г. В., Рева Е. В., Сынзыныс Б. И., Мирзеабасов О. А., Рогуленко А.В. Технология оценки экологического риска для малой реки // Вестник Российской академии наук. 2011. № 4. С. 28–36.
  13. Куприянова Е.И., Кирпичникова Н.В. Экологическое состояние водоохранной зоны Ивановского водохранилища и современные подходы его регулирования. Известия АН. 2003. Т. 6. С. 77–84.
  14. Гордин И.В., Кирпичникова Н.В., Куприянова Е.И., Харитонов В.А. Мониторинг застройки водоохранной зоны // Сб. докл. «Водоохранная зона: опыт практического применения и целесообразность развития». М., 2006. С. 45–49.
  15. Нежиховский Р.А. Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 92.

## REFERENCES

1. Grigorieva I.L., Lantsova I.V. Modern ecological state of small tributaries of the Ivankovo reservoir. *Hydraulic engineering construction*. 1999. No. 7. P. 14–20 (in Russ.).
2. Alekseevsky N.I., Grinevsky S.O., Efremov P.V., Zaslavskaya M.B., Grigorieva I.L. Small rivers and the ecological state of the territory. *Water resources*. 2003. Vol. 30. No. 5. P. 586–595 (in Russ.).
3. Bashkin V. N. Leaching of nitrogen and phosphorus by natural waters. *Cycle and nitrogen balance in the soil-fertilizer-plant-water system*. Moscow: Nauka, 1979. 118 p. (in Russ.).
4. Boychenko V. K., Einor L. O., Lantsov V. F., Dmitrieva N. G., Bukreeva O. P., Mishina N. P. On the issue of water pollution and self-purification in a small river. *Water resources*. 1986. No. 2. P. 102–110 (in Russ.).

5. Kirpichnikova N.V., Kurbatova I.E. Dynamics of the increase of uncontrolled anthropogenic load on the coastal zones of water supply sources: development of methods of geoecological monitoring. Collection of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference. *Water resources of Russia: current state and management*. Sochi. 2018. October 8-14. Vol. 1. Novocherkassk: Lik. 2018. P. 284–291 (in Russ.).
6. Kurbatova I.E. Identification of modern trends in the formation of anthropogenic load on the Ivankovo reservoir and its catchments: methods and approaches / *In Sat. Great Rivers 2018*. Tr. of the Scientific Congress of the 20th International Scientific and Industrial Forum: in 3 vol. 2018. Vol. 1. Pp. 85-87. ISBN: 978-5-528-00299-6 (in Russ.).
7. Korneva L.G. Phytoplankton of reservoirs of the Volga basin / edited by A. I. Kopylov. Kostroma: Kostroma Printing House, 2015. 284 p. (in Russ.).
8. Abakumov V.A., Brekhovskikh V.F. etc. Ivankovo reservoir. Modern problems and security, 2000. 74 p. (in Russ.).
9. Kurbatova I.E. Restoration of the ecological framework of the river basin as a method of improving aquatic ecosystems / Fundamental and applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies: materials of the VI International Scientific and Practical Conference. Part 1. Maykop: Publishing house "IP Kucherenko V. O.", 2021. P. 168–178 (in Russ.).
10. Kirpichnikova N.V., Lapina E.E. Kudryashova V.V. Long-term dynamics of nitrogen and phosphorus content in ground waters of the Ivankovo reservoir catchment. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 536–545 (in Russ.).
11. Mirzoev E.S., Mirzoev A.E. Konakovskiy district: a local history reference book. Tver: DC Sovremennik. 1995. 98 p. (in Russ.).
12. Lavrentieva G. V., Reva E. V., Synzynys B. I., Mirzeabasov O. A., Rogulenko A.V. Technology of environmental risk assessment for a small river. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2011. No. 4. P. 28–36. (in Russ.).
13. Kupriyanova E.I., Kirpichnikova N.V. Ecological state of the water protection zone of the Ivankovsky reservoir and modern approaches to its regulation. *News of Academy of Sciences*. 2003. Vol. 6. P. 77–84 (in Russ.).
14. Gordin I.V., Kirpichnikova N.V., Kupriyanova E.I., Kharitonov V.A. Monitoring of the development of water protection zones. *Collection of reports "Water protection zones: practical application experience and feasibility of development"*. Moscow, 2006. P. 45–49 (in Russ.).
15. Nezhikhovskiy R.A. Hydrological and ecological foundations of water industry. L., Gidrometeoizdat 1990. 92 p. (in Russ.).

#### **Сведения об авторах:**

**Кирпичникова Наталья Владимировна**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории охраны вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: nkirp@list.ru

**Полянин Владислав Олегович**, канд. геогр. наук, заместитель директора, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: vlad\_polianin@mail.ru

**Курбатова Ирина Евгеньевна**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории охраны вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: irenkurb@yandex.ru



**Черненко Юлия Дмитриевна**, инженер лаборатории охраны вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: yuliachernenko09@gmail.com

**About the authors:**

Natalya V. Kirpichnikova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problem Laboratory of Water Protection, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333 Russia: e-mail: nkirp@list.ru

Vladislav O. Polyanin, Candidate of Geographical Sciences, Deputy Director, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problem Laboratory of Water Protection, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333 Russia: e-mail: vlad\_polianin@mail.ru

Irina Y. Kurbatova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problem Laboratory of Water Protection, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333 Russia: e-mail: irenkurb@yandex.ru

Yulia D. Chernenko, Engineer, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problem Laboratory of Water Protection, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333 Russia: e-mail: yuliachernenko09@gmail.com