

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 504.453

DOI: 10.15372/GIPR20240104

С.А. КОНДРАТЬЕВ*, А.Ю. БРЮХАНОВ**, Ш.Р. ПОЗДНЯКОВ***, А.В. ПУЗАНОВ****,
И.В. ЖЕРЕЛИНА*****¹, М.В. ШМАКОВА*, Э.В. ВАСИЛЬЕВ**, А.М. РАСУЛОВА*,
С.В. БАБОШКИНА****², Н.С. ОБЛОМКОВА**³

*Институт озероведения РАН, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9, Россия,
kondratyev@limno.org.ru, m-shmakova@yandex.ru, arasulova@limno.ru

**Институт агронженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства,
196625, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское шоссе, 3, Россия,
sznii@yandex.ru, sznii6@yandex.ru, oblomkovan@gmail.com

***Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия, tbgmaster@mail.ru

****Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия, puzanov@iwep.ru, arsenida@rambler.ru

*****ООО «Центр инженерных технологий»,
656002, Барнаул, ул. Профинтерна, 44б, Россия, zherelina@mail.ru

ОЦЕНКА НАГРУЗКИ БИОГЕННЫМИ И ЗАГРЯЗНЯЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ НА РОССИЙСКУЮ ЧАСТЬ Р. ИРТЫШ

Для решения задачи оценки внешней нагрузки на российскую часть р. Иртыш со стороны водосбора использована модель *ILLM*, учитывающая вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование нагрузки. Модель позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбором с учетом влияния гидрологических факторов и удержания химических веществ водосбором и его гидрографической сетью. Для обеспечения модели необходимой входной информацией выполнена классификация подстилающей поверхности с использованием снимков со спутников *PROBA-V* и *Sentinel-2*. Собраны и проанализированы данные о содержании биогенных элементов (*N* и *P*) и микрозлементов (*Cu* и *Zn*) в природных (почвенных и речных) водах изучаемой территории. На основе обработки материалов о деятельности более 800 сельскохозяйственных предприятий оценено поголовье скота, внесение органических и минеральных удобрений, а также рассчитано поступление общего азота и общего фосфора в гидрографическую сеть. По результатам моделирования выполнена оценка внешней нагрузки (включающей диффузную составляющую) биогенными элементами (азотом и фосфором) и металлами (меди и цинком) как для всей российской части бассейна р. Иртыш, так и для семи его подбассейнов, в том числе для рек Тобол, Ишим, Омь и Конда. Оценен вклад трансграничной нагрузки на вынос рассматриваемых химических веществ в замыкающих створах трансграничных рек. Показано, что соотношение вклада различных составляющих внешней нагрузки в вынос изменяется в зависимости от водности года.

Ключевые слова: биогенные элементы, металлы, внешняя нагрузка, водоток, трансграничный перенос.

S.A. KONDRATYEV*, A.Yu. BRYUKHANOV**, Sh.R. POZDNYAKOV***, A.V. PUZANOV****,
I.V. ZHERELINA*****¹, M.V. SHMAKOVA*, E.V. VASILYEV**, A.M. RASULIOVA*,
S.V. BABOSHKINA****², N.S. OBLOMKOVA**³

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, 196105, St. Petersburg, ul. Sevastyanova, 9, Russia,
kondratyev@limno.org.ru, m-shmakova@yandex.ru, arasulova@limno.ru

**Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production,
196625, St. Petersburg, vil. Tyarlevo, Filtrovskoe highway, 3, Russia,
sznii@yandex.ru, sznii6@yandex.ru, oblomkovan@gmail.com

***Russian State Hydrometeorological University,
192007, St. Petersburg, ul. Voronezhskaya, 79, Russia, tbgmaster@mail.ru

****Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
656038, Barnaul, ul. Molodezhnaya, 1, Russia, puzanov@iwep.ru, arsenida@rambler.ru
*****LLC “Center for Engineering Technologies”,
656002, Barnaul, ul. Profinterna, 44b, Russia, zherelina@mail.ru

ASSESSMENT OF THE LOAD OF NUTRIENTS AND POLLUTANTS ON THE RUSSIAN PART OF THE IRTYSH RIVER

To solve the problem of assessing the external load on the Russian part of the Irtysh River from the catchment, the ILLM model was used. It takes into account the contribution of point and diffuse sources to the formation of the load and makes it possible to calculate the removal of impurities from the catchment. The model takes into consideration the influence of hydrological factors and chemical retention by the catchment and its hydrographic network. In order to provide the model with the necessary input information, classification of the underlying surface types has been performed using PROBA-V and Sentinel-2 satellite images. Data on the content of nutrients (N and P) and trace elements (Cu and Zn) in soil and river waters of the studied territory were collected and analyzed. Based on the processing of materials on the activities of more than 800 agricultural enterprises, the number of livestock, and organic and mineral fertilizer inputs were estimated, and the total nitrogen and total phosphorus inputs to the hydrographic network were calculated. The external load (including the diffusive component) of nutrients (nitrogen and phosphorus) and metals (copper and zinc) was assessed for both the entire Russian part of the Irtysh basin and for seven of its sub-basins, including the Tobol, Ishim, Om and Konda rivers. According to the calculation results, the contribution of the transboundary load to the outflow of the considered chemicals in the outlet sections of the transboundary rivers was evaluated. It is shown that the ratio of the contribution of different components of the external load to the outflow varies depending on the water content of a year.

Keywords: nutrients, metals, external load, watercourse, transboundary transport.

ВВЕДЕНИЕ

Вынос химических веществ с водосбора и внешняя нагрузка на водоем или водоток являются основной причиной их загрязнения и эвтрофирования. Загрязнение вызвано поступлением химических веществ, оказывающих негативное воздействие на гидробионты, и означает превышение концентраций загрязняющих веществ или интегральных показателей качества воды допустимых нормативов. При снижении нагрузки загрязняющих веществ на водный объект его характеристики со временем восстанавливаются за счет выноса химических веществ, процессов самоочищения и захоронения в донных отложениях. Эвтрофирование представляет собой естественный процесс развития экосистемы водоема, проявляющийся в постепенном повышении уровня его продуктивности (трофии) в зависимости от морфометрии объекта, его проточности и нагрузки биогенными (питательными) элементами, основные из которых — соединения азота и фосфора. Снятие или снижение биогенной нагрузки не означает возвращения водного объекта в исходное состояние, однако скорость эвтрофирования может вернуться к значениям близким к естественным. Загрязнение и эвтрофирование — процессы взаимосвязанные [1].

По отношению к источникам формирования внешняя нагрузка на водный объект разделяется на точечную и неточечную (рассредоточенную) [2]. Точечная нагрузка формируется в результате сбросов в первичную гидрографическую сеть водосбора или непосредственно в водоприемник очищенных и неочищенных сточных вод промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных предприятий. Рассредоточенная нагрузка формируется за счет выноса веществ со всей площади водосбора вследствие эмиссии химических веществ из почв в стекающие дождевые и талые воды и смыва взвешенных и растворенных примесей с поверхности водосбора. В зависимости от происхождения источника рассредоточенная нагрузка может классифицироваться как природная (фоновая, естественная) или диффузная (антропогенная). Природная составляющая нагрузки формируется в результате выноса химических веществ с естественных ландшафтов (лесов, болот, лугов естественного происхождения и др.) и части выноса с обрабатываемых земель, который происходит независимо от хозяйственной деятельности. Диффузная составляющая нагрузки представляет собой рассредоточенный вынос с водосборных площадей растворенных и взвешенных примесей антропогенного происхождения. К числу диффузных источников относятся сельскохозяйственные угодья, пашни, пастбища, удобренные территории, свалки, селитебные площади, стоки с которых не поступают на очистные сооружения. Синонимом к термину «диффузная антропогенная нагрузка» является «диффузное загрязнение» [3], поскольку фоновый (природный) рассредоточенный вынос с естественных водосборов едва ли можно считать загрязнением.

Цель настоящего исследования — количественная оценка внешней нагрузки биогенными и загрязняющими веществами на р. Иртыш и ее основные притоки в пределах Российской Федерации со стороны водосборной площади в современных условиях. Общая стратегия достижения цели заключается в приближенной оценке нагрузки и ее составляющих для всей водной системы на основе имеющихся, как правило весьма ограниченных, данных, с последующим выделением и более подробным рассмотрением основных составляющих водной системы (подбассейнов).

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В материалах Хельсинской комиссии [4] представлено описание моделей, которые могут использоваться для расчета внешней нагрузки на водные объекты. В их число вошла модель ILLM, разработанная сотрудниками Института озероведения РАН (ИНОЗ РАН) и Института агронженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [5]. Указанная модель хорошо себя зарекомендовала при выполнении исследований по проекту «Оздоровление Волги» [6, 7]. Кроме того, модель ILLM прошла верификацию на ряде водных объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России, на водосборах рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка, притоках Финского залива [5, 8].

Модель выноса растворенных химических веществ с водосбора и формирования внешней нагрузки на водоем со стороны водосбора ILLM¹ создана на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса химических веществ с водосборных площадей, поступления растворенных примесей в водоемы [5, 9], а также с учетом рекомендаций Хельсинской комиссии по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [2]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой внешней нагрузки на водные объекты, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. Модель позволяет оценить вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование нагрузки на водосбор, рассчитать вынос примесей с водосбора с учетом воздействия гидрологических факторов и удержания химических веществ водосбором и гидрографической сетью. В последней версии модели для оценки биогенной нагрузки, сформированной на сельскохозяйственных угодьях, используется метод, предложенный специалистами ИАЭП [10, 11]. Расчеты выноса химических элементов с водосбора и формирования внешней нагрузки на водные объекты могут выполняться как с годовым, так и с месячным шагом по времени. Однако из-за того, что большая часть входных данных, получаемая из материалов государственной статистической отчетности, имеет годовое осреднение, вариант модели ILLM с шагом расчета в один год получил большее распространение.

Модель ориентирована на использование с учетом ограниченных возможностей информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах России. Необходимое условие практического применения модели на реальных объектах — наличие информации об основных источниках нагрузки на рассматриваемые водосборы. При этом контролируемые системой Росгидромета водосборы могут являться объектом верификации модели. Конечный итог моделирования — количественная оценка внешней нагрузки на водоем или водоток со стороны водосбора и отдельных ее составляющих.

В связи с актуальностью проблемы сдерживания эвтрофирования водных объектов при разработке модели значительное внимание уделялось расчету биогенной нагрузки общим фосфором и общим азотом. В то же время модель позволяет выполнять расчеты выноса некоторых растворенных металлов с речных водосборов [12].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Иртыш — одна из крупнейших трансграничных рек России. Водосборная площадь Иртыша и его крупных притоков — Ишима и Тобола — в России занимает обширные пространства Западной Сибири. В верхнем течении Иртыш (Черный Иртыш) протекает по территории Или-Казахского авто-

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612519 «Расчет формирования биогенной нагрузки на водные объекты северо-запада России на основе модели ILLM» / Кондратьев С.А., Шмакова М.В.; Институт озероведения РАН; зарегистрировано 27.02.2014, заявка № 2013661852.

номного округа Синьцзян-Уйгурского автономного района Китайской Народной Республики. Небольшая часть водосборной площади находится в пределах Баян-Ульгийского аймака Монгольской Народной Республики. Водосборная площадь Иртыша в верхнем и среднем течении расположена на территории Республики Казахстан в границах Восточно-Казахстанской, Павлодарской, Акмолинской, Северо-Казахстанской и Костанайской областей; небольшие участки водосбора находятся в Карагандинской и Ультауской областях. В России бассейн Иртыша расположен в границах Омской, Челябинской, Курганской, Свердловской, Новосибирской, Тюменской областей, Ханты-Мансийского автономного округа; малая часть бассейна относится к Пермскому краю, Оренбургской области и Республике Башкортостан (рис. 1).

Приказом Минприроды России № 265 от 11.10.2007 [13] в границах бассейна р. Иртыш (российская часть) утверждено семь гидрографических единиц (подбассейнов) (рис. 2). Водораздел бассейна р. Иртыш сопряжен с бессточными областями Обь-Иртышского, Иртыш-Ишимского и Тобол-Ишимского междуречий. Междуречья представляют собой выложенные котловины — зоны закрытого латерального стока, не принимающие участия в формировании стока р. Иртыш и ее притоков. В связи с этим при моделировании диффузного загрязнения бессточные области не учитывались.

Средством классификации подстилающих поверхностей с целью информационного обеспечения модели являлась Система классификации земного покрова ООН (Land Cover Classification System — LCCS) с использованием снимков со спутников PROBA-V (PROBA-Vegetation) и Sentinel-2. Проведено объединение до пяти основных классов, необходимых для расчета нагрузки на водный объект: 1) поймы, луга, лесостепь; 2) сельскохозяйственные угодья; 3) города и другие антропогенные ланд-

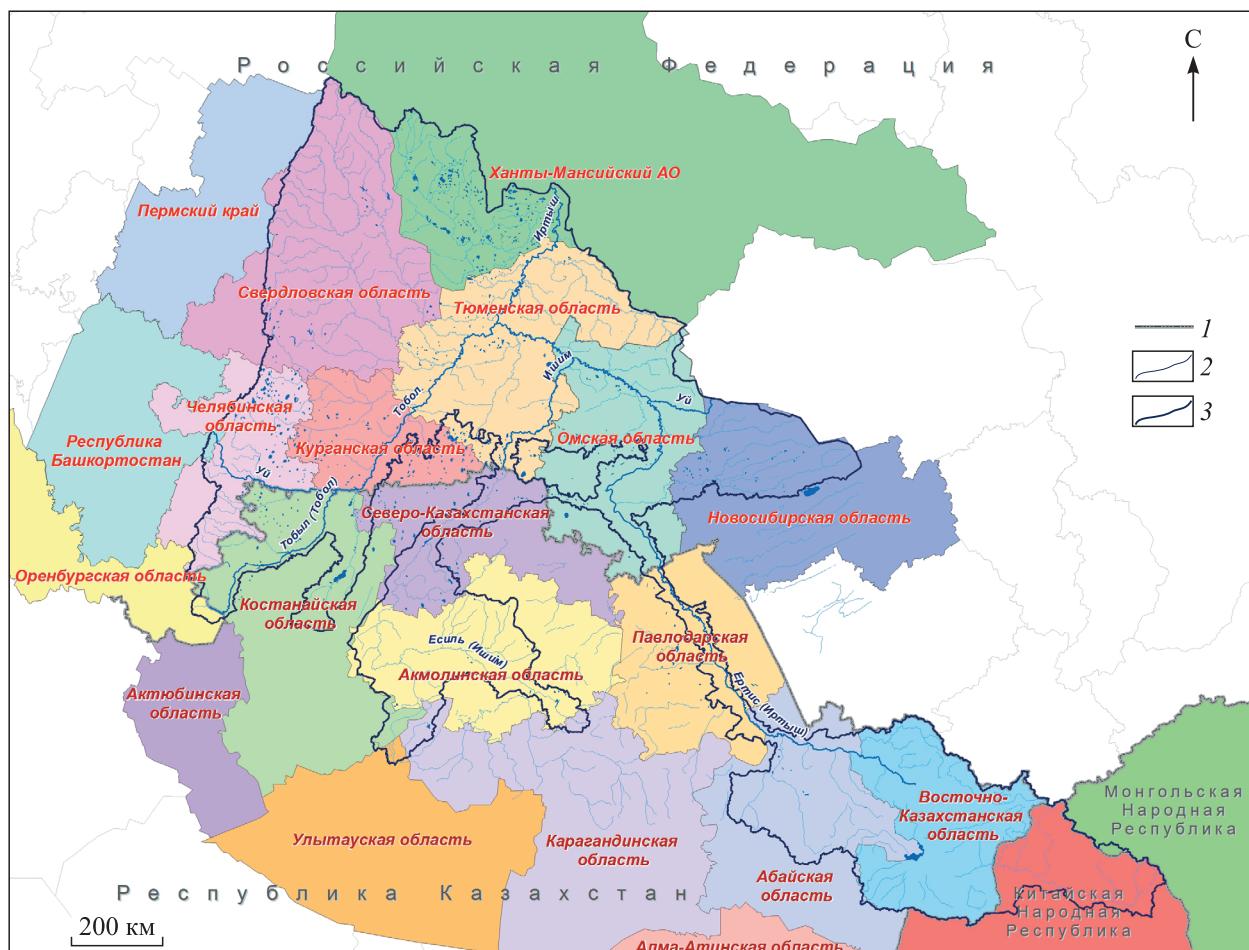


Рис. 1. Административно-территориальная структура бассейна р. Иртыш.

Границы: 1 — государственные, 2 — административные, 3 — бассейна р. Иртыш.

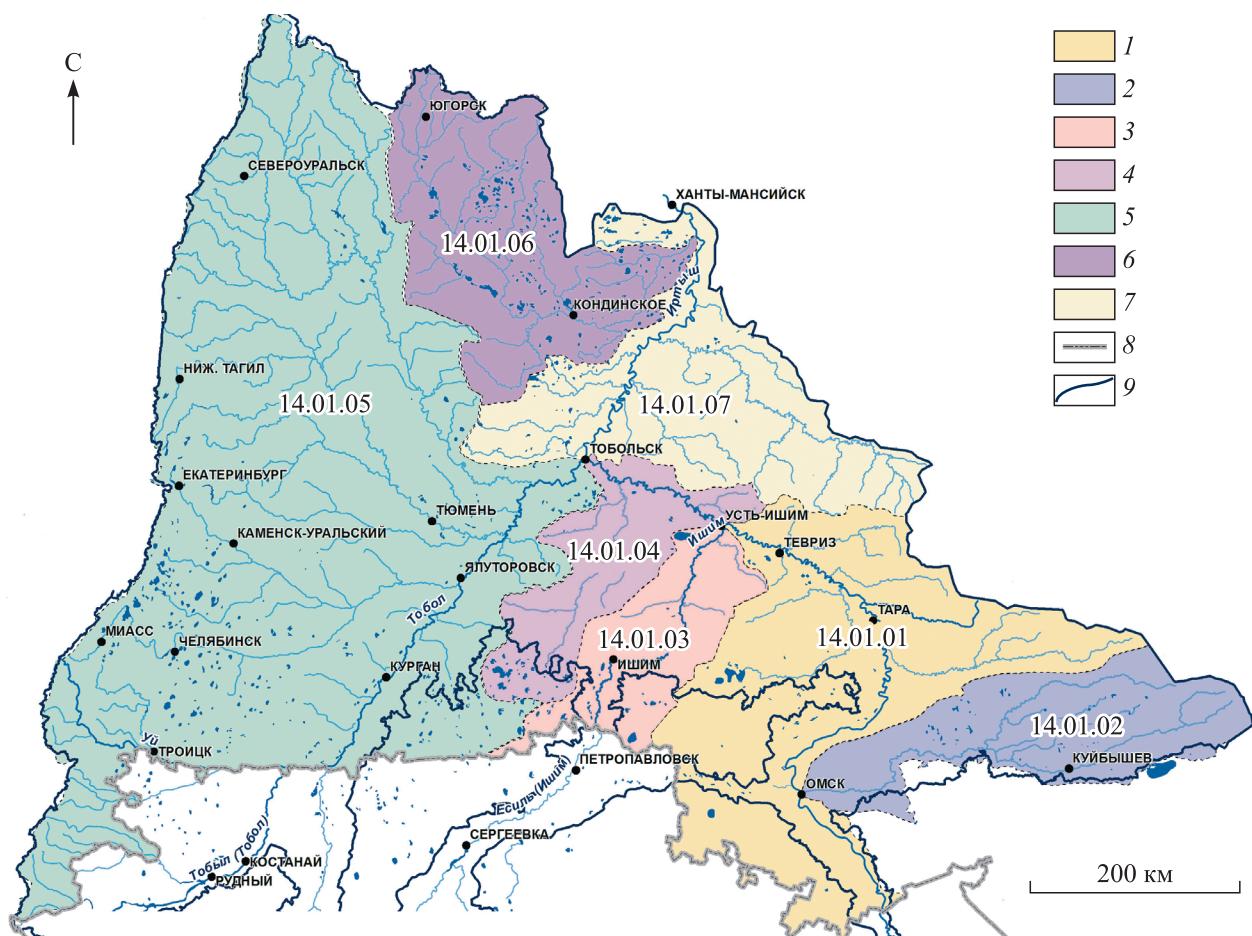


Рис. 2. Схема российской части водосбора р. Иртыш и его гидографических единиц (подбассейнов), в пределах которых формируется нагрузка биогенными и загрязняющими веществами на гидографическую сеть.

Гидографические единицы подбассейнового уровня: 1 — Иртыш до впадения Ишима (российская часть бассейна), 2 — Омь, 3 — Ишим (российская часть бассейна), 4 — Иртыш на участке от Ишима до Тобола, 5 — Тобол (российская часть бассейна), 6 — Конда, 7 — Иртыш на участке от Тобола до Оби. Границы: 8 — государственные, 9 — бассейна р. Иртыш (российская часть).

шахты; 4) лес, болото; 5) постоянные водные объекты. Значения площадей, занятых выделенными классами подстилающих поверхностей в бассейне р. Иртыш и его подбассейнах, представлены в табл. 1.

Для каждого класса подстилающей поверхности на основе анализа литературных данных [14–31] приближенно оценены эмиссионные характеристики поступления биогенных элементов (общего азота и общего фосфора) и металлов (меди и цинка) в сток (табл. 2). Выбор рассматриваемых химических веществ объясняется прежде всего наличием данных натурных наблюдений, обеспечивающих модель необходимой исходной информацией.

При анализе биогенной нагрузки сельскохозяйственного происхождения определено местоположение более чем 800 предприятий на территории девяти регионов и 168 муниципальных районов, расположенных в бассейне р. Иртыш на территории России (рис. 3). На основе обработки материалов о деятельности этих предприятий, поголовье скота, внесении органических и минеральных удобрений рассчитано поступление общего азота и общего фосфора в гидографическую сеть семи изучаемых подбассейнов. Оценка биогенной нагрузки, сформированной в результате хозяйственной деятельности на российской части бассейна р. Иртыш в 2021 г., представлена в табл. 3.

Значения среднегодового слоя стока в годы 5-, 50- и 95%-й обеспеченности рассчитаны по методике [32] при наличии данных гидрометрических наблюдений. Статистические параметры ряда среднегодовых значений слоя стока вычислены по данным государственной наблюдательной сети Росгидромета за 1987–2020 гг. на замыкающих гидрологических постах подбассейнов [33]. Для об-

Таблица 1

Классы подстилающей поверхности в границах подбассейнов и процентное содержание каждого класса от площади подбассейна

Код, наименование бассейна/подбассейна, по [13]	Класс подстилающей поверхности										Всего, км ² (100 %)	
	1		2		3		4		5			
	км ²	%	км ²	%	км ²	%	км ²	%	км ²	%		
14.01.00, бассейн р. Иртыш (российская часть бассейна)	124 318,07	18,92	52 426,98	7,98	3951,54	0,60	462 950,21	70,44	13 537,75	2,06	657 184,55	
14.01.01, Иртыш до впадения Ишима (российская часть бассейна)	12 867,64	15,23	6154,97	7,28	302,17	0,36	64 078,13	75,83	1100,24	1,30	84 503,15	
14.01.02, Омь	14 757,17	28,79	5945,72	11,60	222,42	0,43	29 957,32	58,45	366,71	0,72	51 249,34	
14.01.03, Ишим (российская часть бассейна)	5640,95	21,70	2188,83	8,42	73,75	0,28	17 671,45	67,98	420,32	1,62	25 995,30	
14.01.04, Иртыш на участке от Ишима до Тобола	5651,03	17,97	1537,12	4,89	48,71	0,15	23 720	75,45	482,53	1,53	31 439,39	
14.01.05, Тобол (российская часть бассейна)	61 452,15	19,78	36 536,48	11,76	3132,13	1,01	20 4574,93	65,85	4980,37	1,60	310 676,06	
14.01.06, Конда	11 793,42	16,04	21,76	0,03	58,75	0,08	57 865,60	78,71	3776,89	5,14	73 516,43	
14.01.07, Иртыш на участке от Тобола до Оби	10 522,95	13,18	18,21	0,02	48,04	0,06	67 141,80	84,08	2123,89	2,66	79 854,89	

Приложение. Классы подстилающей поверхности — см. текст.

Таблица 2

Содержание химических веществ в почвенных, лизиметрических водах, а также в первичных звеньях гидрографической сети (мг/л), оцененное на основе литературных данных [14–31]

Вещество	Поймы, луга, лесостепь	Сельскохозяйственные угодья	Города и другие антропогенные ландшафты	Леса, болота
N _{общ}	1,426	0*	3,174	1,15
P _{общ}	<u>0,15 – 0,68</u> 0,40	0*	<u>0,36 – 1,06</u> 0,706	<u>0,044 – 0,34</u> 0,144
Cu	<u>0,0025 – 0,014</u> 0,011	<u>0,0012 – 0,0143</u> 0,0031	<u>0,001 – 0,026</u> 0,014	<u>0,006 – 0,011</u> 0,01
Zn	<u>0,005 – 0,0307</u> 0,0189	<u>0,023 – 0,036</u> 0,029	<u>0,01 – 0,05</u> 0,02	<u>0,0046 – 0,0214</u> 0,0158

Приложение. В числителе указан диапазон изменений, в знаменателе — среднее значение.

* Эмиссия биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий рассчитывается в модели.

работки данных использована программа Gidrostat 2.0, разработанная Центром инженерных технологий². Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Основой для сбора информации о сбросах точечных источников загрязнения в первичную гидрографическую сеть изучаемых водосборов послужили формы статистической отчетности автоматизированной информационной системы «Государственный водный реестр» (АИС ГВР) за 2009–2020 гг. (форма 2.11-гвр).

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660646 «Определение расчетных гидрологических характеристик при наличии данных наблюдений (GIDROSTAT 2.0)» / Ловцкая О.В., Яковченко С.Г., Жоров В.А.; ООО «Центр инженерных технологий»; зарегистрировано 05.10.2015, заявка № 2015615121.

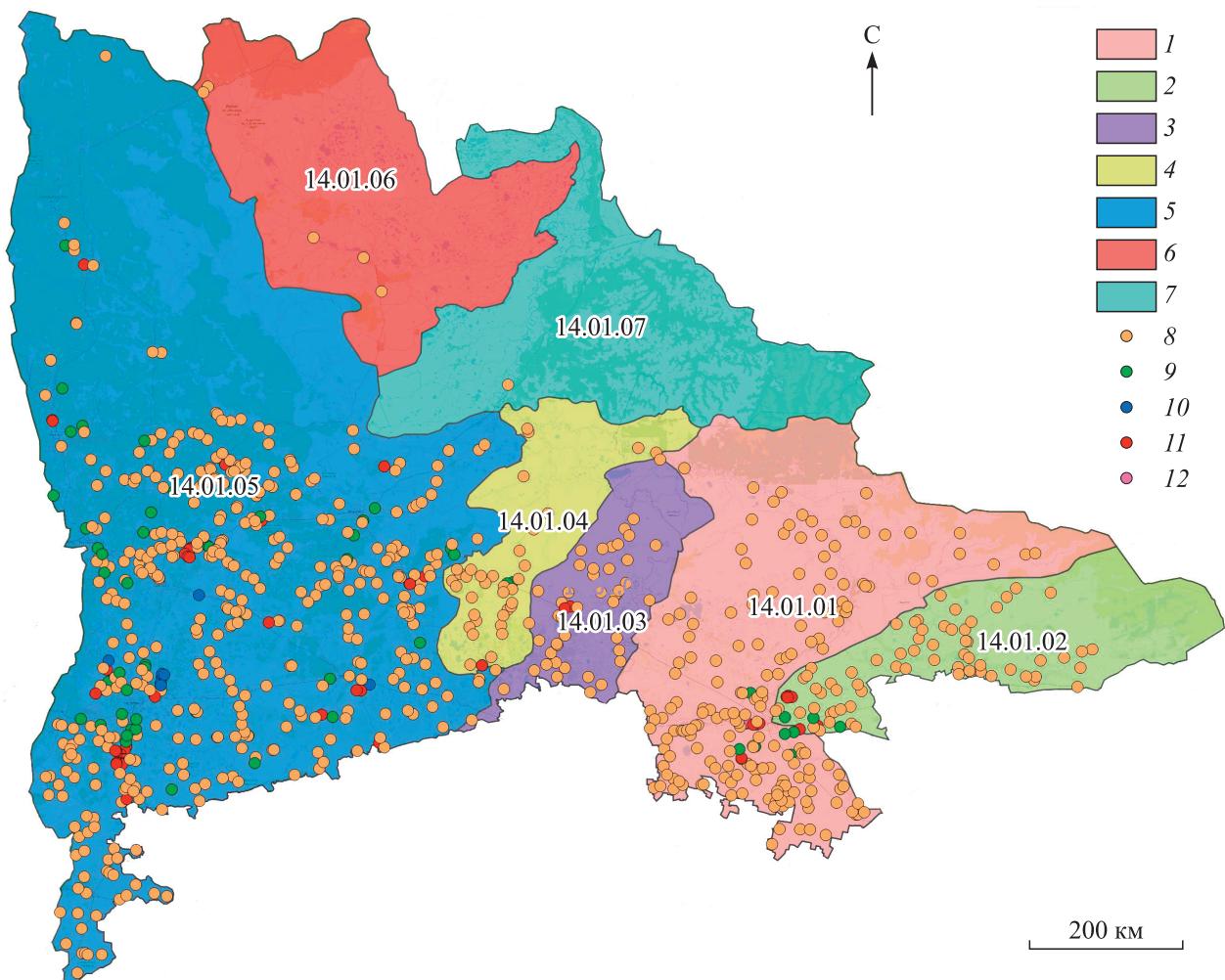


Рис. 3. Расположение наиболее крупных сельскохозяйственных предприятий на территории бассейна р. Иртыш в 2021 г.

1–7 — подбассейны (наименование, соответствующее коду, — см. табл. 1). Сельскохозяйственные предприятия: 8 — фермы крупного рогатого скота, 9 — птицефабрики по разведению кур, 10 — птицефабрики по разведению гусей/уток, 11 — свинокомплексы, 12 — конефермы.

Таблица 3

Азотная и фосфорная нагрузка (т/год) на первичную гидрографическую сеть подбассейнов, сформированная в 2021 г. в результате сельскохозяйственной деятельности

Подбассейн	Азотная нагрузка	Фосфорная нагрузка
Иртыш до впадения Ишима (российская часть бассейна)	37 673	1689
Омь	12 097	701
Ишим (российская часть бассейна)	4158	209
Иртыш на участке от Ишима до Тобола	3497	188
Тобол (российская часть бассейна)	56 296	2833
Конда	37	2
Иртыш на участке от Тобола до Оби	167	8
Всего	113 925	5630

Приближенная оценка среднегодовых значений атмосферных выпадений общего фосфора на изучаемую территорию выполнена на основе известных территориально общих зависимостей [5]. В результате в расчетах использовано значение 5 кг Р/км² в год для всей российской территории водосбора р. Иртыш. Из-за отсутствия достоверных данных об испарении с поверхности водосбора в

Таблица 4

Расчетный среднегодовой слой стока в замыкающем створе подбассейна, мм/год

Подбассейн	Расстояние от устья, км	Обеспеченность, %		
		5	50	95
Иртыш до впадения Ишима (российская часть бассейна)	1014	101,0	65,6	38,9
Омь	3,8	73,0	36,7	6,8
Ишим (российская часть бассейна)	61,0	43,0	22,1	8,4
Иртыш на участке от Ишима до Тобола	637	104,0	78,1	54,0
Тобол (российская часть бассейна)	164	124,0	62,5	30,0
Конда	72,0	241,0	170,4	107,0
Иртыш на участке от Тобола до Оби	20,0	116,0	82,9	59,0

результате денитрификации использовано предположение о равенстве значений поступления азота из атмосферы (выпадения с осадками + фиксация биотой) и улетучивания (испарения) вследствие денитрификации [9]. К сожалению, литературных данных по атмосферным выпадениям металлов в регионе исследования найти не удалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета выноса рассматриваемых химических веществ с водосбора (створ — г. Ханты-Мансийск), осредненные за 2009–2020 гг., представлены в табл. 5. Здесь показаны основные составляющие нагрузки на российскую часть водосбора р. Иртыш, суммарная нагрузка на водосбор, удержание водосбором и его гидографической сетью, рассчитанная по модели ILLM и материалам Росгидромета величина выноса, полученный по модели вклад различных компонентов нагрузки в суммарный вынос, а также значения коэффициента удержания. Здесь же приведены данные по выносу азота, фосфора, меди и цинка, оцененные по материалам государственного мониторинга Росгидромета.

Настройка (калибровка) модели осуществлялась по данным наблюдений в замыкающем створе, расположенным при впадении Иртыша в Обь (створ — г. Ханты-Мансийск), для водности 50%-й обеспеченности. Из табл. 5 следует, что результаты расчетов по модели ILLM («вынос с водосбора») не более чем на 2 % отличаются от значений выноса с водосбора Иртыша в створе Ханты-Мансийска, определенных на основе данных наблюдательной сети Росгидромета («вынос с водосбора по данным Росгидромета»).

Согласно представленным результатам, вынос рассматриваемых химических веществ со стоком Иртыша в створе Ханты-Мансийска в год средней водности может быть оценен в 123 795 т N_{общ}/год,

Таблица 5

Вынос биогенных элементов и металлов в створе Ханты-Мансийска при средней водности, т/год

Показатель	N _{общ}	P _{общ}	Cu	Zn
Поступление извне	26 770	1162	137	254
Точечные источники	27,4	7681	6,5	120
Сельскохозяйственная нагрузка	11 3926	5630	0	0
Атмосфера	0	3285	0	0
Эмиссия	59 871	9778	993	2671
Нагрузка на гидографическую сеть водосбора	200 594	27 537	1136	3045
Удержание	76798	16792	259	311
Вынос с водосбора (расчет)	12 3795	10 744	876	2734
Вынос с водосбора по данным Росгидромета	12 4034	10 888	882	2736
Диффузная нагрузка с водосбора	69 388	3097	148	242
Фоновый вынос с водосбора	37 869	2914	617	2155
Нагрузка точечными источниками	16,9	2997	5,01	107
Нагрузка извне	16 520	453	105	228
Нагрузка атмосферой	0	1282	0	0
Коэффициент удержания	0,382	0,609	0,228	0,102

10 744 т Р_{общ}/год, 876 т Cu/год и 2734 т Zn/год. При этом диффузная компонента составляет 69 388 т N_{общ}/год, 3097 т Р_{общ}/год, 148 т Cu/год и 242 т Zn/год. Трансграничная нагрузка доходит до створа в количестве 16 520 т N_{общ}/год, 443 т Р_{общ}/год, 105 т Cu/год и 228 т Zn/год.

Диффузная составляющая нагрузки является доминирующей для биогенных элементов, что объясняется наличием значительного воздействия сельского хозяйства. Для металлов расчеты показали преобладание природной (фоновой) нагрузки. Диффузная составляющая, согласно расчетам, не превышает 16,2 % для меди и 8,5 % для цинка от значений суммарного выноса. Здесь основная причина такого результата — отсутствие информации о сельскохозяйственной нагрузке металлами и данных об атмосферной нагрузке, небольшое содержание металлов в сточных водах, указываемое предприятиями в формах статистической отчетности 2-ТП (водхоз).

На рис. 4 проиллюстрирована зависимость соотношения вклада диффузной и природной составляющих внешней фосфорной нагрузки на водосбор Иртыша в вынос в створе Ханты-Мансийска от водности. При этом атмосферные выпадения, точечная нагрузка и трансграничный перенос остаются неизменными. Если при высокой водности обеспеченностью 5 %, или 116 мм/год, вклад природной нагрузки доминирует и составляет 33,3 % от значения суммарного выноса, то в годы средней (50 %) водности (82,9 мм/год) наиболее значимый вклад вносит диффузная нагрузка (28,8 %). Снижение водности до 95 % (59,0 мм/год) приводит к уменьшению вклада как диффузной, так и природной составляющей. Согласно расчетам, в этом случае доминирует точечная фосфорная нагрузка (31,1 % от значения суммарного выноса).

В табл. 6 представлена оценка вклада различных составляющих внешней нагрузки (%) в вынос биогенных элементов и металлов со стоком Иртыша в створах с. Усть-Ишим (код подбассейна, согласно [13], 14.01.01) и Ханты-Мансийска (14.01.07), а также притоков Омь (14.01.02), Ишим (14.01.05), Тобол (14.01.05) и Конда (14.01.06). Результаты приведены в процентах от значения выноса в замыкающем створе. Расчеты выполнены при средней водности.

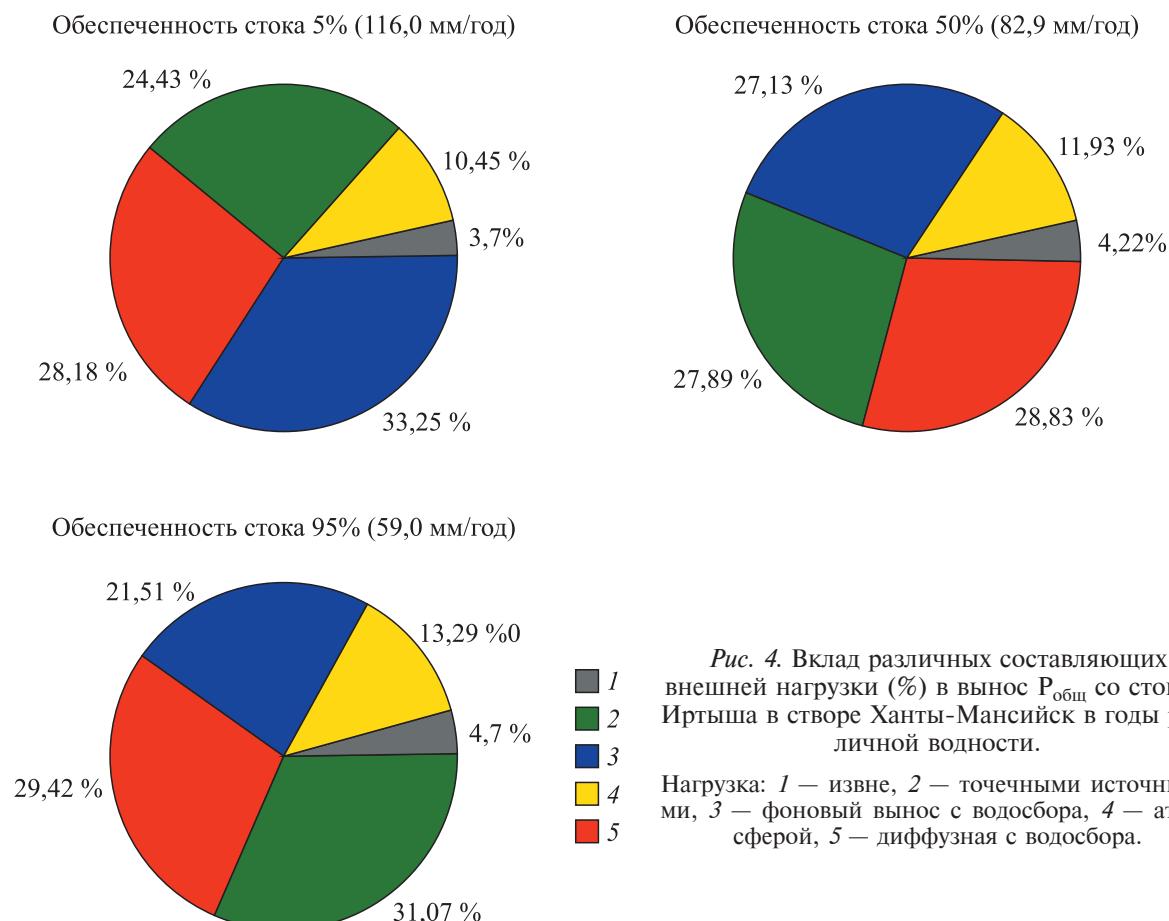


Таблица 6

Вклад различных составляющих внешней нагрузки (%) в вынос химических веществ в замыкающих створах подбассейнов

Код подбассейна*	Трансграничный перенос	Точечные источники	Фон	Атмосферные выпадения	Диффузная нагрузка
Общий азот					
14.01.01	32,8	0,0	9,7	—	57,5
14.01.02	0,0	0,0	15,2	—	84,8
14.01.03	23,2	0,0	10,4	—	66,4
14.01.05	5,3	0,0	29,6	—	65,1
14.01.06	0,0	0,0	95,7	—	4,3
14.01.07	13,4	0,0	30,6	—	56,0
Общий фосфор					
14.01.01	19,1	8,8	16,4	9,1	46,6
14.01.02	0,0	0,7	17,8	17,4	64,1
14.01.03	8,0	58,1	5,5	9,0	19,4
14.01.05	1,2	21,0	20,9	12,2	44,7
14.01.06	0,0	0,7	64,3	14,2	20,8
14.01.07	4,2	27,9	27,1	12,0	28,8
Медь					
14.01.01	55,3	0,0	37,5	—	7,2
14.01.02	0,0	0,0	76,0	—	24,0
14.01.03	38,9	0,0	49,6	—	11,5
14.01.05	2,0	1,4	65,0	—	31,6
14.01.06	0,0	0,0	91,1	—	8,9
14.01.07	12,0	0,6	70,4	—	17,0
Цинк					
14.01.01	44,6	0,3	50,4	—	4,7
14.01.02	0,0	0,0	86,0	—	14,0
14.01.03	36,2	0,2	56,7	—	6,9
14.01.05	1,5	9,6	69,3	—	19,6
14.01.06	0,0	0,0	94,6	—	5,4
14.01.07	8,3	4,0	78,8	—	8,9

П р и м е ч а н и е. Серым цветом выделены доминирующие значения. Прочерк – нет данных.

* Наименование подбассейна, соответствующее коду, – см. табл. 1.

В целом на российской части водосбора р. Иртыш преобладает диффузная биогенная нагрузка (56 % по азоту и 28,8 % по фосфору). По биогенным элементам она доминирует на водосборах следующих рек: Иртыш в створе с. Усть-Ишим (57,5 % по азоту и 46,6 % по фосфору от суммарного выноса с водосбора), Омь (84,8 % по азоту и 64,1 % по фосфору), Ишим (66,4 % по азоту) и Тобол (65,1 % по азоту и 44,7 % по фосфору). Вероятная причина ее доминирования, согласно имеющейся информации, может быть связана с результатами сельскохозяйственного производства, а также с атмосферными выпадениями фосфора. Минимальная сельскохозяйственная активность обусловила преобладание природной (фоновой) нагрузки на самом северном водотоке – р. Конде (95,7 % по азоту и 64,3 % по фосфору от суммарного выноса с водосбора). Водосбор р. Ишим лидирует по точечной фосфорной нагрузке (64,3 %).

По металлам расчеты показывают примерно одинаковый результат – доминирование природной составляющей внешней нагрузки. Причина – отсутствие достаточного объема достоверных данных по антропогенным источникам поступления металлов на водосбор и в его первичную гидрографическую сеть, как точечным, так и диффузным. Исключение составляет водосбор р. Иртыш в створе с. Усть-Ишим, где преобладает трансграничный перенос меди (55,3 %). Безусловно, эти результаты нуждаются в дальнейшем уточнении, возможно на основе проведения специальных полевых исследований.

Оценивая трансграничную нагрузку на рассматриваемые подбассейны, следует отметить значительное воздействие трансграничного переноса на р. Иртыш в створе с. Усть-Ишим по азоту (32,8 %

от суммарного выноса с водосбора), фосфору (19,1), меди (55,3) и цинку (44,6 %), а также на р. Ишим в замыкающем створе — по азоту (23,2 %), фосфору (8), меди (39,9) и цинку (36,2 %). В целом трансграничное воздействие на вынос химических веществ со стоком р. Иртыш в замыкающем створе (Ханты-Мансийск) можно оценить по азоту в 13,4 %, фосфору — 4,2, меди — 12, цинку — 8,3 % от суммарного выноса с водосбора в условиях средней водности.

Достоверность полученных количественных оценок напрямую зависит от наличия и качества исходных данных о входных величинах и параметрах используемой модели. По мере сбора информации об основных источниках нагрузки и уточнения имеющихся данных статистической отчетности, а также государственного мониторинга водных объектов представленные количественные оценки могут быть существенно откорректированы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данном этапе исследований по оценке внешней нагрузки со стороны российской части водосбора на р. Иртыш и его гидографическую сеть разработана общая схема расчета нагрузки биогенными элементами и металлами, включающей диффузную, природную и трансграничную составляющие, как для всего бассейна, так и для семи его подбассейнов. По результатам расчета, осредненный за 2003–2020 гг. вынос химических веществ в створе Ханты-Мансийска составляет 123 795 т N_{общ}/год, 10 744 т P_{общ}/год, 876 т Cu/год и 2734 т Zn/год. В зависимости от водности года изменяется соотношение различных составляющих внешней нагрузки в вынос с изучаемых водосборов. Так, в створе Ханты-Мансийска при высокой водности доминирует природная нагрузка. В годы средней водности наиболее значимой является диффузная нагрузка. Снижение водности приводит к уменьшению вклада как диффузной, так и природной составляющей и к доминированию точечной фосфорной нагрузки. Оценка трансграничного воздействия на вынос химических веществ со стоком р. Иртыш в створе Ханты-Мансийска выглядит следующим образом: по N — 13,4 %, P — 4,2, Cu — 12, Zn — 8,3 % от суммарного выноса с водосбора в условиях средней водности.

Как показывает опыт нашего исследования, имеет место острый дефицит, а иногда и просто отсутствие информации государственной статистической отчетности об источниках загрязнения на водосборе (например, данных АИС ГВР), фрагментарность и недостаток результатов предшествующих исследований по оценке атмосферных выпадений на изучаемые водосборы, а также эмиссии химических веществ в сток различными типами подстилающей поверхности. Дальнейшее уточнение полученных оценок, а соответственно, и выводов о вкладе различных компонентов в общую нагрузку на гидографическую сеть р. Иртыш в пределах Российской Федерации связано прежде всего с совершенствованием системы сбора статистической информации об источниках точечного и рассредоточенного загрязнения, а также с проведением широкомасштабных натурных исследований по участию различных типов подстилающей поверхности в формировании внешней диффузной нагрузки на водные объекты Западной Сибири с учетом внутригодовой изменчивости.

Основной проблемой моделирования, ограничивающей спектр рассматриваемых химических веществ и объектов моделирования, стала нехватка исходной информации о содержании биогенных элементов и металлов в природной воде, осадках и сточных водах, а также о расходах воды и ее химическом составе в замыкающих створах подбассейнов в базах данных Росгидромета и формах государственной статистической отчетности. Следует обратить внимание на отсутствие комплексных научных исследований в области формирования внешней нагрузки на водные экосистемы региона и ее воздействия на загрязнение и антропогенное эвтрофирование природных вод.

Работа выполнена в рамках проекта государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (22–14–НИР/02) и тем государственного задания (FMNG–2019–0001, FFZF–2024–0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Россолимо Л.Л. Типология озерного накопления под воздействием антропогенного фактора. — М.: Наука, 1977. — 159 с.
2. Guidelines for the annual and periodical compilation and reporting of waterborne pollution inputs to the Baltic Sea (PLC-Water). — Helsinki: HELCOM, 2015. — 143 p.

3. **Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения:** Коллектив. монография / Под рук. В.И. Да-нилова-Данильяна. — М.: РАН, 2020. — 512 с.
4. **Applied methodology for the PLC-6 assessment** / Ed. L.M. Svendsen. — Helsinki: HELCOM, 2019. — 59 р.
5. **Кондратьев С.А., Шмакова М.В.** Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор–водоток–водоем. — СПб.: Нестор-История, 2019. — 246 с.
6. **Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Минакова Е.А., Брюханов А.Ю., Игнатьева Н.В., Шмакова М.В., Иванова Е.В., Обломкова Н.С., Терехов А.В.** Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора // География и природ. ресурсы. — 2019. — № 3. — С. 67–76.
7. **Поздняков Ш.Р., Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Игнатьева Н.В., Шмакова М.В., Минакова Е.А., Расулов А.М., Обломкова Н.С., Васильев Э.В., Терехов А.В.** Перспективы сокращения выноса биогенных элементов с речных водосборов за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) сельскохозяйственного производства (по результатам моделирования) // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47, № 5. — С. 588–602.
8. **Кондратьев С.А.** Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. — СПб.: Наука, 2007. — 253 с.
9. **Behrendt H., Dannowski R.** Nutrients and heavy metals in the Odra River system. — Berlin: Weissensee Verlag Publ., 2007. — 337 р.
10. **Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Огуздин А.С., Субботин И.А.** Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. — 2016. — № 89. — С. 175–183.
11. **Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Тарбаева В.М., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Воробьёва Е.А., Обломкова Н.С.** Научное обоснование выполнения рекомендаций ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Сер. 7. — 2016. — Вып. 4. — С. 53–65.
12. **Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю.** Моделирование абиотических процессов в системе водосбор–водоем (на примере Чудско-Псковского озера). — СПб.: Нестор-История, 2010. — 116 с.
13. **Приказ** Минприроды России от 11.10.2007 № 265 «Об утверждении границ бассейновых округов» // СПС «Консультант Плюс». — <https://docs.cntd.ru/-document/902068761> (дата обращения 20.02.2023).
14. **Алимова Г.С., Токарева А.Ю.** Гидрохимия малых рек Тюменской области — Демьянка, Самсоновская, Лев и Вандрас // Евразийское научное объединение. — 2018. — № 8-2 (42). — С. 87–90.
15. **Баникова О.А., Бычкова Е.Н.** К вопросу об установлении региональных нормативов качества воды // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2011. — № 6. — С. 54.
16. **Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Белобородов А.В., Тиунов А.А.** К вопросу оценки качества воды Аргазинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2021. — № 1. — С. 6–23.
17. **Вершинская М.Е., Шабанов В.В., Маркин В.Н.** Экологово-водохозяйственная оценка водных систем: Монография. — М.: Изд-во Росс. агр. ун-та (РГАУ-МСХА), 2016. — 148 с.
18. **Второва А.И., Панина М.В., Лиходумова И.Н.** К вопросу мониторинга гидрологического и гидрохимического режима трансграничных вод верховья бассейна реки Тобол // Материалы конференции Ин-та водн. и экол. проблем СО РАН (Барнаул, 29 авг. – 3 сент. 2022 г.). — Барнаул, 2000. — С. 27–34.
19. **Гуман О.М., Долинина И.А., Макаров А.Б.** Геоэкологические условия района размещения шлакоотвала и отстойника-шламонакопителя Серовского металлургического завода // Изв. Урал. горн. ун-та. — 2002. — № 15. — С. 263–272.
20. **Зезин Н.Н., Огородников Л.П., Постников П.А., Попова В.В., Кипрушкина Н.А., Масленина Н.В., Васина О.В., Байкин Ю.Л., Каренгина Л.Б., Гусев А.С.** Лизиметрические исследования на Среднем Урале. — Екатеринбург: ООО «Джи Лайм», 2020. — 250 с.
21. **Калинин В.М., Ларин С.И., Романова И.М.** Малые реки в условиях антропогенного воздействия (на примере Восточного Зауралья). — Тюмень: Изд-во Тюмен. ун-та, 1998. — 220 с.
22. **Кошелев С.Н.** Содержание токсикантов в снежном покрове, воде и почве северо-западной территории Курганской области // Изв. Оренб. агр. ун-та. — 2005. — № 4 (8). — С. 31–34.
23. **Кошелев С.Н.** Экотоксиканты в растительных и пищевых цепях северо-запада Урала: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. — Екатеринбург, 2007. — 42 с.
24. **Кремлева Т.А., Моисеенко Т.И., Хорошавин В.Ю., Шавнин А.А.** Геохимические особенности природных вод Западной Сибири: микроэлементный состав // Вестн. Тюмен. ун-та. Экология и природопользование. — 2012. — № 12. — С. 80–89.
25. **Лобченко Е.Е., Лавренко Н.Ю., Ничипорова И.П., Гончаров А.В.** Динамика содержания органических и биогенных веществ в воде рек бассейна Оби — Пышма и Кунара // Водное хозяйство России. — 2016. — № 2. — С. 4–16.
26. **Огородников Л.П., Постников П.А.** Лизиметрические исследования круговорота питательных элементов в агросистемах на темно-серой лесной почве // Агрохим. вестн. — 2017. — № 1. — С. 15–18.
27. **Рыбникова Л.С.** Техногенное воздействие горнодобывающих предприятий Урала на состояние гидросфера // Водное хозяйство России. — 2012. — № 1. — С. 74–91.

28. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Иртыш. Кн. 1: Общая характеристика речного бассейна. — Екатеринбург, 2014. — 303 с.
29. Соловьев А.Ю. К вопросу о качестве поверхностных вод Казанского района Тюменской области // Вестн. Тюмен. ун-та. Экология и природопользование. — 2017. — Т. 3, № 3. — С. 23–36.
30. Удачин В.Н. Экогеохимия горнoprомышленного техногенеза Южного Урала: Автoreф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. — Томск, 2012. — 354 с.
31. Якутина О.П. Содержание фосфора в жидким слое талых вод на юге Западной Сибири // Проблемы агрохимии и экологии. — 2014. — № 1. — С. 55–57.
32. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик (одобрен Постановлением Госстроя РФ от 26.12.2003 № 218). — М.: Госстрой, 2004. — 73 с.
33. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. — <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 13.08.2022).

Поступила в редакцию 06.12.2022

После доработки 09.03.2023

Принята к публикации 23.11.2023
