

ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 556.114: 555.04

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-3(162-169)

О.Г. САВИЧЕВ*, Е.А. СОЛДАТОВА**, Х. ЧАУДХУРИ***,
И.С. ИВАНОВА****, С.С. УЛАЕВА*

*Томский политехнический университет,

634050, Томск, пр. Ленина, 30, Россия, osavichev@mail.ru, 2a61@mail.ru, ulaeva.s.s@gmail.com

**Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия, 2a61@mail.ru

***Национальный технологический институт г. Дургапура, Индия,

713209, India, West Bengal, Durgapur, Mahatma Gandhi Rd, A-Zone, hirok.chaudhuri@phy.nitdgp.ac.in

****Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
634021, Томск, пр. Академический, 4, Россия, IvanovaIS_1986@mail.ru

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БАСЕЙНА РЕКИ ДАМОДАР (ИНДИЯ) В МЕЖЕННЫЙ ПЕРИОД

Рассмотрены вопросы эколого-геохимического состояния поверхностных и подземных источников водоснабжения в одном из наиболее промышленно развитых штатов Индии — Западной Бенгалии, в бассейне р. Дамодар в районе г. Дургапура. Наблюдения проводились в марте 2019 г. — в предмуссонный период, характеризующийся наименее благоприятными условиями разбавления сточных вод. Для анализа общего химического состава отобранных проб воды использован стандартный набор методов; микрокомпоненты проанализированы методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Полученные данные о химическом составе поверхностных и подземных вод свидетельствуют как о неудовлетворительном качестве вод, так и о наличии процессов интенсивного самоочищения. Изученные воды в целом характеризуются как пресные (за исключением водотока — приемника стоков химического завода, где воды соответствовали категории «солончатые»), по химическому составу поверхностные воды — гидрокарбонатные кальциевые и натриевые, в случае приемника стоков — хлоридные натриевые; подземные воды — хлоридные кальциевые. Во многих случаях воды пересыщены относительно карбонатов, соединений с гуминовыми кислотами, кварца и недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов. Основными загрязняющими веществами являются органические соединения по бихроматной и перманганатной окисляемости, Al, F⁻, NH₄⁺, Fe, Mn. Также установлен факт присутствия в значительных количествах фосфатов, As, Pb. Показано, что большая часть загрязняющих веществ оседает в донных отложениях водотоков — приемников стоков промышленных предприятий в пределах нескольких километров от створов сброса. Механизм самоочищения предположительно связан с соосаждением и сорбцией целого ряда веществ на частицах малорастворимых карбонатов и гидроксидов Ca, Fe и некоторых других металлов при относительно высоких значениях pH, обусловленных потреблением углекислого газа микрофлорой.

Ключевые слова: эколого-геохимическое состояние, поверхностные воды, подземные воды, Западная Бенгалия, г. Дургапур.

O.G. SAVICHEV*, E.A. SOLDATOVA**, H. CHAUDHURI***,
I.S. IVANOVA****, S.S. ULAEVA*

*Tomsk Polytechnic University,

634050, Tomsk, pr. Lenina, 30, Russia, osavichev@mail.ru, 2a61@mail.ru, ulaeva.s.s@gmail.com

**Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Kosyгина st., 19, Russia, 2a61@mail.ru

***National Institute of Technology,

713209, West Bengal, Durgapur, Mahatma Gandhi Rd, A-Zone, India, hirok.chaudhuri@phy.nitdgp.ac.in

****Tomsk Branch, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences, 634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 4, Russia, IvanovaIS_1986@mail.ru

ECOLOGO-GEOCHEMICAL CONDITIONS OF THE WATER BODIES WITHIN THE DAMODAR RIVER BASIN (INDIA) DURING A LOW-WATER PERIOD

Ecologo-geochemical conditions of surface water and groundwater are considered in the case of one of the industrially most developed states of India, West Bengal, within the Damodar river basin near Damodar City. The observations were made in the pre-monsoon period of March 2019, a period with the worst conditions of wastewater dilution. To analyze total chemical composition of water samples a standard set of analytical methods was used; trace elements were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry. Data obtained indicate both the unsatisfactory water quality and the intense self-purification processes. The waters under study are, in general, characterized as freshwaters (except for the stream receiving wastewater from the chemical plant where the water is "brackish"), $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ or $\text{HCO}_3\text{-Na}$ (except for the water in the stream near the chemical plant, which is Cl-Na , and groundwater, which is Cl-Ca). In most cases, the waters are oversaturated with carbonates, compounds with humic acids, quartz and undersaturated with primary aluminosilicates. The main pollutants are organic compounds according to the values of permanganate demand and chemical oxygen demand, Al, F^- , NH_4^+ , Fe and Mn. Phosphates, As, Pb and some other chemical elements are also presented in significant concentrations. It is shown that most pollutants settle in bottom sediments of the streams receiving wastewater from industrial enterprises within a few kilometers from the wastewater discharge points. The mechanism of water self-purification is, possibly, associated with co-precipitation and sorption of a great number of substances on particles of poorly soluble carbonates and hydroxides of Ca, Fe and some other metals at relatively high pH values associated with the consumption of carbon dioxide by microorganisms.

Keywords: ecologo-geochemical conditions, surface water, groundwater, West Bengal, Durgapur.

ВВЕДЕНИЕ

Дефицит пресной воды, пригодной для удовлетворения питьевых нужд, — одна из ключевых проблем XXI в. С учетом роста населения в развивающихся странах эта проблема в дальнейшем будет только обостряться, что определяет актуальность исследований эколого-геохимического состояния поверхностных и подземных источников водоснабжения и факторов его формирования с целью разработки мероприятий по повышению эффективности водоохраных мероприятий и обеспечению гарантированного качественного водоснабжения в различных регионах мира. Особенно актуальны подобные исследования в Южной и Юго-Восточной Азии.

Наблюдения проводились в марте 2019 г. в бассейне р. Дамодар, расположенной в Восточной Индии, к западу от одного из крупнейших в мире мегаполисов — Калькутты (рис. 1).

На территории штата Западная Бенгалия проживает более 91 млн чел. (плотность населения — 1029 чел/км²), развиты энергетика, машиностроение, электроника, металлургическая, химическая, легкая, пищевая, горнодобывающая промышленность, сельское хозяйство (основные сельскохозяй-

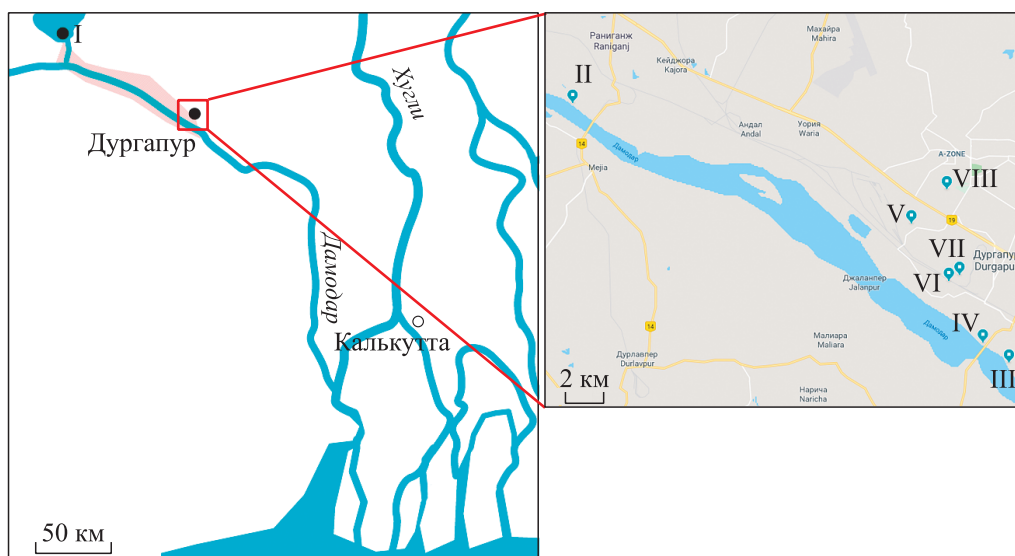


Рис. 1. Схема расположения бассейна р. Дамодар и пунктов отбора проб воды (объекты I–VIII) в марте 2019 г. Карта из информационной системы Google Maps.

Розовым цветом показан район исследования.

ственные культуры — рис, пшеница, бобовые, чай, джут, табак, сахарный тростник). Главная водная артерия — р. Ганг, достаточно крупным водотоком является и р. Дамодар.

Эта река берет начало в штате Джаркханд, протекает в западной части Западной Бенгалии и впадает в систему рек водосбора Бенгальского залива (реки Мундешвари и Хугли, один из рукавов Ганга). Общая длина Дамодара — 592 км, площадь водосбора — 24 235 км². Территория характеризуется тропическим муссонным климатом со среднегодовой температурой воздуха более 26 °С и атмосферным увлажнением около 1600 мм/год. Основная часть атмосферных осадков выпадает в мае—октябре и обеспечивает значительное увеличение в этот период водности рек региона. Наименьшее количество дождей приходится на декабрь—март, что позволяет охарактеризовать фазу водного режима реки на момент проведения полевых работ как межень. Водный сток Дамодара зарегулирован, а сама река одновременно является и источником водоснабжения, и приемником большого объема стоков, включая дренажные воды угледобывающих предприятий и стоки предприятий химической и сталелитейной промышленности.

Многолетние режимные гидрохимические наблюдения на рассматриваемой территории не проводятся. В открытом доступе имеются лишь материалы эпизодических научных исследований. В основном это данные о значениях рН, удельной электропроводности, химического потребления кислорода по бихроматной окисляемости, биохимическом потреблении кислорода (БПК), содержании растворенного кислорода, главных ионов, NH₄⁺, NO₃⁻, F⁻, Fe, Mn, Hg, Pb, Cd, полученные в различных створах рек и (значительно реже) скважин и колодцев в 2000-е гг. с использованием титриметрического, фотоколориметрического и атомно-абсорбционного методов [1–8]. Во многих случаях [3, 5–7] оценка эколого-геохимического состояния водных объектов проводится с использованием различных индексов качества, основанных на учете нескольких показателей (преимущественно БПК, растворенный кислород, соединения азота, фосфаты, иногда — микробиологические показатели). Чаще всего в результате гидрохимических исследований делается вывод о микробиологическом загрязнении вод, возможности их использования для сельского хозяйства, а для хозяйственно-питьевых целей — только после водоподготовки. Относительно содержания металлов обычно указывается на повышенные (относительно нормативов качества) концентрации Fe, в ряде случаев — Pb [1–8].

Однако в целом перечень изученных микроэлементов (в том числе тех, которые должны присутствовать при добыче и переработке полезных ископаемых) невелик. Это ограничивает фактическую эффективность очистки стоков и водоподготовки в регионе [9] как в настоящее время, так и в перспективе, что и определило конкретную задачу рассматриваемого исследования — оценку современного эколого-геохимического состояния поверхностных и подземных вод в бассейне Дамодара в период с наилучшими условиями разбавления стоков (меженный период в марте 2019 г.) по максимально широкому перечню химических элементов. Соответственно указанной задаче, мероприятия должны включать отбор и анализ небольшого количества проб, но на наиболее характерных объектах (или их участках) и с использованием масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование включало в себя полевые работы в марте 2019 г. (отбор проб поверхностных и подземных вод, измерение температуры воды и быстроизменяющихся показателей: рН, Eh, концентрации O₂ и CO₂); лабораторные работы; анализ полученных данных и термодинамические расчеты насыщения поверхностных и подземных вод относительно ряда минералов.

Отбор проб воды проводился Е.А. Солдатовой, С.С. Улаевой, И.С. Ивановой при участии индийских и китайских коллег с учетом требований [10, 11] на следующих объектах: водохранилище на р. Баракар (приток Дамодара), у плотины Мэйсон (см. рис. 1, объект I); р. Дамодар, ниже впадения в нее р. Нуния (объект II); ниже Дургапура (объект III); канал, отходящий из водохранилища на р. Дамодар, у Дургапура (объект IV); р. Тамла, приток Дамодара (объект V); два малых водотока — приемники сточных вод промышленных предприятий и дренажных вод в районе Дургапура (объекты VI и VII); скважина (объект VIII) глубиной 150 м, из горизонта (ориентировочно) 120–140 м (см. рис. 1; табл. 1). Интервал опробования в поверхностных водных объектах — 0,1–0,5 м от водной поверхности. Краткая характеристика водохранилищ в бассейне Дамодара приведена в [5], гидрогеологических условий — в [8].

Определение физико-химических и геохимических показателей выполнено в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета с использованием таких методов, как потенциометрический (рН), кондуктометрический (удельная электропроводность), тит-

Таблица 1

Физико-химические и геохимические показатели состояния поверхностных и подземных вод в водосборе р. Дамодар в марте 2019 г.

Показатель	Объект, дата отбора							
	водохранилище на р. Баракар, у плотины Мэйсон (I), 25.03.2019	р. Дамодар, ниже устья р. Нуния (II), 26.03.2019	р. Дамодар, ниже г. Дургapura (III), 27.03.2019	канал из р. Дамодар, г. Дургapura (IV), 27.03.2019	р. Тамла, г. Дургapura (V), 26.03.2019	водоток у химического завода, г. Дургapura (VI), 26.03.2019	водоток у ТЭЦ, г. Дургapura (VII), 26.03.2019	скважина, г. Дургapura (VIII), 27.03.2019
I	2	3	4	5	6	7	8	9
Ширина, град.	23,786	23,593	23,471	23,480	23,536	23,509	23,512	23,552
Долгота, град.	86,807	87,094	87,318	87,305	87,268	87,288	87,293	87,287
Высота, м	149	70	57	67	62	77	63	89
УЭП, мкСм/см	185	780	759	345	632	4590	630	731
pH	8,14	7,6	7,39	7,07	7,44	8,25	7,74	6,81
	мг/дм ³							
CO ₂	<2,0	7,0	7,0	10,6	2,0	<2,0	<2,0	23,0
O ₂	9,2	5,2	6,4	5,2	1,3	7,7	2,2	5,2
Σ _{mi}	149,0	641,7	511,9	259,4	462,7	2648,4	452,7	421,0
Ca ²⁺	18,0	47,3	40,3	25,7	40,9	56,0	38,5	73,7
Mg ²⁺	4,6	17,5	13,7	6,0	11,7	8,1	14,8	18,0
Na ⁺	12,0	85,0	77,0	23,0	49,0	962,0	53,0	45,0
K ⁺	1,2	7,5	7,1	3,0	10,0	3,8	7,1	1,3
HCO ₃ ⁻	92,7	395,0	222,0	146,0	239,0	117,0	229,0	112,0
CO ₃ ²⁻	4,2	<3	<3	<3	<3	9,6	<3	<3
SO ₄ ²⁻	6,9	39,0	55,0	36,8	49,7	132,0	56,0	59,0
Cl ⁻	9,4	50,4	96,8	18,9	62,4	1360,0	54,3	112,0
F ⁻	0,62	0,65	1,51	1,07	1,93	2,88	1,97	0,29
NO ₃ ⁻	0,12	3,05	0,52	2,13	0,26	4,06	0,39	17,40
NO ₂ ⁻	<0,02	1,35	0,42	0,10	<0,02	<0,02	0,02	<0,02
NH ₄ ⁺	0,32	14,80	8,60	0,43	13,40	0,19	8,50	0,19
P	0,01	1,64	0,5	0,02	0,95	0,02	1,15	0,01
Si	4,31	8,49	3,29	0,27	4,90	3,57	5,19	16,52
Al	0,0202	0,0160	0,4800	0,0068	0,3940	0,3490	1,8810	0,0013
Ti	0,000720	0,002700	0,011270	0,000170	0,007900	0,003900	0,045000	0,001500
Mn	0,024000	0,048200	0,349000	0,054000	0,297500	0,019000	1,243000	0,315100
Fe	0,053000	0,154900	1,078000	0,060000	1,460900	0,259000	3,741000	0,132700
Ni	0,000290	0,001000	0,002290	0,000420	0,001400	0,003500	0,007600	0,001100
Cu	0,000720	0,001600	0,003380	0,000320	0,003350	0,004800	0,007100	0,000230
Zn	0,000980	0,006900	0,013150	0,000390	0,025900	<0,002	0,071740	0,020900
As	0,000710	0,009500	0,003040	0,012360	0,002000	0,026400	0,005320	0,001200
Se	0,000060	0,000400	0,001670	0,000250	0,000800	0,008500	0,002090	0,000400
Br	0,013000	0,044000	0,097000	0,031000	0,149000	2,490000	0,093000	0,047000
Sr	0,056000	0,642000	0,205000	0,129000	0,207000	0,348000	0,201000	0,379000
Y	0,000145	0,000155	0,000842	0,000021	0,000468	0,000309	0,002931	0,000493
Zr	0,000015	0,000013	0,000090	0,000006	0,000124	0,000102	0,000393	0,000010
Cd	0,000010	0,000100	0,000049	0,000020	0,000100	0,000275	0,000172	0,000100
Sn	0,000006	0,000100	0,000037	<0,0002	0,000100	0,000070	0,000112	0,000000
Sb	0,000050	0,000200	0,000303	0,000279	0,000300	0,001000	0,000445	0,000000
I	0,011000	0,009600	0,072000	0,019000	0,231700	0,047000	0,079000	0,111200
Ba	0,016000	0,083700	0,058000	0,027000	0,050700	0,130000	0,077000	0,031000
La	0,000126	0,000124	0,001083	0,000022	0,000555	0,000320	0,003576	0,000231
Ce	0,000321	0,000225	0,002265	0,000039	0,001198	0,000657	0,007456	0,000201

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nd	0,000120	0,000108	0,000906	0,000015	0,000499	0,000277	0,003456	0,000145
Sm	0,000038	0,000045	0,000187	0,000002	0,000124	0,000031	0,000712	0,000046
Eu	0,000009	0,000015	0,000059	0,000006	0,000033	0,000033	0,000158	0,000008
Tb	0,000003	0,000004	0,000029	0,000000	0,000013	0,000006	0,000103	0,000005
Dy	0,000021	0,000020	0,000157	<0,00005	0,000066	0,000037	0,000572	0,000040
Yb	0,000010	0,000011	0,000060	0,000001	0,000033	0,000022	0,000216	0,000020
Lu	<0,00005	0,000001	0,000011	0,000001	0,000006	0,000001	0,000031	0,000004
Hf	0,000003	0,000001	0,000007	0,000003	0,000008	0,000008	0,000019	0,000002
W	0,000004	0,000022	0,000804	0,000079	0,000166	0,000052	0,000905	<0,0001
Pb	0,000068	0,000420	0,005617	0,000058	0,015030	0,001380	0,025000	0,000320
Th	0,000004	0,000003	0,000099	<0,00005	0,000045	<0,00005	0,000170	<0,00005
U	0,000280	0,000340	0,000580	0,000220	0,000500	0,000470	0,001150	0,000450
БО	9,00	44,00	36,00	22,00	43,00	29,12	43,00	36,50
ПО	2,60	7,50	6,40	3,20	6,70	5,10	7,40	1,90
$\Sigma(C_{1-2}/ПДК)$	1,99	4,50	6,66	3,15	10,52	52,89	10,82	4,07

Примечание. Σ_{mi} — сумма главных ионов; УЭП — удельная электропроводность; ПО и БО (здесь и в табл. 2) — перманганатная и бихроматная окисляемость соответственно; $\Sigma(C_{1-2}/ПДК)$ — сумма отношений фактических и предельно допустимых концентраций веществ первого и второго классов опасности в водных объектах хозяйственно-питьевого назначения.

риметрический (CO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , общая жесткость, перманганатная окисляемость), флуориметрия (бихроматная окисляемость), ионная хроматография (Na^+ , K^+ , F^-), турбидиметрия (SO_4^{2-}), фотоколориметрический (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , фосфаты), масс-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой с применением масс-спектрометра NexION 300D (концентрации прочих химических элементов). Содержание Mg^{2+} определено расчетным путем исходя из значений общей жесткости и концентрации Ca^{2+} . При анализе данных также использовалась сумма главных ионов Σ_{mi} , рассчитанная как сумма концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} .

Анализ полученных данных, выполненный согласно требованиям [12, 13], включал расчет индекса геохимического состояния Z :

$$Z = \sum \frac{C}{C_{lim}} - (N_m - 1), \quad (1)$$

где N_m — количество случаев, когда $C/C_{lim} > 2$ [12]; в качестве норматива качества C_{lim} использованы значения предельно допустимых концентраций веществ в водах объектов хозяйственно-питьевого водопользования на территории России.

Расчет индекса насыщения SI проводился с использованием программного комплекса Solution+ [14]:

$$SI = \lg PA - \lg K_{неq}, \quad (2)$$

где PA — произведение активностей группы веществ; $K_{неq}$ — константа неустойчивости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученной информации показал, что в меженный период 2019 г. изученные поверхностные и подземные воды в бассейне Дамодара в целом характеризуются как пресные, за исключением водотока у химического завода (см. рис. 1, объект VI), где воды соответствовали категории «солончатые» (см. табл. 1), по химическому составу (согласно классификации О.А. Алёкина [15]) — гидрокарбонатные кальциевые и натриевые первого типа (воды водохранилищ на реках Дамодар и Баракар, воды рек Дамодар и Тамла), хлоридные кальциевые третьего типа (подземные воды) и хлоридные натриевые второго типа (один из приемников стоков), по общей жесткости — от очень мягких до умеренно жестких, по величине рН — от нейтральных до слабощелочных (см. табл. 1). Содержание веществ, по которым отмечено нарушение российских нормативов качества (табл. 2), достигает для Fe 3,741 мг/дм³, Mn — 1,243, Al — 1,881, As — 0,0264, Pb — 0,025, Hg — 0,01582 мг/дм³. В целом, за

Таблица 2
Показатели, по которым выявлено отклонение от нормативов хозяйственно-питьевого водопользования Российской Федерации

Объект	Превышение ПДК _{хп} (по O ₂ – ниже норматива)
I	–
II	Фосфаты, NH ₄ ⁺ , ПО, БО
III	NH ₄ ⁺ , F ⁻ , Al, Mn, Fe, ПО, БО
IV	As, БО
V	O ₂ , фосфаты, NH ₄ ⁺ , F ⁻ , Al, Mn, Fe, TI, Pb, ПО, БО
VI	Na ⁺ , Cl ⁻ , F ⁻ , Al, As, I, Br, Hg, ПО, БО
VII	O ₂ , NH ₄ ⁺ , F ⁻ , Al, Mn, Fe, Pb, ПО, БО
VIII	Si, БО

Примечание. Прочерк – нет превышения.

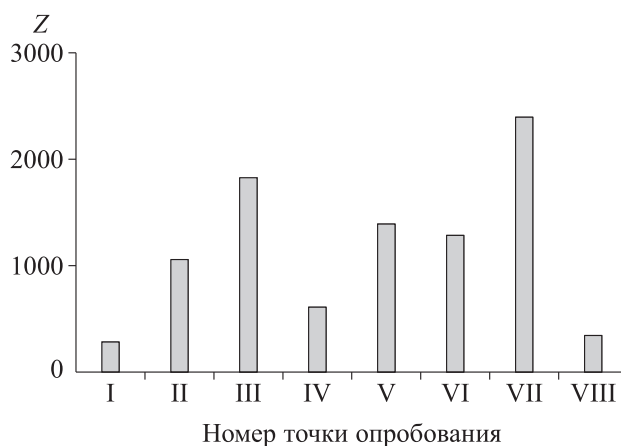


Рис. 2. Показатель геохимического состояния (Z) изученных поверхностных и подземных вод в бассейне р. Дамодар (I–VIII – см. табл. 1).

исключением очень высокой концентрации ртути в воде водотока у химического завода (см. рис. 1, объект VI), полученные результаты отражают региональные природно-антропогенные условия формирования химического состава подземных и поверхностных вод [15–17] и соответствуют данным, полученным ранее [1–8]. Основное отличие связано с тем, что, с одной стороны, в зимнюю межень 2019 г. в производственных сточных водах и приемниках сточных вод выявлены более высокие концентрации Na⁺, Cl⁻, F⁻, NH₄⁺. Значения бихроматной окисляемости и концентрации Pb были, напротив, несколько меньше указанных в [1, 4, 8] значений. По величине показателя Z (1) уровень загрязнения, согласно [12], характеризуется как максимальный (Z > 128) (рис. 2), что является более жесткой, по сравнению с [3–7], оценкой. Соотношение фактических и предельно допустимых веществ первого и второго классов опасности (с точки зрения хозяйственно-питьевых нормативов качества воды в Российской Федерации) изменяется от 1,99 для водохранилища на р. Баракар (см. табл. 1, объект I) до 52,89 для водотока у химического завода (объект VI).

Наилучшее эколого-геохимическое состояние вод выявлено для водохранилища Мэйсон (см. табл. 1, объект I), где общая загрязненность определяется присутствием веществ, концентрация каждого из которых ниже уровня ПДК. Наиболее загрязнены воды малых водотоков – приемников стоков, где были выявлены повышенные концентрации целого ряда веществ, включая редкоземельные элементы, уран (наиболее вероятный источник – горные породы и золоотвалы), мышьяк, свинец и ртуть (сток с промплощадок, стоки химических и сельскохозяйственных предприятий). В целом нарушение нормативов качества чаще всего связано с повышенным содержанием органических веществ по бихроматной и перманганатной окисляемости (5–6 случаев из восьми проб), азота аммонийного, F⁻ и Al (четыре случая), Fe, Mn (три случая), фосфатов, растворенного кислорода, As, Pb, (два случая) (см. табл. 2).

Изученные воды в целом пересыщены относительно карбонатов, соединений с гуминовыми кислотами, кварца и недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов, что в целом совпадает с данными о взаимодействиях подземных вод региона с водовмещающими отложениями [8]. Судя по полученным данным, это является существенным фактором снижения концентраций многих веществ в поверхностных водах, несмотря на значительный уровень антропогенного воздействия (табл. 3). В частности, низкая растворимость карбонатов может приводить к выпадению малорастворимых соединений кальция и магния в виде достаточно крупных частиц (возможно, сульфатов и карбонатов бария), на поверхности которых происходит сорбция соединений ряда микроэлементов [16]. Небольшое количество проб не позволяет уверенно говорить об устойчивых закономерностях, тем не менее коэффициенты корреляции r, превышающие удвоенную погрешность их определения ($|r| > 2 \cdot \frac{1-r^2}{\sqrt{N-2}}$,

где N – объем выборки), отмечены при сравнении содержаний ряда веществ и индексов насыщения для реакций растворения, в том числе растворения: барита с концентрациями Hg (0,56), Br (0,59), As (0,62), F⁻ (0,67), Cd (0,79), Sc (0,68), Ba (0,85), Cr (0,80), Cu (0,60), Sb (0,74), Σ_{гип} (0,85); анортита с концентрациями Al (0,58), Pb (0,59); альбита с концентрациями Na (0,61), Cd (0,64), Cr (0,69), Ba (0,61); кальцита (при наличии растворенного CO₂) с концентрациями Al (0,59), Fe (0,59), Mn (0,60),

Индексы насыщения SI поверхностных и подземных вод в бассейне р. Дамодар

Реакция	Объект (см. табл. 1)							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	-0,86	-0,10	-1,27	-2,45	-1,10	-0,29	-0,61	-2,51
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} =$ $= \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$	0,18	1,54	0,41	-1,01	1,55	0,91	2,05	-1,37
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	-0,65	-0,35	-0,92	-1,43	-0,80	-0,24	-0,62	-1,50
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	-0,13	0,46	-0,08	-0,71	0,53	0,36	0,71	-0,93
$\text{CaГК} = \text{Ca}^{2+} + \text{ГК}$	0,52	0,82	0,77	0,65	0,77	0,86	0,72	1,04
$\text{SiO}_2(\text{кварц}) + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	0,24	0,55	0,14	-0,95	0,31	0,16	0,33	0,84
$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{альбит}) + 11\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 =$ $= \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + 2\text{Na}^+ +$ $+ 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-8,95	-6,63	-8,84	-14,89	-7,40	-6,26	-6,72	-8,14
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{анортит}) + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + \text{Ca}^{2+}$	-19,60	-20,11	-21,19	-22,81	-18,89	-18,63	-17,91	-23,92
$\text{BaSO}_4(\text{барит}) = \text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	-1,84	-0,55	-0,55	-0,91	-0,66	0,02	-0,49	-0,80

F^- (0,61), Pb (0,63); доломита (при наличии растворенного CO_2) с концентрациями Al (0,61), Fe (0,63), Pb (0,66). Кроме того, для рек Северного Вьетнама, расположенных в сходных природных условиях, были отмечены и количественно охарактеризованы аналогичные закономерности, обусловленные снижением концентраций загрязняющих веществ в пределах 11–12 км от выпуска сточных вод [17].

Другой возможный механизм снижения концентраций заключается в выведении из раствора гидроксидов некоторых металлов (включая гидроксиды кальция и железа) при относительно высоких значениях pH, связанных с потреблением углекислого газа микрофлорой (на поверхности оседающих частиц также происходит сорбция и соосаждение микроэлементов [16]). Определенное влияние на уровень содержания растворенных солей, видимо, оказывает и осаждение малорастворимых гуматов металлов, в частности гумата кальция, относительно которого изученные воды были пересыщены во всех случаях (см. табл. 3). В то же время необходимо отметить недонасыщенность вод канала (см. рис. 1, объект IV) кварцем и кальцитом, что необходимо учитывать в процессе водоподготовки.

В частности, как показал анализ состояния донных отложений в устьевой области Меконга [18], целесообразны мероприятия по повышению pH среды и достижению насыщения воды карбонатными минералами за счет увеличения площади и времени взаимодействия поверхностных вод в приемниках стоков и периодической замены части донных отложений грунтами, в составе которых присутствуют карбонаты (в последнем случае может быть имитировано увеличение твердого стока редкой повторяемости). В условиях тропического климата это не исключает необходимости очистки сточных вод и водоподготовки, но позволяет существенно снизить расходы при достижении оптимального результата, в том числе в плане очистки от тяжелых металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования свидетельствуют, с одной стороны, о достаточно низком качестве вод в бассейне р. Дамодар, а с другой — о наличии процессов интенсивного самоочищения. Наилучшее качество (по сочетанию показателей Z и $\Sigma(C_{1-2}/\text{ПДК})$ (см. табл. 1, см. рис. 2) отмечено для водохранилища на р. Баракар (см. рис. 1, объект I), канала из р. Дамодар (объект III) и подземных вод (объект VIII). Наихудшее качество характерно для малых водотоков, непосредственно принимающих стоки крупных предприятий (объекты VI, VII). В целом по длине р. Дамодар (по направлению к устью) качество вод ухудшается. Тем не менее значения $\Sigma(C_{1-2}/\text{ПДК})$ вод этой реки даже ниже по течению от Дургапура заметно меньше соответствующего показателя воды притоков (см. табл. 1, объекты V, VI, VII).

Основные загрязняющие вещества — органические соединения (по перманганатной окисляемости), Al , F^- , NH_4^+ , Fe , Mn . Также отмечено присутствие в значительных количествах фосфатов, As , Pb и некоторых других элементов. С учетом этого оценка состояния водных объектов с использованием

индекса геохимического состояния [12], по мнению авторов, является наиболее комплексной и объективной по сравнению с прочими способами [3–7].

Судя по химическому составу вод, большая часть загрязняющих веществ оседает в донных отложениях водотоков — приемников стоков промышленных предприятий в пределах нескольких километров от створов сброса, что в целом совпадает с выводами других авторов [2] и результатами аналогичных исследований по Вьетнаму [19].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18–55–80015) и Правительства Индии (DST/IMRCD/BRICS/Pilot Call 2/Enviroorganic/2018) в рамках BRICS STI Framework Programme.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Banerjee U.S., Gupta S.** Spatio-temporal variations in hydrochemistry of river Damodar along the stretch of dishergarh to pallaroad, Burdwan, West Bengal, India // *Pollution Research Paper*. — 2010. — Vol. 29, N 2. — P. 267–274.
2. **Banerjee U.S., Gupta S.** Impact of industrial waste effluents on river Damodar adjacent to Durgapur industrial complex, West Bengal, India // *Environ. Monit. Assess.* — 2013. — Vol. 185. — P. 2083–2094.
3. **Saha P.** Assessment of water quality of Damodar River by Water Quality Index Method // *Indian Chemical Engineer.* — 2010. — Vol. 52, N 2. — P. 145–154.
4. **Banerjee R., Ghosh A.R.** Evaluation of ecological characteristics of river Damodar adjacent to Asansol Industrial Complex, West Bengal (India) // *International Journal of Environmental Sciences*. — 2012. — Vol. 2, N 3. — P. 1314–1323.
5. **Mukherjee D., Lata Dora S., Tiwary R.K.** Evaluation of Water Quality Index for drinking purposes in the case of Damodar River, Jharkhand and West Bengal Region, India // *Journal of Bioremediation & Biodegradation*. — 2012. — Vol. 3, N 9. — P. 1–5.
6. **Rama B., Manoj K., Kumar P.P.** Index analysis, graphical and multivariate statistical approaches for hydrochemical characterisation of Damodar River and its Canal System, Durgapur, West Bengal, India // *International Research Journal of Environment Sciences*. — 2013. — Vol. 2, N 2. — P. 53–62.
7. **Haldar D., Halder S., Das (Saha) P., Halder G.** Assessment of water quality of Damodar River in South Bengal region of India by Canadian Council of Ministers of Environment (CCME) Water Quality Index: a case study // *Desalination and Water Treatment*. — 2016. — Vol. 57, N 8. — P. 3489–3502.
8. **Batabyal A.K.** Hydrogeochemistry and quality of groundwater in a part of Damodar Valley, Eastern India: an integrated geochemical and statistical approach // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. — 2018. — Vol. 32. — P. 2351–2368.
9. **Mandal T., Maity S., Dasgupta D., Datta S.** Advanced oxidation process and biotreatment: Their roles in combined industrial wastewater treatment // *Desalination*. — 2010. — Vol. 250. — P. 87–94.
10. **ГОСТ Р 51592-2000.** Вода. Общие требования к отбору проб. Введ. 2001–07–01. — М.: Издательство стандартов, 2000. — 34 с.
11. **Р 52.24.353-2012.** Отбор проб поверхностных вод и очищенных сточных вод. — М.: Росгидромет, 2012. — 34 с.
12. **Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000.** — М.: Изд-во Ин-та минералогии, геохимии и кристаллохимии редких металлов, 2002. — 92 с.
13. **РД 52.24.622-2017.** Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. — М.: Росгидромет, 2017. — 96 с.
14. **Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А.** Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // *Геоэкология*. — 2003. — № 2. — С. 108–119.
15. **Алёкин О.А.** Основы гидрохимии. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 444 с.
16. **Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.** Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. — М.: Наука, 2004. — 677 с.
17. **Shvartsev S.L.** Geochemistry of fresh groundwater in main landscape zones of the Earth // *Geochem. International*. — 2008. — Vol. 46, N 13. — P. 1285–1398.
18. **Фунг Т.З.** Эколого-геохимическое состояние реки Меконг (Республика Вьетнам) по результатам изучения донных отложений: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. — 25 с.
19. **Нгуен В.Л., Савичев О.Г.** Оценка влияния разработки полезных ископаемых на состояние водотоков в северной части бассейна реки Красной (Вьетнам) // *География и природ. ресурсы*. — 2018. — № 2. — С. 172–180.

Поступила в редакцию 09.07.2019

После доработки 30.09.2019

Принята к публикации 24.03.2020