

УДК 556.314:556.535.8

СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Чжоу Дань¹,
929177582@qq.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования определяется необходимостью учета взаимодействий речных вод с донными отложениями при нормировании антропогенных воздействий на водные объекты.

Цель: разработка модели трансформации загрязняющих веществ в водных объектах с учетом разбавления стоков, взаимодействия речных вод с донными отложениями и методики нормирования сбросов загрязняющих веществ.

Методы: математическое моделирование гидрохимических процессов.

Результаты и выводы. Разработана математическая модель трансформации загрязняющих веществ в водных объектах с учетом разбавления стоков и взаимодействия речных вод и донных отложений. Ее апробация на примере малых рек в северной части Вьетнама (реки Бан Тхи и Дай в бассейне р. Хонг) показала, что химический состав вод изученных рек определяется более чем на 60 % взаимодействиями речных вод с донными отложениями в результате осаждения малорастворимых соединений ряда металлов и соосаждения микроэлементов на твердых частицах. Это приводит к заметному снижению концентраций многих веществ на участках до 4,5–5,0 км. Влияние водного стока проявляется, прежде всего, в изменениях твердого стока, в меньшей степени – в регулировании внутриводных процессов, для которых требуется более продолжительное время установления равновесия в растворе. На основе предложенной модели разработана ее упрощенная версия и методика нормирования сбросов загрязняющих веществ для вариантов наличия и отсутствия данных наблюдений за химическим составом речных вод. При этом влияние взаимодействий с донными отложениями учитывается косвенно через структуру модели и значения ее параметров. Апробация упрощенной модели выполнена на примере р. Цзиньцзян в водосборе озера Поянху (Китай).

Ключевые слова:

Математическая модель, трансформация загрязняющих веществ, разбавление, речные воды, донные отложения, водосбор реки Хонг, водосбор озера Поянху.

Введение

Оценка допустимых концентраций загрязняющих веществ $C_{w,lim}$ в стоках является важным этапом и одновременно условием охраны и восстановления водных объектов. Она должна, с одной стороны, быть научно обоснованной, а с другой – опираться на данные государственной системы наблюдений и быть встроенной в систему принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

В настоящее время имеется большое количество разработок по этой теме, наиболее полный обзор которых приведен в [1–6]. Кроме того, в законодательствах разных стран введены нормативные документы, в которых содержатся рекомендации по гидрохимическим расчетам. В частности, в Российской Федерации (РФ) в настоящее время используется методика оценки фоновых концентраций C_b в поверхностных водных объектах [7] и методика определения нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ G_{lim} [8]. Согласно последнему документу, расчет величины G_{lim} конкретного вещества сводится к определению элементов уравнений (1), (2) с учетом фоновой и предельно допустимой концентрации вещества (ПДК):

$$G_{lim} = C_{w,lim} q_w = (C_b + n_s (ПДК - C_b)) q_w, \quad (1)$$

$$n_s = n_m n_0, \quad (2)$$

где q_w – расход сточных вод, м³/с; n_s , n_m , n_0 – кратность общего, основного и начального разбавления, соответственно; концентрации вещества (C_b , $C_{w,lim}$, ПДК) – в мг/дм³. В Китайской народной республике (КНР) приняты нормативные документы в области охраны водных объектов [9–11], в соответствии с которыми установлены стандарты качества воды для объектов разного назначения и метод расчета максимально допустимого загрязнения рек.

Очевидно, что при ПДК < C_b возникает необходимость модификации уравнения (1) и обоснования действий по доказательству природного происхождения вещества в водном объекте. Эта задача до сих пор не имеет однозначного и убедительного решения, впрочем, как и проблема учета взаимовлияния эколого-геохимического состояния вод и донных (водоотдающих) отложений. Все это и определяет актуальность дальнейших исследований в части разработки способов оценки допустимого воздействия на водные объекты.

Именно такая цель и была поставлена авторами при рассмотрении проблемы определения допустимого антропогенного воздействия на водные объекты применительно к рекам зоны муссонных лесов субтропического и субэкваториального климатических

поясов (согласно районированию, приведенному в [12]) в юго-восточной части Китая (бассейн озера Поянху – бассейн р. Янцзы) и северной части Вьетнама (бассейн р. Хонг).

Методика исследования и исходные данные

Соответственно цели исследования методика включала двухэтапное построение и последующую апробацию математической модели трансформации химического состава речных вод в результате поступления в реку сточных вод или вод притоков. На первом этапе рассматривались процессы, учитывающие взаимодействие речных вод с донными отложениями. Но данные совместных наблюдений за расходами воды, химическим составом речных вод и донных отложений, химическим составом сточных вод получить достаточно сложно, и в современных системах экологического мониторинга они проводятся не часто. Обычно основной упор делается на наблюдениях за химическим составом речных и сточных вод, в ряде случаев сопровождаемых измерением расходов воды. Кроме того, даже при наличии данных о составе донных отложений необходимо учитывать возможную неоднородность рядов, связанную с различиями в используемых методиках отбора, подготовки и анализа донных отложений (при изучении состава воды соблюсти условия однородности обычно гораздо легче). Поэтому на втором этапе модель взаимодействия речных вод и донных отложений была адаптирована к использованию данных только о химическом составе сточных и речных вод с сохранением исходной структуры.

На первом этапе были использованы материалы исследования влияния добычи свинцово-цинковых руд на притоки р. Хонг (Красная река, Red river) на севере Вьетнама в уезде Чодонь провинции Баккан – реки Бан Тхи и Дай. Исходные данные и методика полевых (выполнены Нгуен Ван Луеном с учетом требований [13, 14]), камеральных (О.Г. Савичев и Нгуен Ван Луен) и лабораторных работ (выполнены в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (ТПУ) под руководством к.г.-м.н. А.А. Хвощевской) изложены в [15–17]. Здесь лишь отметим, что при определении состава воды и водных вытяжек из донных отложений (пробы из верхнего слоя около 0,2 м с последующими высушиванием при температуре 100 °С и измельчением до фракции с диаметром частиц до 0,5 мм) использовались методы: потенциометрический (рН); титриметрический (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , Cl^- , перманганатная (ПО) и бихроматная (БО) окисляемость; турбидиметрический (SO_4^{2-}); фотометрический (Si , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , фосфаты); ионная хроматография (Na^+ , K^+); масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D (Li , Al , P , Si , Ti , V , Cr , Mn , Fe , Co , Ni , Cu , Zn , As , Se , Rb , Sr , Ag , Cd , Sn , Sb , Cs , Ba , La , Ce , Sm , Eu , Tb , Yb , Lu , Hf , Hg , Pb , Bi) [16, 17]. Кроме того, в ТПУ был выполнен анализ минерального состава фракции до 0,5 мм с использованием сканирующего электронного микроскопа

HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010 (аналитик Е.В. Перегудина). Съёмка дифрактограмм проводилась на дифрактометре Rigaku Ultima IV (аналитик А.В. Канаки) [18].

Гидравлические характеристики потоков вычислены согласно [1, 8, 19], в том числе: коэффициент Шези $C_{r,M}$ – по формуле Маннинга (3); коэффициент гидро-дисперсии D_{FR} , коэффициент смешения γ_m , кратность основного разбавления n_m – методом В.А. Фролова и И.Д. Родзиллера по уравнениям (4)–(7):

$$C_{r,M} = \frac{h_a^{1/6}}{n_r}, \quad (3)$$

$$D_{FR} = \frac{g v_a h_a}{37 n_r C_{r,M}^2}, \quad (4)$$

$$\alpha_m = \varphi \xi^3 \sqrt{\frac{D_{FR}}{q_w}}, \quad (5)$$

$$\gamma_m = \frac{1 - \exp(-\alpha_m \sqrt[3]{L_{wk}})}{1 + \frac{Q}{q_w} \exp(-\alpha_m \sqrt[3]{L_{wk}})}, \quad (6)$$

$$n_m = \frac{\gamma_m Q + q_w}{q_w}, \quad (7)$$

где n_r – коэффициент шероховатости; h_a – средняя глубина потока, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; v_a – средняя скорость течения, м/с; α_m – коэффициент гидравлических условий; L_{wk} – расстояние от створа устья притока до контрольного створа, м; φ – коэффициент извилистости; ξ – коэффициент места положения выпуска (для берегового выпуска $\xi=1$); q_w – расход сточных вод или вод притока. Кратность начального разбавления в уравнении (2) по условиям [8] принята $n_0=1$. Интегральная сводка гидравлических и геохимических характеристик приведена в табл. 1.

Выбор химических элементов для апробации модели определяется целесообразностью изучения изменений в речных водах концентраций: 1) кальция – элемента, в значительной степени определяющего поведение карбонатной системы, включая функционирование карбонатного барьера – важного фактора регулирования химического состава вод [4, 20, 21]; 2) цинка – загрязняющего вещества, поступающего в водные объекты в процессе добычи свинцово-цинковых руд; 3) меди – вещества, непосредственно не входящего в перечень основных загрязняющих веществ при добыче свинцово-цинковых руд, но сопутствующего основному загрязнению и входящему в состав веществ, используемых в сельском хозяйстве [15–17].

На втором этапе были использованы данные, полученные в процессе изучения эколого-геохимического состояния водосбора пресноводного озера Поянху (одного из крупнейших в мире), которое является элементом гидрографической системы р. Янцзы, а именно – материалы изучения влияния сбросов сточных вод в реку Цзиньцзян – приток р. Ганьцзян, которая, в свою очередь, является крупнейшим притоком

озера Поянху [22, 23]. Полевые работы выполнены коллективом китайских, российских и индийских специалистов в рамках проекта BRICS в начале ноября 2019 г. С российской стороны отбор проб (с учетом [13, 14]) провели к.г.-м.н. Е.А. Солдатов (Институт геохимии РАН) и к.г.-м.н. И.С. Иванова (Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН). Лабораторные работы выполнены в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ (под руководством к.г.-м.н. А.А. Хвасцевской) с использованием тех же методов, что и при изучении эколого-геохимического состояния рек Северного Вьетнама.

На реке Цзиньцзян в створах обследованных выпусков у г. Юньян (табл. 2) расходы речных и сточных вод не измеряются. С учетом этого использована следующая методика гидравлических расчетов:

- 1) морфометрические характеристики и расходы воды р. Цзиньцзян в среднем за 2019 г. ($Q_{Jb,y}$) и октябрь 2019 г. (Q_{Jb} ; этот же расход рассматривается как расчетный по состоянию на 01.11.2019 г.) приняты согласно [22–29], в том числе: расходы воды $Q_{Jb,y}=219,7 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{Jb}=47,3 \text{ м}^3/\text{с}$; площади водосборов р. Ганьцзян (F_G) и р. Цзиньцзян в створе выпуска (F_{Jb}): $F_G=82809 \text{ км}^2$; $F_{Jb}=6021 \text{ км}^2$;
- 2) для расчетных расходов воды Q_{Jb} и $Q_{Jb,y}$ при квазиравномерном движении [30] подобраны значения средней глубины по условию (8):

$$\frac{h_{a,Jb,y} (gB_{Jb,y})^{0,25}}{\sqrt{Q_{Jb,y}}} = \frac{h_{a,Jb} (gB_{Jb})^{0,25}}{\sqrt{Q_{Jb}}} = M(\Gamma), \quad (8)$$

где индекс «Jb,y» соответствует состоянию в среднем за 2019 г., индекс «Jb» – состоянию на 01.11.2019 г.; ширина реки B определялась по снимкам Google Earth; получено: $B_{Jb,y}=160 \text{ м}$; $B_{Jb}=150 \text{ м}$; $h_{a,Jb,y}=1,17 \text{ м}$; $h_{a,Jb}=0,55 \text{ м}$; $M(\Gamma)$ – безразмерная глубина по [30]; $M(\Gamma)=0,498$; $v_a=0,57 \text{ м/с}$ (расчет по формуле Шези–Маннинга при $n_r=0,030$);

- 3) по результатам полевого обследования по состоянию на 01.11.2019 г. определены расходы сточных вод: выпуск производственных стоков p101 – $q_{w101p}=0,012 \text{ м}^3/\text{с}$; выпуск хозяйственно-бытовых стоков p100 – $q_{w100p}=0,137 \text{ м}^3/\text{с}$; расчет выполнен при допущении, что на выходе из коллектора глы-

бина потока сточных вод равна критической глубине.

Все расчёты проведены с использованием пакета MS Excel, в том числе оптимизация параметров модели (инструмент «Поиск решения», метод общего понижающего градиента) при условии минимизации относительной ошибки расчета:

$$\delta = \frac{100|C_{ms} - C_{cl}|}{C_{ms}}, \quad (9)$$

где C_{ms} и C_{cl} – концентрации вещества в воде измеренные и вычисленные.

Гидрохимическая характеристика исследуемых рек

Реки Бан Тхи и Дай – элементы речной системы р. Хонг (Бан Тхи – Гам – Ло – Хонг; Дай–Ло–Хонг). В качестве выпусков рассмотрены притоки, в которые поступает поверхностный и подземный сток с горнодобывающих предприятий: р. Ченгу – приток р. Бан Тхи; р. Намду – приток р. Дай. Воды указанных выше рек характеризуются по классификации [31] в среднем как пресные с малой и средней минерализацией (табл. 1), гидрокарбонатные кальциевые второго и третьего типов, с очень малой перманганатной окисляемостью, согласно [32] – олиготрофного и мезосапробного классов, отличаются превышением принятых в РФ нормативов качества для водных объектов хозяйственно-питьевого назначения по содержанию Si, Fe, Al, As, Pb, для рыбохозяйственного назначения – по содержанию NO_2^- , Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Pb [15–17].

Водные вытяжки из донных отложений рек также пресные, гидрокарбонатные кальциевые третьего типа, но уже с повышенной перманганатной окисляемостью. Минеральный состав донных частиц (фракция до 0,5 мм) характеризуется преобладанием кварца; в заметных количествах присутствуют слюды, гидрослюда и хлориты, в меньшей степени – плагиоклаз и карбонаты (табл. 1) [16–18]. Общее состояние рек оценивается как «неудовлетворительное», что связано с сочетанием природных и антропогенных факторов, в том числе влиянием добычи свинцово-цинковых руд. Это воздействие прослеживается на протяжении 11–12 км с максимальным проявлением на участках до 4,5–5,0 км [15–17].

Таблица 1. Гидравлические и геохимические характеристики рек Бан Тхи, Дай в фоновом (bs) и контрольном (cs) створах и их притоков [15–18]

Table 1. Hydraulic and geochemical characteristics of the Ban Thi and Dai rivers in background (bs) and control (cs) cross-sections [15–18]

Показатель (формула) Indicator (formula)	Река Бантхи и ее приток The Ban Thi river and its tributary; date 19.02.16; point:			Река Дай и ее приток The Dai river and its tributary; date 20.02.16; point:		
	M1602	M1601	M1605	M1609	M1608	M1610
Створ, приток Cross-section, tributary	bs	cs	р. Ченгу Chengu	bs	cs	р. Намду Namdu
Длина реки от истока L_q , км River length from a source L_q , km	8,99	13,14	7,98	29,57	32,82	11,32
Площадь водосбора F_b , км ² Basin area F_b , km ²	75,4	134,0	48,0	110,5	164,8	40,8
Средняя глубина потока h_a , м Average depth of a stream h_a , m	0,44	0,35	0,15	0,24	0,51	0,50
Ширина потока B , м Width of a stream B , m	11	18	7	12	34	11

Показатель (формула) Indicator (formula)	Река Бантхи и ее приток The Ban Thi river and its tributary; date 19.02.16; point:			Река Дай и ее приток The Dai river and its tributary; date 20.02.16; point:		
	M1602	M1601	M1605	M1609	M1608	M1610
Средняя скорость течения v_a , м/с Average velocity v_a , m/s	0,09	0,12	0,26	0,42	0,20	0,20
Расход воды Q , м ³ /с Water discharge Q , m ³ /s	0,42	0,71	0,29	1,15	3,46	1,11
Коэффициент шероховатости n_r Factor of roughness n_r	0,08	0,08	0,10	0,08	0,07	0,08
Коэффициент Шези $C_{r,M}$, м ^{0,5} /с Chezy factor $C_{r,M}$, m ^{0,5} /s (3)	10,90	10,50	7,32	9,85	13,74	11,13
Коэффициент гидродисперсии D_{FR} , м ² /с Hydrodispersion factor D_{FR} , m ² /s (4)	0,001115	0,001218	0,001958	0,003417	0,002213	0,002630
Коэффициент смешения γ_m (6) Factor of mixture γ_m	–	0,83	–	–	0,79	–
Кратность основного разбавления n_m (7) Frequency rate of the basic dilution n_m	–	2,23	–	–	1,82	–
Расстояние от устья притока до контрольного створа $L_{нк}$, м Distance from a tributary mouth up to control cross-section $L_{нк}$, m	–	2450	–	–	1900	–
Время добегания от устья притока до контрольного створа τ_w , с Time of movement from a tributary mouth up to control cross-section τ_w , s	–	21208	–	–	9390	–
Показатели эколого-геохимического состояния речных вод Parameters of ecological and geochemical condition of river waters						
Температура воды T_{rw} , °C Water temperature T_{rw} , °C	14,5	14,0	15,0	15,5	16,0	15,0
pH, единицы pH/unit of pH	8,00	7,61	7,50	7,87	7,89	7,52
Сумма главных ионов Σ_{mi} , мг/дм ³ Sum of the main ions Σ_{mi} , mg/dm ³	333,3	318,4	290,0	231,0	224,7	264,5
Перманганатная окисляемость (ПО), мгО/дм ³ Permanganate oxidizability (PO), mgO/dm ³	0,13	0,28	0,41	0,13	0,36	0,41
Концентрация в воде $C(\text{Ca})$, мкг/дм ³ $C(\text{Ca})$ concentration in water, mkg/dm ³	83,2	76,6	67,2	48,8	49,1	62,5
Концентрация в воде $C(\text{Cu})$, мкг/дм ³ $C(\text{Cu})$ concentration in water, mkg/dm ³	0,32	0,43	0,39	0,63	0,46	0,36
Концентрация в воде $C(\text{Zn})$, мкг/дм ³ $C(\text{Zn})$ concentration in water, mkg/dm ³	70,61	48,11	1,28	3,63	2,34	7,52
Показатели эколого-геохимического состояния донных отложений Parameters of ecological and geochemical condition of river sediments						
Концентрация в водной вытяжке $S(\text{Ca})$, мг/кг $S(\text{Ca})$ concentration in water extract, mg/kg	217,5	255,0	242,0	257,5	228,5	105,0
Концентрация в водной вытяжке $S(\text{Cu})$, мг/кг $S(\text{Cu})$ concentration in water extract, mg/kg	0,14	0,12	0,10	0,10	0,10	0,08
Концентрация в водной вытяжке $S(\text{Zn})$, мг/кг $S(\text{Zn})$ concentration in water extract, mg/kg	1,52	0,27	0,03	0,05	0,10	0,17
Содержание минерала во фракции донных отложений с диаметром частиц <0,5 мм Mineral content in the river fraction of bottom sediments with particle diameter <0,5 mm						
Кварц/Quartz	83,4	46,0	59,2	74,1	83,0	90,0
Плагиоклаз/Plagioclase	1,0	2,5	2,0	1,2	1,0	1,0
Ортоклаз/Potassium feldspar	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
Кальцит/Calcite	2,2	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Мусковит (иллит)/Muscovite (illite)	9,8	40,4	34,2	14,0	7,5	8,0
Каолинит/Kaolinite	1,1	2,6	1,3	2,5	1,5	0,0
Хлорит/Chlorite	2,5	5,5	2,3	8,2	6,0	1,0
Индексы насыщения SI речных вод (w) и водных вытяжек (e) из донных отложений Indexes of saturation of river waters (w) and water extracts (e) from bottom sediments						
(w): $\text{CaCO}_3(\text{calcite})=\text{Ca}^{2+}+\text{CO}_3^{2-}$	0,47	0,05	–0,11	0,00	0,03	–0,16
(e): $\text{CaCO}_3(\text{calcite})=\text{Ca}^{2+}+\text{CO}_3^{2-}$	–0,39	–8,66	–8,64	–8,63	–8,59	–9,00
(w): $\text{Ca}(\text{ГК})=\text{Ca}^{2+}+\text{ГК}$	1,11	1,08	1,04	0,91	0,92	1,02
(e): $\text{Ca}(\text{ГК})=\text{Ca}^{2+}+\text{ГК}$	0,90	0,96	0,94	0,95	0,92	0,62
(w): $\text{ZnCO}_3(\text{smithsonite})=\text{Zn}^{2+}+\text{CO}_3^{2-}$	2,23	1,68	–0,01	0,70	0,53	0,75
(e): $\text{ZnCO}_3(\text{smithsonite})=\text{Zn}^{2+}+\text{CO}_3^{2-}$	–4,62	–12,86	–13,05	–12,67	–12,77	–13,06

Примечание: Σ_{mi} – сумма главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}); расчет индексов насыщения $SI=\lg\Pi A-\lg K_{\text{неq}}$ речных вод (w) и водных вытяжек (e) выполнен по методике, изложенной в [33]; ΠA – произведение активностей группы веществ; $K_{\text{неq}}$ – константа неустойчивости.

The note: Σ_{mi} is the sum of the main ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}); calculation of indexes of saturation $SI=\lg\Pi A-\lg K_{\text{неq}}$ of river waters (w) and water extracts (e) is executed by a technique stated in [33]; ΠA is product of substances activities; $K_{\text{неq}}$ is a constant of instability.

Воды р. Ганьцзян и ее притоков, а также грунтовые воды в речных долинах пресные с малой и средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые, от олигосапробных (речные воды) до мезосапробных (речные и грунтовые воды) [34–37]. Изученные сточные воды пресные с большим разбросом содержаний растворенных веществ; хозяйственно-бытовые стоки гидрокарбонатные кальциевые, производственные сульфатные натриевые (табл. 2).

В целом изученные водные объекты характеризуются наличием пресных вод с достаточно низкой перманганатной окисляемостью и весьма интенсивным снижением концентраций загрязняющих веществ по длине рек, несмотря на высокую антропогенную нагрузку (уже по нормативному образованию загрязняющих веществ на густонаселенных территориях). Это свидетельствует о значительной способности рассмотренных рек к самоочищению и, возможно, связано с особенностями термического режима водных объектов, которые определяют высокую скорость биохимических процессов и более низкую (по сравнению с реками умеренного пояса) растворимость ряда соединений.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ многочисленных публикаций в области гидрохимического моделирования [1–3, 5, 6, 20, 38–40] и опыта исследований рек Вьетнама [15–18, 41] позволил сформулировать основные черты и допущения модели трансформации химического состава речных вод с учетом их взаимодействия с донными отложениями: 1) в ее основе – стационарное уравнение (10), описывающее гидродисперсию и адвективный перенос, отклонения от равновесия, обусловленные преимущественно внутриводными процессами, и взаимодействия с донными отложениями, связанные с процессами осаждения – растворения и сорбции–десорбции; 2) стационарность уравнения (10) определяется целесообразностью анализа трансформации химического состава вод при наихудших гидрологических условиях, наблюдаемых во многих случаях при минимальном водном стоке в течение относительно продолжительного времени; 3) изменение концентрации вещества в речных водах пропорционально отклонению фактической концентрации C от равновесной C_p , причем это отклонение пропорционально флуктуациям модуля водного стока $M=Q/F_b$ (11), где Q – расход воды, м³/с; F_b – площадь водосбора, км²; 4) концентрация вещества C_x в створе x с учетом разбавления сточных вод с концентрацией C_w речными водами с концентрацией C_b согласно (1)–(7) соответствует аналитическому решению (12) с удельной скоростью изменения концентрации вещества в речных водах k_z (13); 5) максимально возможная концентрация вещества в донных отложениях S_m зависит от гранулометрического, минерального и химического состава донных отложений (через величину S_{m0}) и pH речных вод (14); 6) решением (10) при отсутствии внешних воздействий является уравнение (15), причем при $k_{pM}=0$ оно сводится к уравнению сорбции Лэнгмюра; 7) итоговое уравнение для оценки допустимой концентрации загрязняющего вещества в сточных водах $C_{w,lim}$ с учетом (12) приобретает вид (16):

$$v \frac{\partial C}{\partial x} \approx k_{pM} (C_p - C) + k_s (S - k_c (S_m - S) C) = k_z (C_e - C), \quad (10)$$

$$k_{pM} = k_p \left(\frac{Q}{F_b} \right)^{k_M}, \quad (11)$$

$$C_x = C_e + \left(C_b + \frac{C_w - C_b}{n_s} - C_e \right) \exp(-k_z \tau_w), \quad (12)$$

$$k_z = k_{pM} + k_s k_c (S_m - S), \quad (13)$$

$$S_m = S_{m0} \text{pH}^{k_{pH}}, \quad (14)$$

$$C_e = \frac{k_{pM} C_p + k_s S}{k_z} = C_e(C) + C_e(S), \quad (15)$$

$$C_{w,lim} = ((\text{ПДК} - C_e) \exp(k_z \tau_w) + C_e - C_b) n_s + C_b, \quad (16)$$

где v – скорость переноса вдоль оси x , м/с; k_p , k_M , k_{pM} – коэффициенты, учитывающие влияние на концентрацию вещества в речной воде отклонения от равновесного состояния C_p (k_p), модуля флуктуаций водного стока (k_M) и их совместного воздействия (k_{pM}); k_s и k_c – коэффициенты, учитывающие влияние градиента концентраций вещества в донных отложениях и речной воде (k_s) и пересчета соотношения вещества в донных отложениях и речных водах; S , S_m – фактическая и максимально возможная сорбционная способность грунтов (при наблюдаемом химическом составе и pH); S_{m0} , k_{pH} – региональная компонента S_m и показатель степени влияния pH вод на величину S_m ; $C_e(C)$ и $C_e(S)$ – составляющие C_e . В качестве C_p в первом приближении используются средние арифметические и средние геометрические значения концентраций (отдельно для рек Бан Тхи и Дай [16, 17]) с выбором варианта с минимальной погрешностью δ (9).

Апробация модели ((3)–(7), (10)–(16)) показала, что погрешность определения концентраций Ca, Cu, Zn в водах рек Бан Тхи и Дай не превышает 1 % (табл. 3). Это свидетельствует о возможности ее использования и для практических расчетов (при наличии данных о составе донных отложений), и для анализа процессов взаимодействия речных вод с донными отложениями. В частности, судя по полученным данным (табл. 3), уровень содержания изученных химических элементов определяется, преимущественно, взаимодействием речных вод с донными отложениями (более 60 %). Эти взаимодействия в случае Zn (в некоторой степени) и Cu связаны с сорбцией на твердых частицах, а в случае Zn и, особенно, Ca – с осаждением малорастворимых соединений, что подтверждается термодинамическими расчетами и материалами изучения минерального состава донных отложений (табл. 1). Роль внутриводных процессов, связанных с отклонением фактической концентрации от равновесного значения, наиболее значима для меди. Для кальция и цинка время установления равновесия в растворе, судя по данным (табл. 3), заметно больше времени добегающего водных масс от выпуска (устья притока) до контрольного створа.

Таблица 2. Физико-химические и геохимические показатели состояния р. Цзиньцзян, сточных вод и результаты расчета трансформации химического состава речных вод

Table 2. Physical and chemical and geochemical parameters of the Jinjiang river condition, sewage and results of transformation simulation of river water chemical composition

Показатель Indicator	Единицы измерения Units	Река Цзиньцзян Jinjiang river					Характерные значения показателей состояния вод Characteristic values of parameters of a water condition					$k_z, c^{-1}/s^{-1}$
		0,5 км от устья, пункт р95 0,5 kms from a mouth, p95	ниже г. Юньцзян, пункт р102 below the Gao'an city, p102	г. Шангао, пункт р98 выше р102, р100, р101 The Shangao city, p98, above p102, р100, р101	хозяйственно-бытовые стоки, пункт р100; 0,09 км выше р102 household waste water, p100, 0,09 km above p102	производственные стоки, пункт р101; 0,18 км выше р102 industrial effluents, p101; 0,18 km above p102	C_g	C_a	C_{x1}	C_{x2}	C_e	
T_{rw}	°C	22,8	21,6	21,1	22,0	23,3	21,9	21,9	–	–	–	–
pH	ед. pH unit of pH	6,98	6,99	6,96	6,93	7,55	6,91	6,92	–	–	–	–
CO ₂	мг/дм ³ mg/dm ³	7,0	3,5	3,5	7,0	3,5	5,2	6,4	–	–	–	–
Σ_{mi}	то же the same	180,8	180,3	176,8	234,1	951,7	191,4	206,5	–	–	–	–
Ca ²⁺	–/–	26,1	27,6	24,4	28,2	89,1	25,9	28,9	26,9	27,6	25,7	–0,001653
Mg ²⁺	–/–	3,6	3,4	3,2	3,8	9,2	4,7	5,6	3,4	3,4	4,6	–0,000407
Na ⁺	–/–	14,9	14,3	19,8	24,1	175,8	11,8	12,4	17,5	14,3	9,6	0,004309
K ⁺	–/–	2,8	2,9	2,5	9,0	23,2	4,7	8,3	2,5	2,9	1,5	0,003281
HCO ₃ [–]	–/–	92,0	93,0	87,0	69,0	132,0	87,1	100,9	93,5	93,0	35,9	–0,000573
Cl [–]	–/–	15,4	14,0	10,8	33,0	200,0	14,3	16,8	13,6	14,0	8,4	0,003387
SO ₄ ^{2–}	–/–	25,8	25,0	29,0	23,0	320,0	24,4	25,7	31,2	25,0	17,1	0,002801
NO ₃ [–]	–/–	<0,1	<0,1	<0,1	44,00	2,35	0,30	8,12	0,05	0,05	0,05	0,050017
NO ₂ [–]	–/–	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,000000
NH ₄ ⁺	–/–	0,08	<0,05	<0,05	0,06	0,47	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,004942
P	–/–	0,09	0,07	0,04	0,66	0,21	0,04	0,05	0,04	0,07	0,03	0,007817
Si	–/–	4,81	5,69	5,11	4,63	3,55	4,99	5,21	5,45	5,69	2,26	–0,000840
Fe	–/–	0,131	0,039	0,062	0,043	0,175	0,06	0,08	0,06	0,04	0,02	0,004164
Al	мкг/дм ³ mkg/dm ³	37,95	11,32	16,35	7,06	167,09	11,78	16,50	15,92	11,32	7,31	0,003199
Ti	то же the same	1,20	0,42	0,26	0,97	1,40	0,40	0,48	0,29	0,42	0,10	0,000366
V	–/–	1,40	1,34	1,05	0,84	80,20	0,96	1,30	2,32	1,34	0,55	0,003831
Cr	–/–	0,64	0,70	0,65	0,53	1,26	0,73	0,80	0,71	0,70	0,35	–0,000638
Mn	–/–	22,38	6,84	8,24	18,24	230,04	10,58	12,50	8,63	6,84	4,76	0,006722
Co	–/–	0,10	0,05	0,05	0,20	0,96	0,06	0,07	0,05	0,05	0,01	0,003352
Ni	–/–	0,38	0,46	0,73	0,66	3,89	0,58	0,64	0,58	0,46	0,30	0,004069
Cu	–/–	1,12	0,71	0,95	0,42	4,12	0,79	0,84	0,91	0,71	0,41	0,001631
Zn	–/–	0,43	0,49	0,87	3,87	14,23	0,86	2,86	0,50	0,49	0,35	0,011660
As	–/–	2,21	1,82	1,66	1,68	89,40	1,10	1,48	3,07	1,82	0,08	0,002756
Se	–/–	0,87	1,19	1,44	0,08	4,16	0,98	1,03	1,49	1,19	1,27	0,001059
Br	–/–	194,79	114,98	323,00	51,63	280,24	68,97	114,90	205,75	114,98	28,52	0,003188
Rb	–/–	8,16	7,80	10,63	17,48	94,21	9,81	11,70	9,30	7,80	2,25	0,002973
Sr	–/–	89,72	88,69	61,38	128,94	170,57	97,10	119,62	72,20	88,69	108,81	0,001115
Y	–/–	0,33	0,05	0,08	0,02	0,16	0,19	0,35	0,07	0,05	0,01	0,001062
Mo	–/–	0,67	1,17	0,26	0,46	250,23	0,42	0,76	3,02	1,17	0,65	0,007922
Cd	–/–	0,02	0,00	0,02	0,00	0,18	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,019802
Sn	–/–	0,02	0,01	0,01	0,04	0,41	0,03	0,08	0,02	0,01	0,00	0,003419
Sb	–/–	0,28	0,39	0,22	0,28	32,56	0,19	0,21	0,72	0,39	0,18	0,004904
I	–/–	7,90	8,95	17,71	6,16	61,43	8,04	8,64	13,73	8,95	2,79	0,002582
Cs	–/–	0,32	0,18	0,56	0,23	8,13	0,25	0,34	0,39	0,18	0,04	0,005041
Ba	–/–	25,36	21,18	16,30	14,69	18,23	30,99	36,21	19,50	21,18	33,32	0,001296
W	–/–	1,05	11,44	0,15	0,07	3060,57	0,26	1,88	28,50	11,44	8,69	0,010101
Hg	–/–	0,02	0,02	0,03	0,03	70,81	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02	0,026671
Pb	–/–	0,56	0,09	0,25	0,07	0,38	0,31	0,51	0,14	0,09	0,06	0,005461
La	–/–	0,44	0,05	0,09	0,01	0,13	0,18	0,37	0,08	0,05	0,01	0,001472
Ce	–/–	1,11	0,12	0,22	0,02	0,18	0,16	0,50	0,18	0,12	0,03	0,001601
Pr	–/–	0,11	0,02	0,02	0,00	0,03	0,04	0,09	0,02	0,02	0,00	0,000606
Nd	–/–	0,45	0,05	0,08	0,02	0,13	0,15	0,33	0,07	0,05	0,02	0,001210
Sm	–/–	0,09	0,01	0,02	0,00	0,05	0,04	0,08	0,02	0,01	0,01	0,002985
U	–/–	0,51	0,38	0,35	0,01	1,17	0,25	0,49	0,43	0,38	0,03	–0,000820
ПО/PO	мгО/дм ³ mgO/dm ³	2,48	1,14	1,30	2,22	2,80	0,79	1,21	1,13	1,14	0,45	0,001814

Примечание: расчет среднего геометрического C_g и среднего арифметического C_a выполнен по пробам, отобраным в ноябре 2019 г. (р. Ганьцзян, 3 створа на р. Цзиньцзян, р. Юаньшуй, грунтовые воды в долинах рр. Цзиньцзян и Юаньшуй).

Note: calculation of average geometrical C_g and average arithmetic C_a is executed on the tests selected in November, 2019 (the Ganjiang river, 3 cross-sections on the Jinjiang river, the Yuanshui river, ground waters in valleys of the Jinjiang and Yuanshui river).

Сопоставление измеренных значений C_x ($C_{x(ms)}$) и расчетных C_e показало, что существенное приближение к стационарному решению вида (15) происходит в пределах 2,5 км (табл. 1, 3). Влияние водного стока, как показал анализ гидрологической ситуации [15, 17], прежде всего, связан с воздействием на режим твердого стока и русловых деформаций (размыв донных отложений и берегов – аккумуляция наносов). Кроме того, удельная скорость изменения концентраций Ca (в основном) и Zn (в меньшей степени) в определенной степени обратно пропорциональна модулю вод-

ного стока ($k_M < 0$). Для меди такая зависимость ($k_M = 0$) не отмечена (табл. 3).

Следует отметить, что наименьшая погрешность расчета концентраций Ca, Cu, Zn в водах рр. Бан Тхи и Дай была при использовании в качестве равновесного содержания C_p среднегеометрических значений, что вполне закономерно – концентрации многих веществ в речных и подземных водах достаточно часто могут рассматриваться как логнормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием, аппроксимируемым средним геометрическим [15].

Таблица 3. Параметры математической модели трансформации содержаний Ca, Cu и Zn в реках Бан Тхи (пункт M1601) и Дай (пункт M1608), водотоки в бассейне р. Хонг, Вьетнам

Table 3. Parameters of mathematical model of transformation of Ca, Cu and Zn contents in the Ban Thi (M1601) and Dai (M1608) rivers, water-currents in the Hong river basin, Vietnam

Показатель (формула) Indicator (formula)	Единицы измерения Units	Ca		Cu		Zn	
		M1601	M1608	M1601	M1608	M1601	M1608
C_b	мг/дм ³ /mg/dm ³	83,2	48,8	0,32	0,63	70,61	3,63
C_w	то же/the same	67,2	62,5	0,39	0,36	1,28	7,52
C_p	–/–	75,9	30,4	0,72	1,15	57,92	7,51
$C_{x(ms)}$	–/–	76,6	49,1	0,43	0,46	48,11	2,34
$C_{x(cl)}$ (12)	–/–	76,5	49,1	0,43	0,46	48,14	2,34
C_e (15)	–/–	76,5	49,1	0,46	0,44	48,14	2,34
$C_e(C)$ (15)	%	<0,1	<0,1	22,8	36,1	<0,1	0,1
$C_e(S)$ (15)	%	>99,9	>99,9	77,2	63,9	>99,9	99,9
$\delta(9)$	%	0,130086	<0,00001	<0,00001	0,001077	0,050501	0,000015
S	мг/кг/mg/kg	255,0	228,5	0,12	0,10	0,27	0,10
S_m (14)	то же/the same	42,9	40,6	0,96	0,97	1405,57	1447,51
S_{m0}	–/–	900,1	900,1	0,44	0,44	269,49	269,49
k_z (13)	с ⁻¹ /s ⁻¹	273,041749	3,014386	0,000065	0,000067	5,459482	1,380018
k_{pM}	с ⁻¹ /s ⁻¹	275,137282	4,870474	0,000009	0,000009	4,537368	0,430267
k_p	м ³ /км ² /m ³ /km ²	0,000058	0,000058	0,000009	0,000009	0,000576	0,000576
k_M	–	-2,932348	-2,932348	0,000000	0,000000	-1,712341	-1,712341
k_s	кг/(с·мг)/kg/(s·mg)	0,000353	0,000353	0,000190	0,000190	0,003530	0,003530
$k_z \cdot k_c$	дм ³ /кг/dm ³ /kg	0,009879	0,009879	0,000066	0,000066	0,000656	0,000656
k_{pH}	–	-1,499992	-1,499992	0,384148	0,384148	0,813840	0,813840

Примечание: индекс (ms) соответствует измеренным значениям, а индекс (cl) – вычисленным.

Note: index (ms) corresponds to the measured values, and index (cl) – to the calculated values.

На втором этапе исследования по данным о составе стоков и вод р. Цзиньцзян (C_b – по результатам опробования в пункте р98, $C_{x,ms}$ – в пункте р102) рассмотрено уравнение (12) с двухступенчатым поступлением стоков по выпускам р101 и р100, подбором значений k_z и C_e и последующим сопоставлением C_e со средними геометрическими и средними арифметическими значениями (табл. 2). Для рассмотренных 66 веществ установлено, что наилучшим приближением для C_e является среднее геометрическое C_g :

$$C_e = (0,735 \pm 0,043) C_g; \quad (17)$$

квадрат корреляционного отношения $R^2 = 0,82$.

С учетом этого методика применения уравнений (12), (16) для оценки допустимого воздействия на водные объекты предусматривает: 1) проведение гидрохимических и гидрометрических наблюдений на репрезентативных реках (участках рек); 2) оценку средних геометрических содержаний нормируемых веществ C_g по данным наблюдений и расчету C_e по зависимости (17); 3) оценку кратности разбавления по уравнениям (2)–(7) и подбору значений k_z в уравнении (12); 4) построение по полученным значениям C_g и k_z (которые соотносятся с геометрическим центром

водосбора рассматриваемой реки) карт однородных районов для малых рек и карт изолиний для средних (под малыми в первом приближении понимаются реки с площадью водосбора до 2000 км², под средними – с площадью 2000–50000 км² [42]); при использовании карт однородных районов проводится проверка на однородность с последующим объединением выборок; 5) в случае нормирования сбросов загрязняющих веществ на гидрохимически изученной реке – использование C_e (C_g) и k_z по данным наблюдений, для неизученной реки (например, при проектировании очистных сооружений) – по картам однородных районов или изолиний значений C_g и k_z , а фоновая концентрация принимается как $C_b = C_e$; 6) оценку допустимой концентрации загрязняющего вещества в сточных водах $C_{w,lim}$ по уравнению (16).

Заключение

Разработана математическая модель трансформации загрязняющих веществ в водных объектах. Ее апробация на примере рек Бан Тхи и Дай в Северном Вьетнаме показала, что химический состав вод изученных рек определяется более чем на 60 % взаимодействиями речных вод с донными отложениями в

результате осаждения малорастворимых соединений (карбонаты, фосфаты и гуматы ряда металлов [4, 20, 21, 40, 43, 44]) и соосаждения на твердых частицах микроэлементов (табл. 1, 3). В результате этих взаимодействий уровень содержания в речных водах (в пунктах М1602–М1601 и М1609–М1608) веществ, поступающих в водные объекты в результате добычи свинцово-цинковых руд, существенно снижается в пределах 2,0–2,5 км. На других изученных реках провинции Баккан участки с заметно повышенными концентрациями обычно не превышают 4,5–5,0 км, хотя определенное влияние прослеживается до 11,0–12,0 км [15–17].

Влияние водного стока проявляется, прежде всего, в изменении твердого стока, в меньшей степени – в регулировании внутриводных процессов, для которых требуется более продолжительное время установления равновесия в растворе. С учетом этого можно предположить, что при восстановлении как поверхностных, так и подземных водных объектов (неглубокого залегания) можно добиться определенного улучшения качества вод за счет последовательного изъятия загрязненных грунтов и внесения грунтов с повышенной сорбционной способностью.

На основе предложенной модели (10)–(15) разработана ее упрощенная версия (12), (17) и методика нормирования сбросов загрязняющих веществ применительно к случаям наличия и отсутствия данных

наблюдений за химическим составом речных вод. Влияние взаимодействий с донными отложениями в этом случае учитывается косвенно, через структуру модели и значения ее параметров. Кроме того, особенностью методики является отсутствие необходимости доказательства природного или антропогенного генезиса веществ в случае $C_b > \text{ПДК}$. Апробация упрощенной модели проведена по данным о химическом составе стоков и воды р. Цзиньцзян (провинция Цзянси в КНР) – элемента гидрографической системы р. Цзиньцзян – р. Ганьцзян – озеро Поянху – р. Янцзы.

Необходимо отметить, что общей чертой гидрохимических условий изученных рек Бан Тхи, Дай (Вьетнам), Цзиньцзян (Китай) является достаточно высокая их способность к самоочищению. Возможно, эта способность связана с особенностями термического режима, определяющими высокую скорость биохимических процессов и более низкую растворимость ряда соединений. Данное предположение в целом совпадает с выводами [45, 46], полученными при сопоставлении способности поверхностных вод к самоочищению на севере и юге КНР, а именно – с выводом о более высоком уровне самоочищения поверхностных вод на юге КНР.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод / под ред. А.В. Караушева. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 285 с.
2. Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием / под ред. А.М. Черняева. – Екатеринбург: Изд-во «Аква-пресс», 2001. – 520 с.
3. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
4. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. В 5 т. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
5. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика. – М.: КДУ, 2010. – 500 с.
6. Benedini M., Tsakiris G. Water quality modelling for rivers and streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
7. РД 52.24.622-2017. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод. Дата введения 14.06.2017 г. – М.; Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2017. – 96 с.
8. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. – М.: МПР России, 2020. – 26 с.
9. GB3838-2002. State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water. – Beijing, China Environmental Science Press, 2002. – 12 p.
10. Chinese Academy of Environmental Planning // National Technical Manual of Water Environmental Capacity Calculation. – Beijing, Chinese Academy of Environmental Planning, 2003. – P. 42–69.
11. SL 348-2006. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of practice for computation on allowable permitted assimilative capacity of water bodies. China: Water Conservancy and Hydropower Press, 2006. – 43 p.
12. Реймерс Н.Ф. Природопользование. – М.: Мысль, 1990. – 637 с.
13. Water quality assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd ed. / Ed. by D. Chapman. – London: Chapman & Hall, 1996. – 651 p.
14. Guide to hydrological practices. V. I. Hydrology – from measurement to hydrological information. 6th ed. – Geneva: World Meteorological Organization, 2008. – 296 p.
15. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
16. Нгуен Ван Луен. Эколого-геохимическое состояние подземных и речных вод, донных отложений водотоков в северной части Вьетнама (на примере уезда Чодонь, провинция Баккан): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
17. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G. Assessing the influence of the mining operations on the state of streams in the northern part of the Red River Basin (Viet Nam) // Geography and natural resources. – 2018. – V. 39. – № 2. – P. 182–188. DOI: 10.1134/S1875372818020129.
18. Минералого-геохимические особенности донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау (Северный Вьетнам) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Е.В. Перегудина, Нгуен Ван Луен, М.В. Шалдыбин, А.В. Канаки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 102–113.
19. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
20. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
21. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
22. Poyang Lake basin water environment management project. Consolidated Environmental Assessment Report. SFG2444 V2. 2016.8. – Beijing: Consignor Jiangxi Province Office of Urban

- Construction & Foreign Capital Utilization Consignee: CERI eco Technology Co., Ltd., 2006. – 23 p. DOI: 10.1002/joc.1307.
23. Shankman N D., Keim B. D., Song Jie. Flood frequency in China's Poyang lake region: trends and teleconnections // *International journal of climatology*. – 2006. – V. 26. – P. 1255–1266.
24. Солдатова Е.А. формирование химического состава подземных вод района озера Поянху (Китай): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 22 с.
25. Li Y., Zhang Qi Historical and predicted variations of baseflow in China's Poyang Lake catchment // *River Resources and Applications*. – 2018. – P. 1–12. DOI: 10.1002/rra.3379.
26. Assessment of water storage response to surface hydrological connectivity in a large floodplain system (Poyang Lake, China) using hydrodynamic and geostatistical analysis / Y. Li, Qi Zhang, J. Yao, Z. Tan, X. Liu // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. – 2019. – № 33. – P. 2071–2088. DOI: 10.1007/s00477-019-01740-9.
27. Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China. Jiangxi water resources Bulletin. 10.2020. URL: <http://slt.jiangxi.gov.cn/col/col27420/index.html> (поступила 15.03.2021).
28. Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China. Jiangxi Bulletin of soil and water conservation. 03.12.2020. URL: http://slt.jiangxi.gov.cn/art/2020/12/3/art_27420_2953883.html (поступила 15.03.2021).
29. Influences of the timing of extreme precipitation on floods in Poyang Lake, China / X. Li, Qi Hu, R. Wang, D. Zhang, Qi Zhang // *Hydrology Research*. – 2021. – P. 1–17. DOI: 10.2166/nh.2021.078.
30. Гришанин К.В. Устойчивость речных русел и кинематические волны // *Труды Государственного гидрологического института*. Вып. 190. Исследования морфологии и гидравлики речных русел, пойм и водоёмов для нужд строительного проектирования. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – С. 37–56.
31. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
32. ГОСТ 17.1.2.04–77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1977. – 17 с.
33. 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.
34. Size fractionation of trace elements in the surface water and groundwater of the Ganjiang River and Xiushui River basins, China / E.A. Soldatova, N.V. Guseva, Z. Sun, I.S. Mazurova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2015. – V. 27 (1). – 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012037.
35. Evolution of the groundwater chemical composition in the Poyang Lake catchment, China / S. Shvartsev, Z. Shen, Z. Sun, G. Wang, E. Soldatova, N. Guseva // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – V. 75 (18). – P. 1239. DOI: 10.1007/s12665-016-6065-8.
36. Geochemical conditions of natural wetland and paddy fields in the Poyang Lake area, China / E. Soldatova, Y. Dong, J. Li, I. Ivanova, A. Toropov, I. Gromyak, D. Dogadkin, Z. Sun // *Applied Sciences*. – 2021. – № 3 (1). DOI: 10.1007/s42452-020-04060-8.
37. Nitrogen transformation and pathways in the shallow groundwater–soil system within agricultural landscapes / E. Soldatova, Y. Dong, J. Li, Y. Liu, J. Zan, P. Boeckx, Z. Sun // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – № 43 (1). – P. 441–459. DOI: 10.1007/s10653-020-00733-w.
38. Трофимов В.В., Манихин В.И. Имитационная модель, описывающая миграцию химических веществ в системе «вода – донные отложения» и пути ее численного решения // *Гидрохимические материалы*. Т. XXII. Основные направления работ в области гидрохимии. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – С. 65–72.
39. Banwart S.A. Aqueous speciation at the interface between geological solids and groundwater // *Modelling in Aquatic Chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 245–288.
40. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation* / Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
41. Фунг Тхай Зыонг. Эколого-геохимическое состояние дельты реки Меконг (республика Вьетнам) по результатам изучения донных отложений: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2015. – 25 с.
42. ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
43. Ephraim J.H., Allard B. Metal ion binding by humic substances // *Modelling in Aquatic Chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
44. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates / E.G. Hafsteinsdottir, D. Camenzuli, A.L. Rocavert, J. Walworth, D.B. Gore // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 59. – P. 47–62. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.014.
45. Zhang Y., Liu P. Comprehensive manual of water environmental capacity. – Beijing: Tsinghua University Press., 1991. – 1222 p.
46. Calculation theory and application of water environment capacity / Y. Pang, G. Lu et al. – Beijing: Science Press, 2010. – 220 p.

Поступила 19.04.2021 г.

Информация об авторах

Савичев Олег Геннадьевич, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чжоу Дань, аспирант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314:556.535.8

METHOD FOR ASSESSING ALLOWABLE CONCENTRATIONS OF POLLUTING SUBSTANCES WITH CONDITIONS OF RIVER SEDIMENTS

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Zhou Dan¹,
929177582@qq.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is determined by the need to take into account the interactions of river waters with bottom sediments when normalizing anthropogenic impacts on water bodies

The aim of the research is to develop the model of transformation of polluting substances in water objects with the account of waste dilution and interaction of river waters and sediments and development of sewage normalization technique.

Methods: mathematical modelling of hydrochemical processes.

Results and conclusions. The mathematical model of transformation of polluting substances in water objects with the account of sewage dilution interaction of river waters and river sediments is developed. Its approbation by the example of the small rivers in northern part of Vietnam (the Ban Thi and Dai rivers in the Hong river basin) has shown that the chemical composition of waters of researched rivers is determined more than on 60 % by interactions of river waters with sediments as a result of sedimentation of poorly soluble substances and sorption of some trace elements. It results in appreciable decrease of concentration of many substances on sites up to 4,5–5,0 kms. Influence of water flow is shown first of all, in changes of a bed-material discharge, to a lesser degree it is a regulation of intrawater processes for which more long time of balance establishment in a solution is required. On the basis of the offered model its simplified version and a technique of normalization of sewage for variants of presence and absence of observation data is developed. Thus, the influence of interactions with river sediments is taken into account indirectly through structure of model and value of its parameters. Approbation of the simplified model is executed on the example of the Jinjiang river in the Poyang lake basin (China).

Key words:

Mathematical model, transformation of polluting substances, dilution, river waters, river sediments, the Hong river basin, the Poyang lake basin.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 18-55-80015.

REFERENCES

1. Metodicheskie osnovy otsenki i reglamentirovaniya antropogenogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod [Methodological foundations for assessing and regulating anthropogenic impact on the quality of surface waters]. Ed. by A.V. Karaushev. Leninograd, Gidrometeoizdatpubl., 1987. 285 p.
2. Voda Rossii. Matematicheskoe modelirovanie v upravlenii vodopolzovaniem [Water of Russia. Mathematical modeling in water management]. Ed. by A.M. Chernyaev. Yekaterinburg, Akva-press Publ., 2001. 520 p.
3. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
4. Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda [Geological evolution and self-organization of the water-rock system]. In 5 vol. Vol. 1. *Sistema voda-poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [The water-rock system in the earth's crust: interaction, kinetics, equilibrium, modeling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2005. 244 p.
5. Lekhov A.V. *Fiziko-khimicheskaya gidrogeodinamika* [Physico-chemical hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2010. 500 p.
6. Benedini M., Tsakiris G. *Water quality modelling for rivers and streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
7. RD 52.24.622-2017. *Poryadok provedeniya rascheta usloynykh fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov dlya ustanovleniya normativov sbrosov stochnykh vod* [Procedure for calculating the background concentrations of chemicals in the water of water bodies in order to establish standards for wastewater discharges]. Moscow, Rostov-on-Don, Rosgidromet, FGBU «SCHI» Publ., 2017. 96 p.
8. *Metodika razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnye ob'yekty dlya vodopolzovateley* [Methodology for developing standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users]. Moscow, Ministry of Nature Resources of Russia Publ., 2020. 26 p.
9. GB3838-2002. *State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water*. Beijing, China Environmental Science Press., 2002. 12 p.
10. *Chinese Academy of Environmental Planning. National technical manual of water environmental capacity calculation*. Beijing, Chinese Academy of Environmental Planning, 2003. pp. 42–69.
11. GB3838-2002. *State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water*. Beijing, China Environmental Science Press, 2002. 43 p.
12. Reymers N.F. *Prirodopolzovanie* [Nature management]. Moscow, Mysl Publ., 1990. 637 p.
13. *Water quality assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. 2nd ed. Ed. by D. Chapman. London, Chapman & Hall, 1996. 651 p.
14. *Guide to hydrological practices. Vol. I. Hydrology – from measurement to hydrological information*. 6th ed. Geneva, World Meteorological Organization, 2008. 296 p.
15. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G., Domarenko V.A., Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
16. Nguen Van Luen. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie podzemnykh i rechnykh vod, donnykh otlozheniy vodotokov v severnoy chasti Vyetnama (na primere uezda Chodon, provintsia Bakkan)* Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical condition of ground and river waters, river sediments of the minor rivers in the Northern part of Vietnam (by the example of Chodon district, Baccan province). Cand. Diss. Tomsk, 2017. 22 p.

17. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G. Assessing the influence of the mining operations on the state of streams in the northern part of the Red River Basin (Viet Nam). *Geography and natural resources*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 182–188. DOI: 10.1134/S1875372818020129.
18. Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregodina E.V., Nguyen Van Luyen, Shal'dybin M.V., Kanaki A.V. Mineral-geochemical features of the minor river sediments in the interfluvial area of the Lo and Kau rivers (Northern Vietnam). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 102–113. In Rus.
19. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
20. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
21. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
22. *Poyang Lake Basin Water Environment Management Project. Consolidated Environmental Assessment Report*. SFG2444 V2. 2016.8. Beijing, Consignor Jiangxi Province Office of Urban Construction & Foreign Capital Utilization Consignee: CERI eco Technology Co., Ltd., 2006. 23 p. DOI: 10.1002/joc.1307.
23. Shankman N.D., Keim B.D., Song Jie. Flood frequency in china's Poyang lake region: trends and teleconnections. *International journal of climatology*, 2006, vol. 26, pp. 1255–1266.
24. Soldatova E.A. *Formirovanie khimicheskogo sostava podzemnykh vod rayona ozera Poyankhu (Kitay)*. Dis. Kand. nauk [Formation of the chemical composition of groundwater in the Poyang Lake area (China). Cand. Diss.]. Tomsk, 2016. 22 p.
25. Li Y., Zhang Qi Historical and predicted variations of baseflow in China's Poyang Lake catchment. *River Resources and Applications*, 2018, pp. 1–12. DOI: 10.1002/rra.3379.
26. Li Y., Zhang Qi, Yao J., Tan Z., Liu X. Assessment of water storage response to surface hydrological connectivity in a large floodplain system (Poyang Lake, China) using hydrodynamic and geostatistical analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019, no. 33, pp. 2071–2088. DOI: 10.1007/s00477-019-01740-9.
27. *Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China*. Jiangxi water resources Bulletin. 10.2020. Available at: <http://slt.jiangxi.gov.cn/col/col27420/index.html> (accessed 15 March 2021).
28. *Official site of the Department of Water Resources of Jiangxi Province, People's Republic of China*. Jiangxi Bulletin of soil and water conservation. 03.12.2020 Available at: http://slt.jiangxi.gov.cn/art/2020/12/3/art_27420_2953883.html (postupila 15 March 2021).
29. Li X., Hu Qi, Wang R., Zhang D., Zhang Qi Influences of the timing of extreme precipitation on floods in Poyang Lake, China. *Hydrology Research*, 2021, pp. 1–17. DOI: 10.2166/nh.2021.078.
30. Grishanin K.V. *Ustoychivost rechnykh rusel i kineticheskie volny* [Stability of river channels and kinematic waves]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*. Vyp. 190. *Issledovanie morfologii i gidravliki rechnykh rusel, poim i vodoemov dlya nu-zhd stroitel'nogo proektirovaniya* [Materials of the State hydrological institute. Iss. 190. Researches of morphology and hydraulics of river channel, flood plain and reservoirs for needs of building designing]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. pp. 37–56.
31. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
32. GOST 17.1.2.04–77. *Pokazateli sostoyaniya i pravila taksatsii ry-bokhozyaystvennykh vodnykh ob'yektov* [Indicators of the state and rules of taxation of fishery water bodies]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1977. 17 p.
33. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologia*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
34. Soldatova E.A., Guseva N.V., Sun Z., Mazurova I.S. Size fractionation of trace elements in the surface water and groundwater of the Ganjiang River and Xiushui River basins, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27 (1), 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012037.
35. Shvartsev S., Shen Z., Sun Z., Wang G., Soldatova E., Guseva N. Evolution of the groundwater chemical composition in the Poyang Lake catchment, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75 (18), p. 1239. DOI: 10.1007/s12665-016-6065-8.
36. Soldatova E., Dong Y., Li J., Ivanova I., Toropov A., Gromyak I., Dogadkin D., Sun Z. Geochemical conditions of natural wetland and paddy fields in the Poyang Lake area, China. *Applied Sciences*, 2021, no. 3 (1). DOI: 10.1007/s42452-020-04060-8.
37. Soldatova E., Dong Y., Li J., Liu Y., Zan J., Boeckx P., Sun Z. Nitrogen transformation and pathways in the shallow groundwater-soil system within agricultural landscapes. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, no. 43 (1), pp. 441–459. DOI: 10.1007/s10653-020-00733-w.
38. Trofimov V.V., Manikhin V.I. Imitatsionnaya model, opisyyvayushchaya migratsiyu khimicheskikh veshchestv v sisteme «voda – donnyye otlozheniya» i puti ee chislennogo resheniya [A simulation model describing the migration of chemicals in the «water – bottom sediments» system and the ways of its numerical solution]. *Gidrokhimicheskie materialy. T. XCII. Osnovnye napravleniya rabot v oblasti gidrokhimii* [Hydrochemical materials. Vol. XCII. The main directions of work in the field of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1984. pp. 65–72.
39. Banwart S.A. *Aqueous speciation at the interface between geological solids and groundwater. Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 245–288.
40. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006. pp. 97–110.
41. Phung Thai Duong. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie del'ty reki Mekong (respublika Vyetnam) po rezul'tatam izucheniya donnykh otlozheniy*. Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical state of the Mekong River Delta (Republic of Vietnam) based on the results of studying bottom sediments. Cand. Diss.]. Tomsk, 2015. 25 p.
42. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Hydrology of land. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
43. Ephraim J.H., Allard B. Metal ion binding by humic substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
44. Hafsteinsdottir E.G., Camenzuli D., Rocavert A.L., Walworth J., Gore D.B. Chemical immobilization of metals and metalloids by phosphates. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 59, pp. 47–62. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.014.
45. Zhang Y., Liu P. *Comprehensive manual of water environmental capacity*. Beijing, Tsinghua University Press, 1991. 1222 p.
46. Pang Y., Lu G. *Calculation theory and application of water environment capacity*. Beijing, Science Press, 2010. 220 p.

Received: 19 April 2021.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Zhou Dan, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.