

УДК 556.5:504.45

## ИСТОЧНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ РЕКИ КАМЫ В ПРЕДЕЛАХ ПЕРМСКОГО КРАЯ

© 2011 г. С.А. Мирошниченко<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

<sup>2</sup> Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Пермь

**Ключевые слова:** содержание в поверхностных водах железа, модуль химического стока железа, техногенное загрязнение.



В работе проанализированы основные факторы формирования железа общего в водных объектах Пермского края. Произведен расчет модуля химического стока железа для рек бассейна Камского водохранилища. Рассмотрены некоторые практические и теоретические вопросы применения критериев оценки техногенных нагрузок на водные объекты.

### Введение

Водоток, протекая через различные естественные ландшафтные территории и контактируя с формирующимися на водосборе водами, неизбежно приобретает специфический гидрохимический состав. Химический состав поверхностных вод водотока есть интегральная характеристика природных и техногенных процессов, протекающих на водосборной территории. Не является исключением и содержание в природных водах металлов, прежде всего такого важного элемента в водной экосистеме как железо. В дальнейшем для обозначения суммарной концентрации всех растворенных форм железа  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  в воде будем условно использовать термин «железо».

В естественных условиях металлы в поверхностные воды поступают за счет выветривания, выщелачивания, растворения минералов и пород, слагающих водосборный бассейн. Все это приводит к значительной вариабельности изменения содержания металлов по длине водотока и до-

Водное хозяйство России № 6, 2011

# Водное хозяйство России

статочно часто возникает ситуация, когда естественное фоновое содержание металлов оказывается выше, чем их соответствующая предельно-допустимая концентрация (ПДК<sub>рх</sub>). Это приводит к тому, что предприятие-водопользователь должно проводить очистку сточных вод до уровня ПДК<sub>рх</sub>, хотя забирает для своих нужд воду с фоновыми концентрациями, значительно превышающими значение данного норматива. Эта проблема особенно актуальна для предприятий Соликамско-Березниковского промузла, расположенного ниже бассейна Верхней Камы.

Обогащение поверхностных вод металлами определяется не только их общим содержанием в породах и почвах, но и миграционной способностью, т. е. способностью к перемещению, зависящей от физико-химических констант данного иона и условий среды, в результате которых резко возрастает активность данных процессов.

Весьма существенное влияние на форму нахождения металла в поверхностных водах оказывают вещества органического происхождения, которые активно поступают с торфяных болот. Торфяники представляют собой совмещенный геохимический барьер — механический, кислородный, биогенный и сорбционный, на котором накапливаются многие химические элементы [1]. Пресные болотные воды, не пересыщенные минеральными соединениями, обладают большой растворяющей способностью. Крупные болотные массивы способны аккумулировать и перераспределять в течение года довольно значительное количество химических элементов.

Важную роль в поведении металлов в природных водах играет комплексобразующая способность гумуса болотных вод, которая характеризует способность поверхностных вод связывать ионы металлов в комплексные соединения хелатного типа. Обычно в гумусовых веществах, поступающих с водосбора, выделяют в качестве активных реакционных центров условно карбоксильные и условно фенольные группы. Карбоксильные группы, обладающие сравнительно сильными кислотными свойствами, являются слабыми комплексообразователями, фенольные же группы, наоборот, весьма сильно связывают металлы, образуя хелаты. При этом фульвокислоты из-за небольшой молекулярной массы образуют с ионами металлов стойкие коллоидные растворы, коллоиды же гуминовых кислот склонны к коагуляции и осаждению.

Целью работы являлось построение карты распределения модуля химического стока железа для подтверждения природных факторов формирования металла на заболоченной водосборной территории. Обоснование необходимости установления для железа на крупных заболоченных территориях регионального норматива качества воды, на примере бассейна Верхней Камы. Выявления основных техногенных ис-

точников поступления железа в поверхностные воды в пределах Пермского края.

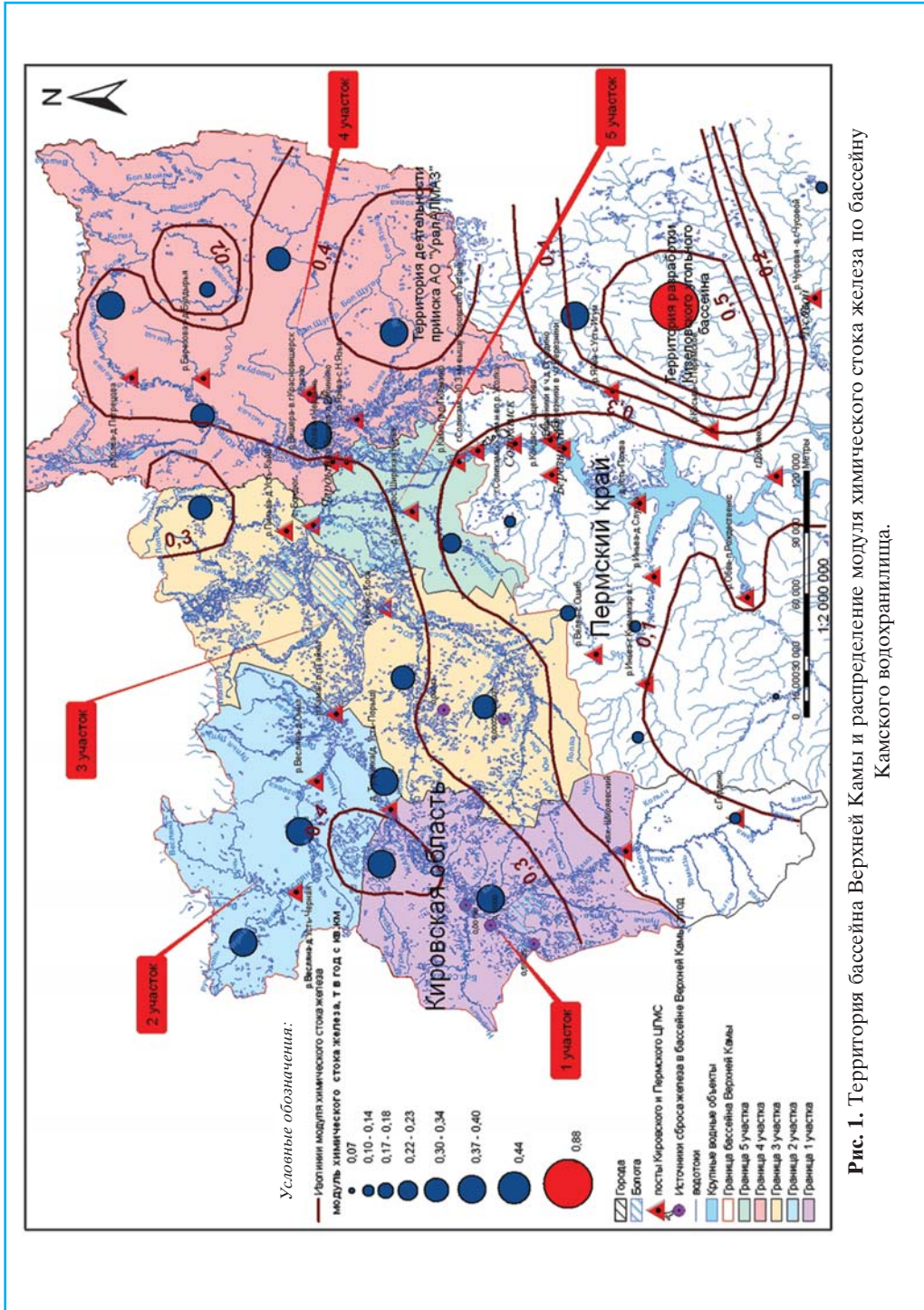
### **Физико-географическая характеристика рассматриваемой территории**

При рассмотрении изменения содержания железа по длине р. Камы по данным регулярных наблюдений, проводимых Кировским и Пермским ЦГМС, за длительный период наблюдений 1975—2000 гг. выделяется бассейн Верхней Камы (площадью 76700 км<sup>2</sup>), расположенный в северной части Кировской области и Пермского края (рис. 1). В бассейн Верхней Камы попадает левобережная часть — р. Кама, ограниченная постами р. Кама — д. Усть-Порыш и р. Кама — рп Тюлькино, и правобережная — бассейн р. Вишеры.

По характеру течения на рассматриваемом участке р. Кама до с. Бондюг имеет однообразный характер. Левый берег представляет собою низменную широкую равнину в значительной степени заболоченную; правый берег обрывистый с выходящими коренными породами. Русло реки отличается большой извилистостью и неустойчивостью. Течение Камы на этом участке тихое и спокойное, глубины незначительные в среднем 1,5—2,0 м. В отличие от Камы, р. Вишера в верховьях имеет горный характер и узкую с крутыми скалистыми склонами долину. В среднем течении Вишеры наблюдается низкий заболоченный правый берег, а уже в нижнем течении оба берега представляют собой полностью равнинную заболоченную местность.

Одинаковые условия формирования химического состава воды на левобережной части бассейна Верхней Камы определяют узкий диапазон показателей солевого состава. Резких колебаний в содержании гидрокарбонатов, хлоридов, сульфатов, кальция и магния не наблюдается. Из анионов в воде преобладают гидрокарбонат-ионы в пределах от 17,0 до 102,0 мг/дм<sup>3</sup>; из катионов — ионы кальция от 5,6 до 24,8 мг/дм<sup>3</sup>. Количество хлоридов изменяется от 1,0 до 10,6 мг/дм<sup>3</sup>. Для естественного состояния верхнего течения р. Камы характерно повышенное содержание в воде органических соединений гумусового происхождения.

Благодаря широкому распространению болот на водосборе содержание в воде БПК<sub>5</sub> достигает — 24,3 мгО/л, ХПК — 43,5 мгО/л, фенолов — 0,02 мг/л, нефтепродуктов — 0,4 мг/л, иона-аммония — 0,6 мг/л. По солевому составу вода характеризуется как маломинерализованная, гидрокарбонатного класса, кальциевой группы. Именно эта часть Камы, как впервые отметил еще в 1928 г. А.А. Варов [2], является источником поступления железа, т. к. ниже по течению притоки р. Камы понижают его концентрацию (рис. 2). Наличие болот на водосборе обу-



**Рис. 1.** Территория бассейна Верхней Камы и распределение модуля химического стока железа по бассейну Камского водохранилища.

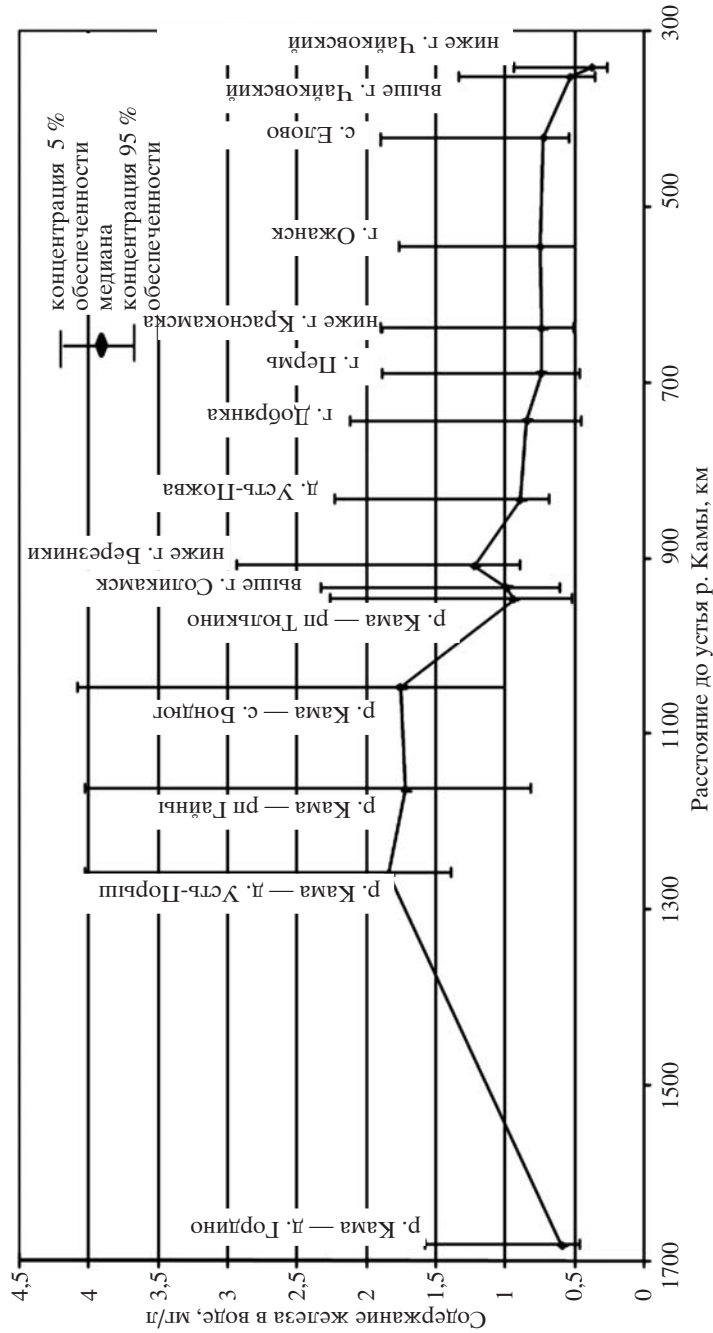


Рис. 2. Диапазон изменения содержания в воде железа по длине р. Камы по данным Пермского, Кировского ЦГМС,  $ПДК_{рх} = 0,1$  мг/л.



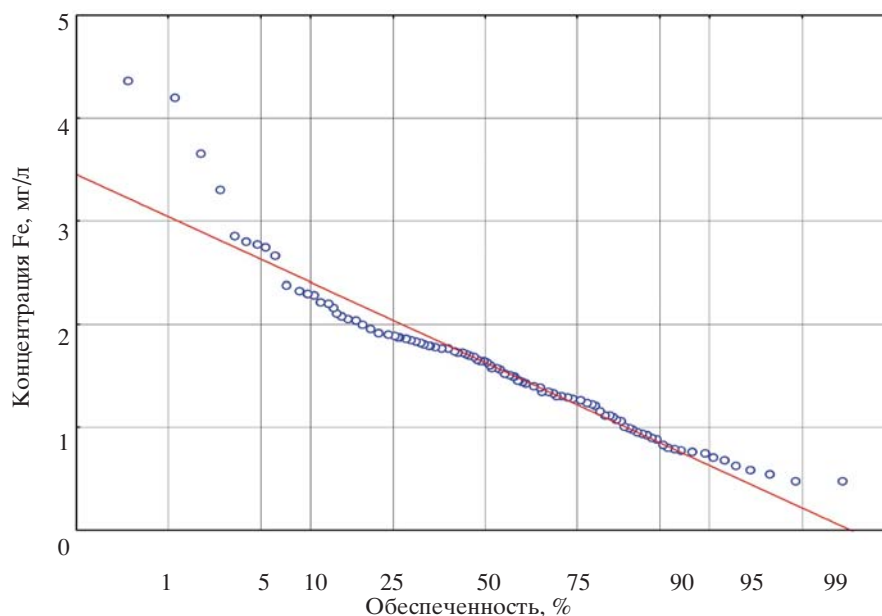
славливает поступление вод со специфическим гидрохимическим составом, которые, характеризуются малой минерализацией, значением рН в пределах 6,0—6,5, повышенным содержанием железа. В кислой среде железо легко мигрирует с поверхностно-склоновыми водами в водотоки в составе органоминеральных комплексных соединений [3—4].

Подобная гидрохимическая характеристика солевого состава характерна и для среднего и нижнего участков р. Вишеры, в воде которой содержание органических веществ из-за меньшего распространения болот значительно ниже.

Высокое содержание железа в р. Каме обусловлено природным фактором — поступлением его в поверхностные воды из болотных массивов, которые могут являться постоянным источником металла и одной из причин стабильно повышенного их содержания. На заболоченных территориях в результате процессов разложения водных, животных и растительных организмов в кислой среде активно образуются хорошо растворимые двухвалентные формы железа. Основной причиной данного процесса является наличие малого содержания свободного кислорода в болотных водах, используемого в процессах окисления. В болотных водах развиваются анаэробные микроорганизмы, происходит постепенное снижение рН и закисление вод. Кислородный дефицит, а, следовательно, и изменение окислительно-восстановительных условий, приводит к увеличению содержания в воде железа. Воды на данном участке Камы, как правило, окрашены в желтый цвет из-за высокого содержания в них органических соединений, в них снижены значения  $\text{pH} = 6,2 \div 7,2$ . Содержание железа в течение года практически всегда имеет высокие концентрации, в среднем, от 1,5 до 2,0 мг/л и колеблется в зависимости от поступления в русло реки вод с заболоченных водосборов (рис. 3).

Результаты сравнительного анализа показывают, что из 5 расчетных водохозяйственных участков по бассейну Верхней Камы наибольшей заболоченностью (14 %) характеризуется 3 участок (р. Кама — рп Гайны — р. Кама — с. Бондюг) с объемом выноса железа равного 6,2 тыс. т. В то же время рассматриваемая территория практически не заселена, городская застройка отсутствует, сельская — менее 1 %. Масса сброса железа со сточными водами по сравнению с его объемом выноса по р. Каме незначительна. Основные характеристики объемов выноса железа по участкам бассейна Верхней Камы представлены в табл. 1.

Пространственное распределение модуля химического стока железа, количество железа, выносимого стоком с единицы площади водосбо-



**Рис. 3.** Функции распределения содержания железа в воде  
(гидрохимический пост Пермского ЦГМС, р. Кама — рп Гайны  
за 1975—2000 гг.).

ра в единицу времени (в дальнейшем в статье будем использовать термин — модуль стока железа), является наиболее эффективным способом отражения зависимости его изменения от природных условий территории. Для 24 речных гидрологических постов, расположенных по территории бассейна Камского водохранилища и не подверженных интенсивному техногенному загрязнению, был рассчитан модуль стока железа. Для расчета модуля стока железа были использованы многолетние данные по среднегодовому расходу воды [5] и медианное значение содержания в воде железа по данному посту [6, 7]. Модуль стока железа, рассчитанный для гидрологического поста, был отнесен к центру водосборной площади соответствующего водотока. С использованием геоинформационной системы была построена по территории TIN-модель, из которой получены изолинии, характеризующие распределение модуля стока железа на территории бассейна Камского водохранилища.

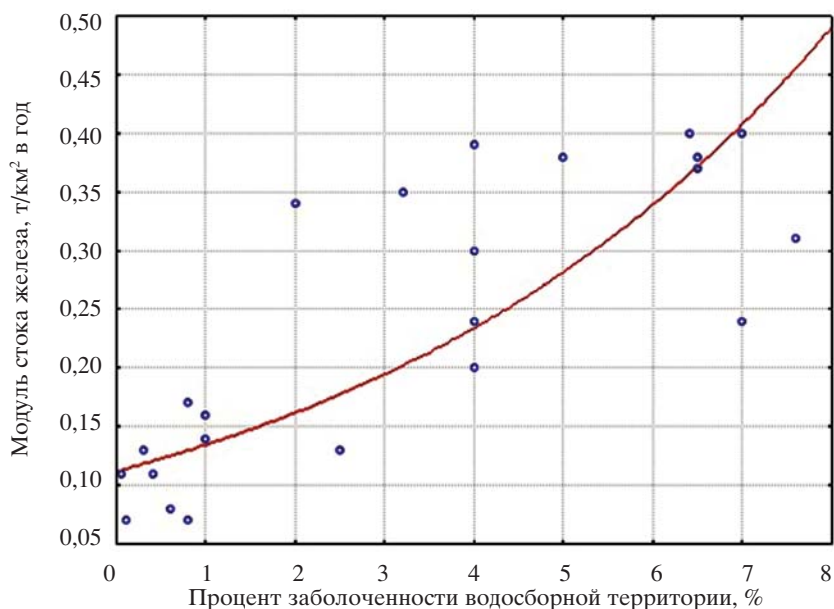
Для левобережных притоков р. Камы отмечается на расстоянии в 100—120 км широтное уменьшение модуля стока железа с севера на юг с 0,4 до 0,1 т/км<sup>2</sup> в год (см. рис. 1). В этом же направлении уменьшается и процент заболоченности водосборной территории водотоков. Для за-

Таблица 1. Основные характеристики объемов выноса железа по участкам бассейна Верхней Камы

Наименование участка (в соответствии с рис. 1)	Расстояние до водосбора, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Содержание железа общего	Среднегодовой расход воды, м <sup>3</sup> /с	Объем выноса железа, тыс. т/год	Модуль стока, т/км <sup>2</sup> в год	Площадь участка по бассейну Верхней Камы, км <sup>2</sup>	Заболоченность участка, %	Залесенность участка, %	Урбанизированность участка, %	Масса сброса железа по форме 2-ТП (водхоз), т/год
р. Кама — исток — гидроствор клх Ширяевский (по в/п Гордино)	1582	5030	0,443	38,1	0,5	0,11	**	0,4	89	1,9	0,02
1 участок Гидроствор клх Ширяевский — р. Кама — граница Кировской обл. (д. Усть-Порыш)	1260	16300	1,435	136	5,7 (6,2)*	0,38	11270	9,0 (6,5)*	95	0,75	0,7
2 участок р. Кама — граница Кировской обл. — р. Кама — рп Гайны	1168	27400	1,58	220	4,7 (10,9)*	0,4	11100	7,0 (6,5)*	98	0,29	—
3 участок р. Кама — рп Гайны — р. Кама — с. Бондюг	1045	46300	1,470	368	6,2 (17,1)*	0,37	18900	14,0 (9,5)*	94	0,737	0,001
4 участок р. Вишера — пос. Рябино (бассейн р. Вишеры)	6	30900	0,785	488	12,1	0,39	30900	4,0	95	0,298	0,267
5 участок р. Кама — с. Бондюг — р. Кама — рп Тюлькино (без бассейна р. Вишеры) — Рябино)	948	81800	0,91	890	25,5	0,31	4600	9,0 (7,6)*	92	1,040	—

Примечания: \* — в целом по водосбору; \*\* — не на территории Верхней Камы; — нет сброса железа по форме № 2-ТП (водхоз).





**Рис. 4.** Зависимость модуля стока железа от процента заболоченности водосборной территории для гидрологических постов, расположенных в районе бассейна Верхней Камы.

болоченных водосборов Верхней Камы (более 3 %) модуль стока железа составил от 0,25 до 0,4 т/км<sup>2</sup> в год, при менее 1 % площади заболоченности модуль стока железа составил 0,1 т/км<sup>2</sup> в год.

Тесная связь модуля стока железа с заболоченностью территории (коэффициент парной корреляции 0,8 с уровнем достоверности 0,05) прослеживается для большинства гидрологических постов, расположенных в районе бассейна Верхней Камы (рис. 4), что является косвенным доказательством причины формирования железа на рассматриваемой территории.

Значительный вынос железа обуславливается не только заболоченностью рассматриваемой территории, но и специфическим характером почв и условиями их выноса. Почти все аллювиальные почвы Верхней Камы содержат повышенное количество подвижного закисного железа Fe<sup>2+</sup>. В пойменных почвах северных рек области содержание подвижного железа достигает более 80 мг на 100 г почвы [8].

Роль антропогенных факторов вследствие минимального хозяйственного освоения территории является крайне незначительной (см.

табл. 1). Общая масса сброса железа со сточными водами от расположенных в бассейне Верхней Камы предприятий составляет не более 1 т. Необходимо отметить, что рассматриваемые процессы формирования повышенного содержания железа в воде протекают при сложившейся за многолетнюю историю водной экосистемы Верхней Камы (с момента прохождения последнего ледникового периода) и не нуждаются в каких-либо вмешательствах человека, несмотря на характеристику вод по существующей классификации как «загрязненную», 3 класс качества, разряд «а».

Состав поверхностных вод, формирующийся на территории бассейна Верхней Камы, оказывает существенное влияние на гидрохимический режим нижележащих участков основной водной артерии Западного Урала — р. Камы. Данное обстоятельство обуславливается тем, что на этой территории формируется значительная часть стока Камы (80—85 %). Вследствие интенсификации седиментационных процессов, обусловленных созданием водохранилищ на р. Каме, содержание в воде железа по сравнению с верхним течением уменьшается, но в то же время остается выше соответствующих ПДК<sub>рх</sub> (см. рис. 2). Отсутствие у контролирующих природоохранных служб четкого представления об естественных факторах формирования железа в р. Каме приводит в большинстве случаев к искаженному пониманию экологической ситуации на водном объекте. В результате для предприятий-водопользователей устанавливается на выпуске сточных вод норматив для железа (0,1 мг/л) на уровне общефедерального ПДК<sub>рх</sub>, превышающий природный фон в несколько раз, который в данной ситуации является экологически необоснованным и с экономической точки зрения требует необоснованных затрат на очистку сточных вод до установленного норматива допустимого сброса (НДС).

При анализе ситуации для достоверности полученных результатов необходимо оценить на рассматриваемой территории масштабы техногенного загрязнения. Под влиянием антропогенных факторов, в отличие от естественных условий формирования, изменение химического состава происходит весьма интенсивно за непродолжительный период времени. Разнообразная хозяйственная деятельность человека может оказывать влияние как в результате непосредственно прямого воздействия (сбросы сточных вод), так и косвенно (регулирование стока, изменение ландшафта прибрежной полосы). По материалам государственного мониторинга в бассейне Верхней Камы роль техногенных факторов в формировании гидрохимического режима железа в Верхней Каме очень мала. Так, по данным Пермского ЦГМС, максимальное содержание железа фиксируется на рп Гайны. В то же время по данным официальной го-

сударственной отчетности по форме № 2-ТП (водхоз) (декларируемый сброс) сброс железа со сточными водами в поверхностные водные объекты бассейна Верхней Камы на данном участке практически отсутствует. В целом, декларируемый сброс железа со сточными водами для бассейна р. Камы в пределах Пермского края, не превышает 270 т/год, что практически в 150 раз меньше годовых выносов железа по створу р. Камы — рп Тюлькино. Сброс железа со сточными водами сосредоточен в крупных промышленных центрах (Пермь—Краснокамск — 63 %, Соликамск—Березники — 30 %). Распределение декларируемого предприятия сброса железа со сточными водами по участкам р. Камы в пределах Пермского края представлено на рис. 5 (2008 г. является наиболее показательным по уровню воздействия на водные объекты).

Существенный вклад в техногенное загрязнение вносят и неучтенные сбросы сточных вод (не представленные в материалах отчетности предприятий по форме № 2-ТП (водхоз)). Особенно это сильно проявляется на территории бывшего Кизеловского угольного бассейна, разработка которого началась еще в 1797 г. (бассейн рек Косьвы и Яйвы, см. рис. 1). Деятельность примерно 40 шахт оказала существенное влияние на гидрогеологические условия бассейна, шахтные воды которых стали основным ис-



точником загрязнения водных объектов металлами. В отличие от левобережной части р. Камы (см. рис. 1) распределение модуля стока железа на противоположном участке не имеет широтной зависимости. Максимальный модуль стока железа приходится на бассейн р. Косьвы и составляет 0,88 т/км<sup>2</sup> в год при заболоченности водосборной территории менее 1 %. Столь значительное увеличение модуля стока для отдельного бассейна связано исключительно с техногенным загрязнением водотока.

Основной причиной накопления железа в шахтных водах, которые образуются при смешении вод различных горизонтов в выработках шахт, является значительная активизация процессов выщелачивания из обогащенных металлами углей и наличие большого количества серы в углях. Дренируемые нейтральные подземные воды, промывая угли и вмещающие породы, обогащаются сернокислыми соединениями и возникающая при этом кислая среда ( $\text{pH} = 2\text{—}3$ ) способствует резкой активизации химического выветривания углей и пород. В результате этого процесса содержание железа  $\text{Fe}^{2+}$  в отдельных шахтных водах достигает 670 мг/л [9]. Шахтные воды, как правило, имеют сульфатный железисто-алюминиевый состав. Наиболее сильно подвержены загрязнению шахтными водами реки Полуденный Кизел, Гремячая. Река Усьва, правый приток р. Чусовой, в бассейн которой также сбрасываются шахтные воды, является централизованным источником питьевого водоснабжения г. Чусового.

Даже и после закрытия шахт проблема загрязнения рек шахтными водами остается актуальной. Это объясняется тем, что шахтные воды поступают из ряда шахт даже после их затопления. Кроме того, шахтные стоки с высоким содержанием железа дренируются из-под породных отвалов и терриконов. Такие большие реки, как Южная и Северная Вильва, Яйва, Косьва практически на всем своем протяжении имеют огромные толщи донных отложений с высоким содержанием в них железа. Донные отложения водных объектов являются активными накопителями металлов. Благодаря сорбционным процессам происходит очищение воды от соединений металлов. Однако в определенных условиях (изменение кислотности среды, наличие разнообразных комплексообразующих веществ) происходит десорбция металлов и их переход в растворенном состоянии в толщу воды, т. е. донные отложения превращаются в источники вторичного загрязнения водных объектов [10].

В настоящее время в связи с ликвидацией ОАО «Кизелуголь» не представляется отчета по форме № 2-ТП (водхоз) об объемах сброса шахтных вод в контролирующие органы. Однако следует отметить, что за последний отчетный год (1996 г.) на предприятия ОАО «Кизелуголь» приходилось до 80 % от общего сброса по территории Пермской области железа, меди и цинка. Для устранения техногенного загрязнения вод-

ных объектов подверженных загрязнению шахтными водами необходимы комплексные дорогостоящие мероприятия, рассчитанные на долгосрочную перспективу их реализации. Ликвидация предприятия только усложнило острую экологическую проблему территории.

К неучтенным сбросам можно отнести и техногенное влияние, оказываемое ЗАО «УралАЛМАЗ» на малые водные объекты (реки Большой Шугор, Большой Колчим и др.) в результате разработки месторождений алмазов и золота дражным способом в бассейне р. Вишеры (см. рис. 1). Процесс промывки и дезинтеграции породы дражным способом приводит к увеличению содержания в поверхностных водах взвешенных веществ и ряда металлов. Данное загрязнение носит локальный характер в масштабах горного отвода. Сброс в водоток-приемник осуществляется через сеть прудов накопителей, в которых большая часть металлов осаждается.

### **Заключение**

Как показано в работе, отмечающееся повышенное содержание железа в бассейне Верхней Камы является его естественным природным фоновым содержанием, сформировавшимся задолго до осуществления на данной территории хозяйственной деятельности человека, оно обусловлено природным фактором — поступлением из болотных массивов, которые могут являться постоянным источником металла и одной из причин стабильного повышенного его содержания.

Эту особенность гидрохимического режима реки необходимо учитывать при регламентации техногенных нагрузок на водные объекты.

Существующая в настоящее время система нормирования техногенных нагрузок на водные объекты имеет ряд существенных недостатков. Основной недостаток — применение в качестве критерия техногенных нагрузок на водный объект ПДК<sub>рх</sub>, разработанных для целей рыбохозяйственного использования. Как показывает многолетний опыт работы в данном направлении, действующая система общефедеральных ПДК:

- не учитывает естественный гидрохимический режим водного объекта и почвенно-геохимические особенности водосборной территории конкретных водных объектов;
- не имеет объективных критериев подобия для перехода от модельных тест-систем, на основе которых устанавливаются нормативы, к реальным объектам;
- не рассматривает зависимость токсичности железа и других металлов от физико-химических показателей воды.

В рамках решения задачи рационального использования водных ресурсов и охраны вод от загрязнения ст. 35 Водного кодекса РФ предус-

мотрена разработка и установление нормативов допустимого воздействия на водные объекты (НДВ) и целевых показателей качества воды в водных объектах. При этом поддержание поверхностных и подземных вод в состоянии, соответствующем требованиям законодательства, обеспечивается путем установления и соблюдения НДВ на водные объекты для каждого речного бассейна или его части с учетом природных особенностей бассейна. Отсутствие ряда законодательных нормативных документов препятствует введению в действие НДВ. Решением данной проблемы, при отсутствии утвержденных НДВ, является установление регионального норматива качества воды для железа. Следует отметить, что данная работа по установлению регионального норматива должна проходить в рамках финансирования краевой целевой программы, а не за счет средств отдельного водопользователя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тайсаев Т.Т.* Геохимия таежно-мерзлотных ландшафтов и поиски рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1981. 136 с.
2. *Варов А.А.* Солевой состав верхней Камы и ее притоков // Известия биологического института при Пермском университете. Ч. 4. Вып. 1. Пермь. 1928. С. 35—53.
3. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 270 с.
4. *Черняев А.М., Черняева Л.Е., Еремеева М.Е.* Гидрохимия болот (Урал и Приуралье). Л.: Гидрометеиздат, 1989. 429 с.
5. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 25. Бассейн реки Камы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 707 с.
6. *Лепихин А.П., Мирошниченко С.А.* К проблеме оценки «фоновой» содержания химических ингредиентов в водотоках // Водное хозяйство России. 2000. Т. 2. № 3. С. 228—248.
7. *Лепихин А.П., Мирошниченко С.А.* Особенности задания «фоновой» концентраций в естественных водотоках // Водное хозяйство России. 2002. Т. 4. № 3. С. 247—262.
8. *Паутов А.И.* Свойство наилок северных рек Пермской области // Плодородие и мелиорация почв Нечерноземья: межвуз. сб. научн. тр. Пермь. 1991. С. 18—27.
9. *Лепихин А.П., Казаков А.Г., Капитанова Е.Н., Лантева А.К.* Особенности влияния предприятий ПО «Кизелуголь» на Камское водохранилище // Актуальные вопросы охраны окружающей среды в топливно-энергетических и угольных комплексах: сб. науч. тр. ВНИИОСуголь. Пермь. 1990. С. 33—39.
10. Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1980. 130 с.

#### Сведения об авторе:

Мирошниченко Сергей Анатольевич, к. г. н., старший научный сотрудник, Лаборатория проблем гидрологии суши, Учреждение Российской академии наук Горный институт Уральского отделения РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78; Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (КамНИИВХ), 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33; e-mail: kama2100@mail.ru