

## ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.579

С.А. Двинских, Ю.О. Вострокнутова, А.Б. Китаев

## РОЛЬ ТЕХНОГЕННОГО ЖЕЛЕЗА В ФОРМИРОВАНИИ ЕГО СОДЕРЖАНИЯ В ВОДЕ КАМСКОГО И ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

Выявлена роль природной и техногенной составляющих содержания железа в водах камских водохранилищ. Она обусловлена существенными превышениями его концентрации в районах питьевых водозаборов г. Перми. В основу исследования положены материалы полевых исследований изучаемых водных объектов в 2001-2011 гг.

Ключевые слова: водный объект; концентрация железа; загрязнение; природные и техногенные факторы

Выбор железа как элемента исследований объясняется тем, что содержание его в концентрациях, превышающих ПДК в 8 и более раз зафиксировано в районе основного питьевого водозабора г. Перми (Чусовского), подобные случаи отмечены и на других водозаборах. Причиной этого могут быть как природные, так и антропогенные факторы. Изучение их вклада в содержание железа в камской воде представляет несомненный интерес.

**Характеристика природного фона**

Анализ архивного материала, содержащего данные о химическом составе р. Камы, литологии и геологии территории, начиная с 20-х гг. XX в., показал, что к основным природным источникам железа в водах реки следует отнести:

- 1) геологические особенности территории Урала и Предуралья (наличие большого количества пород и минералов, содержащих железо);
- 2) подземные воды, контактирующие с этими породами;
- 3) подзолистый тип почв и таежная зона, способствующие формированию кислой реакции почвы и лесной подстилки, из которой железо легко переходит в поверхностные воды;
- 4) затопленные торфяники и болотные массивы в верховье р. Камы и в среднем и нижнем течении ее северных притоков, а также в верховье р. Чусовой;
- 5) аллювиальные почвы пойм.

На Урале широко распространены горные породы и минералы, содержащие железо. В природных средах железо находится в виде магнетита, гематита, пирита, карбоната железа – сидерита, силиката железа [2]. В результате процессов выщелачивания и растворения горных пород природные воды обогащаются ионами железа, что в сочетании с другими процессами определяет высокое его содержание в природных водах Пермского края.

Для территории края характерен подзолистый тип почвообразования. Подзолистый процесс заключается в распаде минералов материнской почвообразующей породы и выносе из верхних слоев материнской породы продуктов этого распада, т.е. способствует образованию и накоплению соединений железа [3]. Бассейн р. Камы на рассматриваемом участке представлен средней и южной тайгой. Кислые растворы, образующиеся при разложении лесной подстилки, разрушают соединения железа, которые переходят при этом в растворенное состояние и нисходящим током воды выносятся вглубь почвы, затем в грунтовые воды, либо смываются в поверхностные водные объекты [5]. Заболоченные территории с торфяно-болотными почвами характеризуются незначительностью солевого состава, почти полным отсутствием анионов сильных кислот и щелочных металлов, большим количеством гуминовых веществ и наличием железа. Источником железа и гуминовых веществ как раз и является верхняя часть Камы, ибо при дальнейшем течении ее притоки только

© Двинских С.А., Вострокнутова Ю.О., Китаев А.Б., 2015

**Двинских Светлана Александровна**, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990 г. Пермь, ул. Букирева, 15, E-mail: hydrology@psu.ru

**Вострокнутова Юлия Олеговна**, студентка кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990 г. Пермь, ул. Букирева, 15, E-mail: hydrology@psu.ru

**Китаев Александр Борисович**, кандидат географических наук, профессор кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990 г. Пермь, ул. Букирева, 15, E-mail: hydrology@psu.ru

снижают концентрацию указанных веществ, однако на всем протяжении Камы (от слияния с р. Вишерой до г. Перми) количество железа довольно значительно и вода имеет желтоватый цвет. Правые притоки содержат очень незначительные количества железа и гуминовых веществ, хотя их истоки расположены в одной области с истоками р. Камы, так что Кама, по-видимому, получает запасы этих веществ в северной части, при течении на восток. Все северные притоки – реки Пильва, Кельтма, Тимшер, Лопья – подходя к р. Каме, в своих нижних течениях обогащаются гуминовыми веществами, благодаря чему вода их принимает цвет чая. Если же принять во внимание, что в данной местности часто встречаются болотные руды, то этот участок можно рассматривать как центр обогащения камской воды железом и гуминовыми веществами [1]. В наилках и аллювиальных почвах пойм большинства рек края содержится повышенное количество подвижного кислорастворимого железа. Отложения наилок наблюдаются только на наиболее пониженных элементах пойм, систематически затопляемых в паводок и половодье [4].

Очень высокое содержание железа наблюдается в наилках пойм Камы и ее притоках: Вишеры, Колвы, Язьвы. Содержание подвижного железа здесь колеблется от 32 до 95 мг, а в камских увеличивается до 107–160 мг на 100 г наилка. Столь же высокой ожелезненностью характеризуются и аллювиальные почвы пойм указанных рек. А у почв водораздельных пространств его не более 10–16 мг на 100 г почвы. Тем не менее, именно они являются источником подвижного железа, которое внутрипочвенно проникает в поймы рек [4].

Основные притоки Камы значительно отличаются друг от друга природными условиями бассейнов и формированием химического состава. Согласно исследованиям А.А. Варова [1] и А.О. Таусон [6], все они содержат большое количество железа, которое характеризует природный фон рек, входящих в бассейн р. Камы. Так для левых притоков, рек Вишера и Чусовая, концентрация железа превышала ПДК почти в 6 раз, (табл. 1), а в Яйве и Косьве – более чем в 4 раза. Среди правых притоков наибольшее содержание железа.

Таблица 1

Концентрации железа, поступающие с притоками по данным А.А. Варова [1] и А.О. Таусон [6]

Водоток	Концентрация железа, мг/л	Год	Примечание
Кама	2,20*	1928	1,5 км выше устья р. Вишера
Левые притоки р. Кама			
Вишера	1,65*	1928	1,5 км выше впадения в р. Кама
Яйва	1,35*	1928	2,0 км выше впадения в р. Кама
Косьва	1,45*	1928	1,0 км выше впадения в р. Кама
	0,31	1937	
	0,74	1938	
Чусовая	1,80*	1928	1,0 км выше впадения в р. Кама
	0,13	1937	
	0,21	1938	
Правые притоки р. Кама			
Кондас	1,30*	1928	0,5 км выше впадения в р. Кама
Иньва	0,90*	1928	0,5 км выше впадения в р. Кама
	0,24	1937	
Обва	0,70*	1928	
Примечание: * – содержание железа с алюминием			

#### Современная характеристика содержания железа в исследуемых объектах

Содержание железа в настоящее время определяется взаимодействием природных и антропогенных факторов. К основным антропогенным факторам относятся: разработка месторождений полезных ископаемых и деятельность промышленных предприятий, ливневые стоки с городских территорий, подземные воды в пределах разработки месторождений нефти, калийных солей, каменного угля и сильно урбанизированных территорий. В целом по акватории р. Камы до г. Перми концентрации железа изменяются от 5–7 до 7–14 ПДК. В таблице 2 приведены концентрации железа в водах р. Камы и ее притоков за 1998–2004 гг.

Таблица 2

Содержание железа в водах р. Кама и ее притоков по данным за период 1998–2004 гг. [9]

Водоток	Содержание железа	
	Кол-во ПДК	мг/л
р. Вишера, левый приток р. Кама	4–8	1,2–2,4
<b>Район Березниковско-Соликамского промузла</b>		
р. Кама	5–12	1,5–3,6
р. Поповка, р. Усолка	37	11,1
<b>Район Кизеловско-Губахинского промузла</b>		
р. Косьва, левый приток р. Кама	24–70	7,2–21
р. Вильва, приток р. Усьва	211–293	63,3–87,9
р. Усьва, правый приток р. Чусовая	8	2,4
<b>Район Лысьвенско-Чусовского, Кунгурского промузлов</b>		
р. Лысьва	2–6	0,6–1,8
р. Сытва, правый приток р. Чусовая	2–3	0,6–0,9
р. Чусовая, левый приток р. Кама	2–6	0,6–1,8
<b>Район Пермско-Краснокамского промузла</b>		
р. Кама	4–7	1,2–2,1
р. В. Мулянка	3	0,9
р. Пыж, правый приток р. Кама	5	1,5

На рисунке 1 представлено изменение концентраций железа по длине р. Камы в различные фазы гидрологического режима.

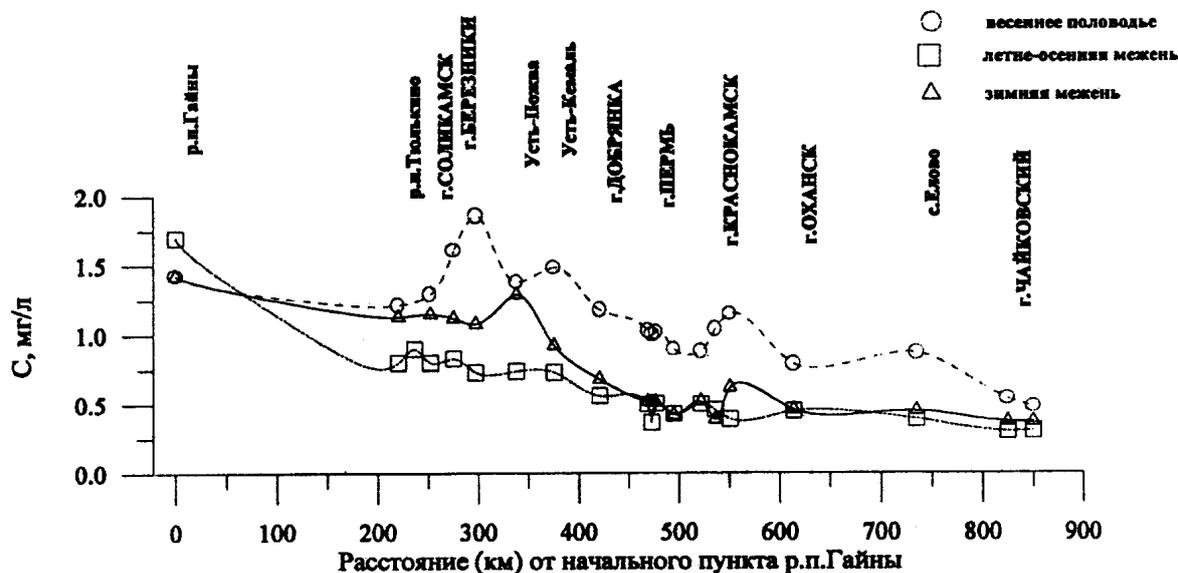


Рис. 1. Изменение концентраций железа по длине р. Камы в различные фазы гидрологического режима [3]

Наибольшее содержание железа отмечается в Камском водохранилище в весеннее половодье и зимнюю межень. Концентрация железа изменяется по длине в диапазоне (0,25–2,00) мг/л. Максимальные значения отмечаются в районе Соликамско-Березниковского и Пермско-Краснокамского промышленных узлов. Анализ изменения содержания железа по длине р. Камы показал, что высокие концентрации железа обусловлены как природными условиями ее бассейна, так и антропогенным воздействием, что, в свою очередь, свидетельствует о необходимости определения степени влияния природной и антропогенной составляющей концентрации железа в воде.



Рис. 2. Схема расположения пунктов наблюдения за качеством поверхностных вод и мест сброса сточных вод на территории Пермского края

### Степень влияния природной и антропогенной составляющей на концентрацию железа в воде

Начальный этап исследования заключается в определении количества железа, поступающего в Камское и Воткинское водохранилище с боковыми притоками. В основу исследования положены данные объемов сброса железа муниципальными районами Пермского края за период 1998–2009 гг., а также данные гидрохимических наблюдений за период 2001–2011 гг.

Сбросы сточных вод, имеющих загрязняющие вредные вещества, осуществляются на всей территории Пермского края, однако систематические данные имеются лишь по 27 муниципальным районам: Александровский район, Бардымский район, Березовский район, Верещагинский район, Горнозаводский район, Гремячинский район, Губахинский район, Добрянский район, Еловский район, Карагайский район, Кизеловский район, Кишертский район, Красновишерский район, Краснокамский район, Кунгурский район, Лысьвенский район, Нытвенский район, Осинский район, Оханский район, Очерский район, Пермский район, Сивинский район, Соликамский район, Суксунский район, Усольский район, Чайковский район, Чусовской район (рис. 2, 3).

На основе собранных данных построена карта максимального, минимального и среднего объемов сброса железа муниципальными районами Пермского края за 1998–2009 гг. (рис.3).

Ежегодно в каждый водный объект Пермского края сбрасывается минимум 1 т железа. Наибольшие объемы железа поступают в водохранилища с территорий высокой концентрации промышленных предприятий: Пермско-Краснокамский, Березниковско-Соликамский, Кизеловско-Губахинский промышленные узлы и др. Максимальный объем сбросов железа за период 1998–2009 гг. наблюдался в Пермском и Красновишерском районе и составил 55,5 т (1998 г.) и 19,4 т (2000 г.) соответственно.

Для выделения доли природной и техногенной составляющих железа в воде камских водохранилищ проведены расчеты, позволяющие определить объемы железа, поступающие с притоками и сбрасываемые со сточными водами непосредственно в водохранилища. На начальном этапе расчетов определены объемы сброса железа, приходящиеся на 1 км расстояния по водотоку от места сброса до водохранилища и позволяющие определить конечный объем железа поступающий в него.

Уже сейчас можно отметить значительные поступления железа с бассейнов рек Яйвы, Косьвы и Чусовой. Объяснить данную ситуацию можно тем, что все они протекают по территории Кизеловского угольного бассейна, который, несмотря на прекращение своей деятельности, продолжает оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Анализ данных свидетельствует о том, что расход шахтных вод в целом снизился, однако это не привело к улучшению качества воды. В 1998–2009 гг. объемы сброса железа по этим бассейнам превышают объемы сброса в период активной работы шахт.

По данным Пермского ЦГМС в контрольных створах р. Косьвы ниже г. Губахи среднегодовые концентрации железа составляют 55 ПДК (в 2006 г.). Максимальные концентрации железа неоднократно достигали уровня экстремально высокого загрязнения водного объекта (ЭВЗ). Таким образом, можно сделать вывод о том, что малые реки Кизеловского угольного бассейна практически выведены из хозяйственного оборота, а по большим рекам отмечается достаточно высокое превышение по железу [9].

Расчеты концентраций сбросов железа на входе в водохранилища, необходимые для определения объемов техногенного железа поступающего с притоками р. Камы, проведены на основе данных объемов сброса железа и объемов стока воды за 2003–2009 гг.

Среднемесячные объемы стока воды  $W_{\text{стока}}$ , ( $M^3$ ), вычислены по формуле:

$$W_{\text{стока}} = Q \cdot 86400 \cdot 365, \quad (1)$$

где  $Q$  – среднемесячный расход воды в реке,  $m^3/c$ ;  $86400 \cdot 365$  – количество секунд в году, с.

В связи с отсутствием данных среднемесячных расходов воды ( $Q$ ,  $m^3/c$ ) за рассматриваемый период, при расчете объемов стока воды использована зависимость расхода воды от порядка притока  $Q=f(N)$  [7] в маловодном, среднем и многоводном годах.

Существует несколько классификаций порядков рек: нисходящая (от главной реки к притокам) и восходящая (от притоков к главной реке). Черных Е.А. доказала, что наиболее объективной является восходящая классификация. Однако и она имеет несколько разных схем сочетания потоков. Однопорядковые реки по любой из предложенных учеными «восходящих» классификаций сравнимы между собой, особенно в сходных природных условиях. Следовательно, они являются типичными реками-«близнецами» и для их изучения можно использовать метод аналогии. Если построить графики связи нисходящего порядка реки со всеми важнейшими морфометрическими и режимными характеристиками, то по известному порядку реки можно оперативно и с достаточной степенью точности получить весь комплекс необходимых показателей для любой реки в любом ее створе [7]. Основываясь на этом, нами получены значения расходов воды ( $Q$ ,  $m^3/c$ ) в зависимости от порядка реки ( $N$ ), которые представлены в таблице 3.

Концентрация содержания железа ( $C_{\text{сб.}}$ , мг/л), поступившего со сточными водами, определена по отношению объема сброса железа за год ( $W_{\text{сб.}}$ , тонн) к объему стока воды за год ( $W_{\text{стока}}$ ,  $M^3$ ):

$$C_{\text{сб.}} = (W_{\text{сб.}} \cdot 10^9) / (W_{\text{стока}} \cdot 1000). \quad (3)$$



где  $W_{\text{сб.}}$  – объем сброса железа за год, тонн;  $W_{\text{ст.вод}}$  – объем загрязненных сточных вод за год, млн. м<sup>3</sup>.

На основе полученных расчетным путем данных и фактических концентраций за маловодный 2003 г., измеренных в пунктах наблюдения, построен график изменения содержания железа по длине камских водохранилищ (рис. 4).

Статистическая обработка данных и их анализ показал, что концентрации железа, измеренные в пунктах наблюдения за качеством поверхностных вод, изменяются по длине водохранилищ от 0,38 до 1,16 мг/л, превышая ПДК в 1,5–3 раза (ПДК  $Fe_{\text{общ.}}$  – 0,3 мг/л). Эта картина нарушается водами притоков и концентрации возрастают и в районе р. Косьвы до 7,25 мг/л (24 ПДК), а в месте слияния рек Чусовой и Сылвы – до 3,09 мг/л (10 ПДК) соответственно. Как можно видеть из рис. 4 концентрации техногенного железа (синяя линия) при этом изменяются от 0,00 до 0,72 мг/л соответственно. Наибольшее содержание техногенного железа отмечается в районе г. Краснокамска (0,72 мг/л) и с. Елово (0,60 мг/л) и превышает ПДК в 2 раза и более (рис.4).

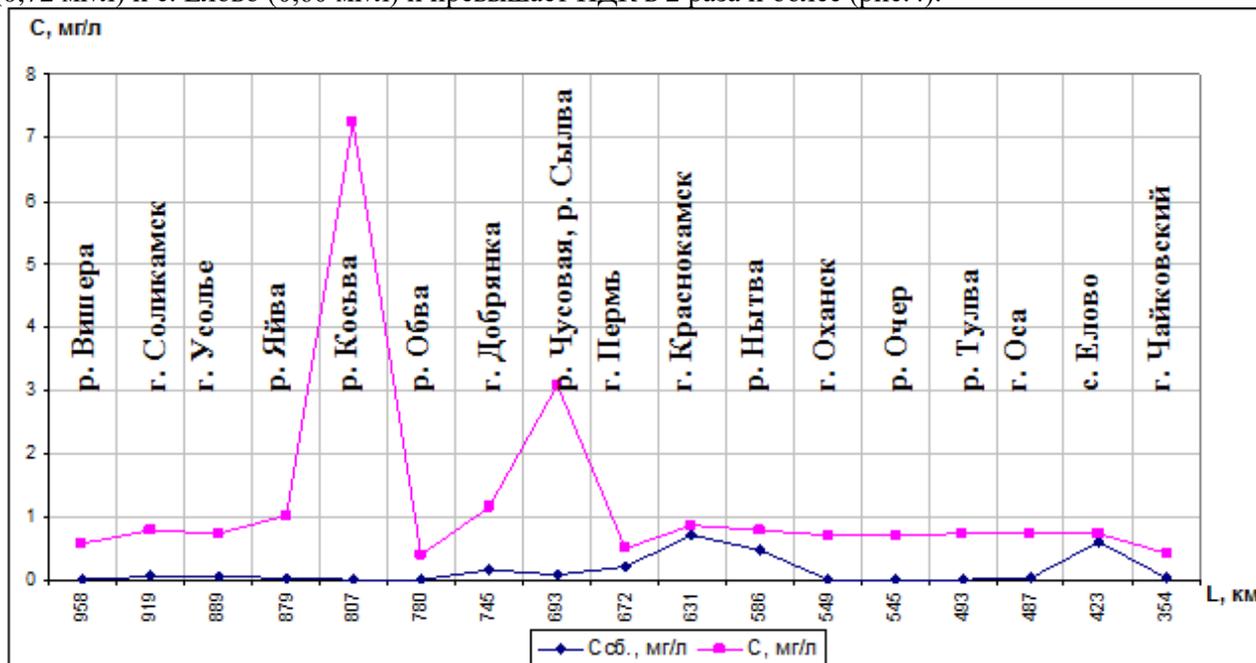


Рис. 4. Изменение расчетных концентраций железа ( $C_{\text{сб.}}$ , мг/л), поступающих в воду со сбросами промышленных предприятий, и фактической концентрации железа (С, мг/л) по длине камских водохранилищ за 2003 г.

В верхней части Камского водохранилища концентрации железа изменяются от 0,57 до 1,01 мг/л, что свидетельствует о преобладании природного железа, поскольку содержание техногенного железа здесь составляет 0,00–0,07 мг/л. Превышение ПДК обусловлено поступлением железа с заболоченных территорий, а также месторождений торфа Гайнского, Чердынского и Красновишерского районов, и со сточными водами предприятий г. Соликамска и г. Березники.

Увеличение концентраций железа в районе р. Косьвы связано с излиями шахтных вод Кизеловского угольного бассейна; месторождениями металлических и неметаллических полезных ископаемых Кизеловского, Губахинского, Гремячинского, и Горнозаводского районов. Повышенное содержание железа в реках Чусовая и Сылва объясняется природными особенностями их бассейнов (месторождениями торфа в Добрянском районе и пр.), а также ухудшают качество воды в истоках этих рек сточные воды промышленных предприятий Свердловской области (г. Первоуральск, г. Староуткинск, г. Красноуфимск и др.) и г. Чусового.

Осаждение железа в верхнем бьефе Камской ГЭС обеспечивает достаточно резкое уменьшение его содержания у г. Перми по сравнению с концентрациями на рр. Чусовой и Сылве.

Воткинское водохранилище характеризуется более равномерным изменением содержания железа по длине: от 0,42 до 0,87 мг/л. Концентрации техногенного железа в районе г. Краснокамска составляют 0,72 мг/л, что, вероятно, связано с деятельностью предприятий Пермско-Краснокамского промышленного узла, и 0,60 мг/л в районе с. Елово. Повышенные значения содержания железа в районе с. Елово наблюдались только в 2003г., в другие годы не отмечались. Основными природными источниками поступления железа в воды Воткинского водохранилища являются подзолистые и лесные почвы бассейнов рек Тулва, Очер и Нытва, а также аллювиальные почвы их пойм; торфяные

месторождения Частинского, Еловского, Бардымского, Куединского, Чернушинского и Уинского районов.

В другие годы исследуемого периода (2004–2009 гг.) наблюдалось аналогичное изменение концентраций железа по длине водохранилищ с наибольшими значениями их в районе рек Косьва, Чусовая и Сытва, что свидетельствует о преобладании здесь природных источников поступления железа.

#### **Выводы:**

1) на пространственно-временные изменения концентрации железа в воде Камского и Воткинского водохранилищ оказывают влияние как природные (поступление с верховьев р. Камы), так и техногенные (из районов Соликамско-Березниковского и Пермско-Краснокамского промышленных комплексов) факторы;

2) материалы исследования свидетельствуют о преобладании природной составляющей железа в формировании его содержания в воде камских водохранилищ;

3) наличие высокого природного фона концентрации железа в верховьях р. Камы, а также их высокие значения в воде притоков камских водохранилищ должно учитываться при разработке нормативов сбросов сточных вод в водоемы.

#### **Библиографический список**

1. *Варов А.А.* Солевой состав верхней Камы и ее притоков // Изв. биол. НИИ и биол. станции при Перм. ун-те. Пермь, 1928. Т.6. Вып.1. С.35–53.

2. *Гаев А.Я.* Гидрогеоэкологические особенности территории Урала // Вестник Пермского ун-та. Геология. Пермь, 1997. Вып.4. С.21–30.

3. *Мирошниченко С.А.* Пространственное распределение и временная изменчивость содержания тяжелых металлов в воде поверхностных водных объектов Пермской области: автореф. дис... канд. геогр. наук. Пермь, 1998. 17с.

4. *Паутов А.И.* Свойства наилок северных рек Пермской области // Плодородие и мелиорация почв Нечерноземья: межвуз. сб. научн. трудов. Пермь, 1991. С.18–27.

5. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафтов. М., 1975. 331с.

6. *Таусон А.О.* Водные ресурсы Молотовской области. Пермь, 1947. 324с.

7. *Черных Е.А.* Гидрография и гидро-морфометрический метод исследования рек: дисс. канд. геогр. наук. Пермь, 1971. 177с.

8. Состояние и охрана окружающей среды Пермской области в 1998–2004 гг. [Электронный ресурс] URL: <http://www.permecology.ru/> (дата обращения: 1.11.2015)

9. Экологическое состояние Кизеловского угольного бассейна. [Электронный ресурс] URL: <http://new.permecology.ru/report/report2007/30.html> (дата обращения: 1.11.2015)

#### **S.A. Dvinskikh, Y.O. Vostroknutova, A.B. Kitaev THE ROLE OF TECHNOGENIC IRON IN THE FORMATION OF ITS CONTENT IN THE WATER OF THE KAMA AND VOTKINSK RESERVOIRS**

The role of natural and technological components of the iron content in the waters of the Kama Reservoir due to significant excess of its concentration in the areas of Perm drinking water intakes. The research is based on material tests in the studied water bodies in 2001-2011.

Key words: water body; the concentration of iron; pollution; natural and technological factors.

**Svetlana A. Dvinskikh**, Doctor of Geography, Professor of Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University; 15 Bukireva, Perm Russia 614990; hydrology@psu.ru

**Yuliya O. Vostroknutova**, student of Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University; 15 Bukireva, Perm Russia 614990; hydrology@psu.ru

**Alexandr B. Kitaev**, Candidate of Geography, Professor of Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University; 15 Bukireva, Perm Russia 614990; hydrology@psu.ru