

УДК 536.7:556.5:54-4:628.16(470.21)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОДОПОДГОТОВКИ (С. ЛОВОЗЕРО, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Мазухина Светлана Ивановна¹,
simazukhina@mail.ru

Дрогобужская Светлана Витальевна²,
s.drogobuzhskaia@ksc.ru

Сандимиров Сергей Степанович¹,
sand1966@rambler.ru

Маслобоев Владимир Алексеевич¹,
v.masloboev@ksc.ru

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение
Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»,
Россия, 184209, г. Апатиты, Академгородок, 14а.

² Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева –
обособленное подразделение Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»,
Россия, 184209, г. Апатиты, Академгородок, 26а.

Актуальность. Очистка сточных и питьевых вод – важнейшая и актуальная экологическая задача предприятий. Анализ научной литературы позволяет сделать вывод о необходимости применять методы очистки и утилизации вод либо разрабатывать схему для каждого конкретного водного объекта с учетом его физико-химических характеристик и ионного состава. Считается, что реагенты, введенные при водоподготовке воды, не изменяют ее химический состав, однако отсутствие расширенного химического анализа ставит под сомнение неизменность химического состава воды.

Цель: оценка изменения химического состава вод питьевого водоснабжения с. Ловозеро (Мурманская область) в результате водоподготовки с помощью физико-химического моделирования (ПК «Селектор»).

Объекты: пробы вод р. Вирма и питьевых вод центрального водоснабжения (столовая, колонка) с. Ловозеро, отобранные в ноябре 2021 г.

Методы: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ELAN 9000 DRC-е, Перкин Элмер, США), потенциометрия (Эксперт-001, Россия) и титриметрия. Термодинамические расчеты выполнены с помощью метода физико-химического (термодинамического) моделирования, реализованного в программном комплексе (ПК «Селектор»).

Результаты. С помощью мониторинга и физико-химического моделирования (ПК «Селектор») природных вод реки Вирма и вод центрального водоснабжения (с. Ловозеро, Мурманская область) дана оценка влияния реагентов, применяемых в результате водоподготовки, на химию воды. Показано, как вид реагента и его количество (коагулянт, жидкий хлор, сода и гипохлорит натрия (NaOCl)) оказывают влияние на значения pH, Eh, химический состав воды, состав новообразованных фаз. Образование катионов и анионов редкоземельных элементов при различных концентрациях жидкого хлора указывает на возможность создания селективного способа очистки вод от РЗЭ на сорбентах разного типа или же использования этих свойств при обогащении руд. Замена реагентов на твердую соль NaOCl упрощает процесс водоподготовки, однако не приближает химический состав воды к нормативам, применяемым для бутилированных вод и не делает ее более полезной по макрокомпонентам.

Ключевые слова:

Термодинамическое моделирование, природные и питьевые воды, реагенты, водоподготовка, РЗЭ, уран.

Введение

Очистка сточных и питьевых вод – важная и актуальная экологическая задача [1, 2]. Анализ научной литературы по очистке и переработке вод позволяет сделать вывод о необходимости применять методы очистки либо утилизации вод и разрабатывать схему для каждого конкретного водного объекта с учетом его физико-химических характеристик и ионного состава [1, 3, 4]. Способы очистки вод можно условно поделить на механические (фильтрация) и комбинированные, когда технологическая линия включает механическое отстаивание под действием коагулянтов, хлорирование, фильтрование и стабилизацию кислотности среды (регулирование pH) [1, 5]. Полагают, что

реагенты, которые вводят при водоподготовке, не изменяют химический состав воды. Как правило, в качестве коагулянтов применяют соли алюминия и железа [5]. При этом расширенный химический анализ воды, предназначенной для дальнейшего употребления, до и после обработки коагулянтами, не проводят, что ставит под сомнение неизменность химического состава очищенной воды.

В рамках данной работы на примере результатов мониторинга природных вод р. Вирмы и вод центрального водоснабжения с. Ловозеро (Мурманская область) была проведена оценка влияния реагентов, применяемых в результате водоподготовки на химический состав питьевых вод.

Вода из водозабора (р. Вирма) характеризуется высоким природным содержанием железа, цветностью и мутностью. По данным исследований химического состава воды, выполненных ГОУП «Оленегорскводоканал» и ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Мурманской области в г. Мончегорске, г. Оленегорске и Ловозерском районе» из водозабора и распределительной сети сельского поселения Ловозеро [6], сделано следующее заключение: вода из реки Вирмы не соответствует требованиям Руководства по обеспечению качества питьевой воды. В настоящее время износ сетей составляет 93 %.

Существующая схема обработки воды центрального водоснабжения с. Ловозеро включает в себя фильтрование, коагулирование и хлорирование [7]. Обеззараживание происходит коагулянтном полиоксихлоридом алюминия марки «АКВА-АУРАТ» и жидким хлором в соответствии с требованиями ГОСТ (поставщик АОТ «Каустик» г. Волгоград), рН воды стабилизируется раствором кальцинированной соды с концентрацией 50 г/л.

Цель данной работы – оценка изменения химического состава вод питьевого водоснабжения с. Ловозеро (Мурманская область) в результате водоподготовки с помощью физико-химического моделирования (ПК «Селектор»).

Материалы и методы

В работе были использованы результаты анализа проб воды с определением полного химического состава вод с привлечением прецизионных методов анализа – масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ELAN 9000 DRC-e, Перкин Элмер,

США), потенциометрии (Эксперт-001, Россия) и титриметрии. Концентрации фтора были определены с помощью термодинамических расчетов по методике, представленной в работе [8], они сопоставимы с результатами анализов природных объектов Хибинского массива [9].

Все термодинамические расчеты выполнены с помощью метода физико-химического (термодинамического) моделирования, реализованного в программном комплексе (ПК «Селектор»), разработанном под руководством профессора И.К. Карпова (Институт геохимии им. Виноградова СО РАН, г. Иркутск). ПК снабжен системой встроенных баз термодинамических данных, оснащен модулем формирования моделей различной сложности [9]. В физико-химическую модель включены 42 независимых компонента (Al, B, Br, Ar, He, Ne, C, Ca, Cl, F, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, P, S, Si, Sr, Cu, Zn, Ni, Pb, V, Ba, U, Ag, Au, Co, Cr, Hg, As, Cd, Mo, Se, La, Ce, Zr, H, O, e), 1062 зависимых компонентов, в том числе, в водном растворе – 435, в газовой фазе – 76, жидких углеводородов – 111, твердых фаз, органических и минеральных веществ – 440. Набор твердых фаз мультисистемы сформирован с учетом минерального состава горных пород Балтийского щита [10–12]. В настоящей работе ПК используется также для моделирования в системе «вода-реагент».

Результаты и обсуждение

Объекты исследования. На рис. 1 представлены станции отбора проб воды в ноябре 2021 г. – пробы вод р. Вирмы и питьевых вод центрального водоснабжения (столовая, колонка) [6].



Рис. 1. Станции отбора проб воды: 1 – р. Вирма (водозабор с. Ловозеро); 2 – столовая в с. Ловозеро; 3 – колонка в с. Ловозеро

Fig. 1. Water sampling stations: 1 – Virma river (Lovozero village water intake); 2 – dining room in Lovozero village; 3 – pump in Lovozero village

В табл. 1 представлены аналитические данные и результаты моделирования вод р. Вирмы и питьевой воды (столовая).

Анализ результатов (табл. 1) показывает, что после проведения водоподготовки в воде увеличиваются концентрации Al, Na и HCO₃⁻.

Таблица 1. Аналитические данные (АД) и результаты моделирования (РМ) природных и питьевых вод (в мг/л), ноябрь 2021 г

Table 1. Analytical data (AD) and simulation results (SR) of natural and drinking waters (mg/l), November 2021

Показатель Indicator	Река Вирма Virma River		Столовая с. Ловозеро Dining room in Lovozero		Показатель Indicator	Река Вирма Virma River		Столовая с. Ловозеро Dining room in Lovozero	
	АД AD	РМ SR	АД AD	РМ SR		АД AD	РМ SR	АД AD	РМ SR
Eh, V		0,828		0,754	Ва сум	0,0047	4,71E-03	5,56E-03	5,56E-03
pH	6,67	6,667	7,98	7,97	Ba ²⁺		4,71E-03		5,56E-03
Is(ион.сила)		0,000575		0,001367	BaCO ₃		1,53E-07		9,12E-06
Alсум	0,057	5,71E-02	0,291	2,91E-01	BaCl ⁺		1,00E-07		5,77E-07
Al(OH) ₂ ⁺		1,17E-03		5,43E-05	BaOH ⁺		4,25E-10		9,61E-09
Al(OH) ₂ F		9,16E-02		2,49E-03	Si сум	6,31	6,31	6,10	6,10
Al(OH) ₂ F ₂ ⁻		2,03E-04		3,38E-06	SiO ₂		4,48		4,30
AlO ₂ ⁻		1,77E-02		3,31E-01	H ₂ SiO ₃ ⁻		6,29E-03		1,23E-01
HAIO ₂		1,40E-02		1,28E-02	H ₄ SiO ₄		1,44E+01		1,38E+01
Al(OH) ²⁺		2,74E-04		6,59E-07	Sr сум	0,033	3,32E-02	0,042	4,22E-02
Al(OH) ₃		1,22E-02		1,11E-02	Sr ²⁺		3,31E-02		4,17E-02
Al(OH) ₄ ⁻		2,42E-02		4,53E-01	SrOH ⁺		5,19E-09		1,25E-07
Al ³⁺		4,63E-06		6,04E-10	SrCO ₃		2,07E-06		1,32E-04
Ca сум	3,06	3,06E+00	3,36	3,36	SrHCO ₃ ⁺		2,45E-04		7,86E-04
Ca ²⁺		3,04E+00		3,31	SrCl ⁺		1,45E-06		8,90E-06
CaOH ⁺		1,74E-06		3,61E-05	SrF ⁺		6,87E-07		4,93E-07
CaCO ₃		8,33E-04		4,56E-02	Zn сум	<0,00001		<0,00001	
Ca(HCO ₃) ⁺		2,50E-02		6,92E-02	Cd сум	0,00003	2,80E-05	0,00004	3,65E-05
CaHSiO ₃ ⁺		7,22E-06		1,44E-04	Cd ²⁺		2,78E-05		3,53E-05
CaCl ⁺		1,62E-04		8,59E-04	CdCl ⁺		2,07E-07		1,28E-06
CaCl ₂		6,80E-09		1,82E-07	CdO		1,45E-12		6,98E-10
CaF ⁺		2,65E-04		1,64E-04	CdOH ⁺		8,58E-09		2,08E-07
CaSO ₄		2,58E-02		2,27E-02	Ni сум	<0,00001		<0,00001	
B сум	0,0095	9,50E-03	0,0092	9,21E-03	Pb сум	0,00006	6,35E-05	0,00035	3,45E-04
B(OH) ₃		5,42E-02		5,03E-02	Pb ²⁺		1,57E-05		5,80E-06
BO ₂ ⁻		8,74E-05		1,66E-03	PbOH ⁺		5,17E-05		3,67E-04
Fe сум	0,76	7,60E-01	0,251	2,55E-01	PbO		2,36E-09		3,31E-07
Fe ²⁺		7,29E-10		9,35E-13	PbCl ⁺		2,83E-08		5,11E-08
FeSO ₄ ⁺		5,15E-09		2,79E-12	Cu сум	0,0003	2,86E-04	0,0016	1,59E-03
Fe(OH) ₃		7,03E-02		4,16E-02	Cu ⁺		6,73E-16		3,92E-14
Fe(OH) ₄ ⁻		1,77E-03		1,11E-02	Cu ²⁺		2,75E-04		8,94E-04
FeOH ²⁺		3,15E-04		1,80E-06	CuCl ⁺		6,19E-08		9,84E-07
FeOH ⁺		1,51E-12		8,11E-14	CuOH ⁺		1,40E-05		8,75E-04
FeO ⁺		3,94E-01		2,25E-02	CuF ⁺		1,50E-07		2,80E-07
FeSO ₄		3,32E-12		1,69E-14	CuCl ₂ ⁻		-		2,02E-15
HFeO ₂		6,61E-01		3,91E-01	HCuO ₂ ⁻		4,30E-12		1,08E-07
FeO ₂ ⁻		5,77E-04		3,63E-03	P сум		3,26E-04		3,26E-04
FeCl ⁺		4,69E-14		1,28E-15	PO ₄ ³⁻	0,001	4,51E-10	0,001	3,82E-08
FeF ⁺		3,31E-13		1,01E-15	HPO ₄ ²⁻		2,23E-04		8,66E-04
FeF ²⁺		1,64E-07		5,38E-11	H ₂ PO ₄ ⁻		7,96E-04		1,46E-04
F ⁻		2,46E-01		1,50E-01	Co сум	0,0001		0,0001	1,01E-04
HF		7,45E-05		2,22 E-06	Co ²⁺		9,72E-05		1,00E-04
HF ₂ ⁻		4,33E-10		7,87E-12	CoO		2,01E-10		7,84E-08
K сум	0,41	4,10E-01	0,52	5,20E-01	CoCl ⁺		3,38E-08		1,70E-07
K ⁺		1,16E-07		5,20E-01	HCoO ₂ ⁻		1,86E-16		1,49E-12
KCl		1,16E-07		7,42E-07	CoOH ⁺		3,80E-08		7,50E-07
KHSO ₄		6,48E-09		8,11E-15	Cl сум	2,09		10,9	1,09E+01
KOH		2,15E-04		1,62E-07	Cl ⁻		2,09E+00		1,09E+01
KSO ₄ ⁻		4,10E-01		2,36E-04	HCl		9,59E-08		2,44E-08
Mg сум	1,57	1,57E+00	1,76	1,76	Zr сум	0,0008	7,98E-04	0,00031	3,12E-04
Mg ²⁺		1,56E+00		1,74	HZrO ₃ ⁻		8,13E-04		4,68E-04
MgOH ⁺		1,66E-05		3,54E-04	ZrO ₂		3,63E-04		1,02E-05
MgCO ₃		2,79E-04		1,56E-02	U сум	0,00009	4,55E-05	0,00003	2,87E-05
Mg(HCO ₃) ⁺		1,73E-02		4,91E-02	HUO ₄ ⁻		2,68E-07		3,25E-06
MgCl ⁺		1,62E-04		8,81E-04	UO ₂ ²⁺		6,76E-08		1,06E-10
MgF ⁺		7,88E-04		5,00E-04	UO ₂ OH ⁺		1,50E-06		4,52E-08
MgSO ₄		2,53E-02		2,28E-02	UO ₂		-		-
MgHSiO ₃ ⁺		9,67E-06		1,97E-04	UO ₃		5,29E-05		3,14E-05
Mn сум	0,047	4,67E-02	0,016	2,77E-02	Li сум	0,00025	2,53E-04	0,0005	5,02E-04

Mn ⁺²		4,66E-02		2,76E-02	Li ⁺		2,53E-04		5,02E-04
MnOH ⁺		4,51E-06		5,11E-05	LiOH		6,23E-11		2,45E-09
MnO		3,50E-11		7,85E-09	Ce сум	0,00023	2,26E-04	0,00009	9,10E-05
HMnO ₂ ⁻		-		1,77E-13	Ce ³⁺		1,75E-04		6,52E-05
MnSO ₄		1,97E-04		9,45E-05	CeF ²⁺		3,58E-05		7,38E-06
MnF ⁺		5,98E-06		2,03E-06	CeF ₂ ⁺		6,06E-07		7,13E-08
MnCl ⁺		2,85E-06		8,23E-06	CeF ₃		1,74E-09		1,21E-10
CO ₃ ²⁻		3,56E-03		2,05E-01	CeF ₄ ⁻		2,43E-12		1,03E-13
HCO ₃ ⁻	15,7	1,82E+01	50,3	4,96E+01	CeHCO ₃ ²⁺		5,74E-06		5,27E-06
SO ₄ ²⁻	2,03	1,99	1,88	1,84	CeO ₂ H		3,11E-11		8,12E-08
HNO ₃		5,55E-12		2,87E-11	CeSO ₄ ⁺		2,24E-05		6,35E-06
NO ₃ ⁻	0,001	7,71E-04	0,08	8,15E-02	CeOH ²⁺		1,91E-06		1,32E-05
Na ⁺	2,62	2,62	19,9	1,99E+01	La сум	0,00015	1,54E-04	0,00008	7,97E-05
NaOH		9,06E-08		1,36E-05	La ³⁺		7,65E-05		1,98E-06
NaAlO ₂		4,72E-07		6,47E-05	LaCO ₃ ⁺		9,06E-05		1,11E-04
NaCl		6,30E-05		2,41E-03	LaF ²⁺		6,60E-06		9,43E-08
NaF		5,89E-06		2,64E-05	LaO ⁺				3,74E-09
NaSO ₄ ⁻		1,35E-03		8,82E-03	LaO ₂ H		2,25E-13		4,08E-11
NaHSiO ₃		7,28E-05		1,05E-02	LaOH ²⁺		5,05E-07		2,42E-07
O ₂		6,10		7,93	LaSO ₄ ⁺		9,89E-06		1,94E-07
CO ₂		6,61		8,79E-01	LaF ₂ ⁺		6,68E-08		5,45E-10
V сум	0,0007	7,37E-04	0,0008	7,73E-04	Ag сум	0,0013	1,34E-03	0,0013	1,30E-03
VO ₂ ⁺		2,40E-08		3,07E-12	Ag ⁺		5,54E-08		1,08E-09
VO ₄ ³⁻		3,39E-10		8,08E-09	AgNO ₃		6,29E-04		1,26E-03
HVO ₄ ²⁻		1,61E-03		1,76E-03					
H ₃ VO ₄		6,68E-05		1,69E-07					

С помощью физико-химического моделирования рассмотрены различные сценарии взаимодействия «вода–реагент» при водоподготовке (реагент – 10%-й раствор полиоксихлорида алюминия, жидкий хлор и 5%-й раствор соды) без выпадения твердых фаз (метастабильное состояние) и с выпадением твердых фаз (равновесное состояние). При необходимости очист-

ки холодной воды, содержащей большое количество природных органических примесей, чаще отдают предпочтение полиоксихлориду алюминия (по сравнению с другими реагентами) [13]. Химическая формула применяемого реагента – Al(OH)_ACl_B·nH₂O, где A+B=3, при A≥1,3. В наших расчетах использовали A=1,3; B=1,7.

Таблица 2. Химический состав 10%-го раствора полиоксихлорида алюминия Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}, T=5 °C

Table 2. Chemical composition of 10 % aluminum polyoxychloride solution Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}, T=5 °C

Концентрация, мг/л/Concentration, mg/l									
pH	Eh, В/В	Cl ⁻	Al(OH) ₂ ⁺	Al ³⁺	HAIO ₂	Al(OH) ₂ ⁺	Al(OH) ₄ ⁻	Al(OH) ₃	AlO ₂ ⁻
6,07	-0,216	6,10E+04	1,42E+04	9,47E+03	8,30E+03	5,22E+03	4,50E+03	3,96E+03	9,64E+02

На рис. 2 представлена блок-схема существующей водоподготовки, а в табл. 2 представлены формы нахождения алюминия в 10 %-ном растворе полиоксихлорида алюминия при температуре 5 °C.

Анализ результатов (табл. 2) показывает, что в этой слабкокислой восстановительной среде отмечается высокая концентрация Cl⁻, а из соединений алюминия преобладает Al(OH)₂⁺. Среди наиболее токсичных его форм выделяют свободные (гидратированные) ионы или аквакомплексы [Al(H₂O)₆]³⁺, гидроксокомплексы Al(OH)₂⁺ и Al(OH)₂⁺, существующие в слабкокислой среде при pH 4,5–5,5 [14]. Согласно исследованиям [15] установленные формы миграции Al(OH)₂⁺, Al³⁺ являются наиболее токсичными для растений.

Результаты взаимодействия 10%-го раствора полиоксихлорида с 1000 л воды р. Вирмы при температуре 5 °C и формы миграции алюминия и их концентрации показаны в табл. 3.

Согласно данным табл. 3, при добавлении коагулянта более 0,01 л в системе изменяются значения pH, Eh и состав новообразованных фаз, возрастают концентрации алюминия и хлора. При этом начинают преобладать именно токсичные формы алюминия. Изме-

нение концентрации HCO₃⁻ приводит к уменьшению карбонатов и гидрокарбонатов кальция и магния. Рост концентрации хлора приводит к увеличению концентрации хлоридов натрия и кальция, происходит изменение форм миграции лантаноидов и урана.

Полученные результаты показывают опасность передозировки коагулянта. Для дальнейших расчетов использовали объем коагулянта 0,01 л на 1000 л воды как оказавшего наименьшее влияние на химический состав воды (табл. 3).

Обеззараживание хозяйственно-питьевой воды с. Ловозеро производится в хлораторной жидким хлором, соответствующим требованиям ГОСТ (поставщик АООТ «Каустик» г. Волгоград) [7]. Поэтому на следующем этапе исследования изучали взаимодействие речной воды с жидким хлором. В качестве граничных условий модели использовали 1000 л речной воды и жидкий хлор (Cl₂). Результаты моделирования представлены на рис. 3. Полученные результаты указывают: происходит смещение pH в кислую область от 6,8 до 3,04 и рост концентрации хлора в водной среде (рис. 3, б). Изменение концентрации HCO₃⁻ влечет за собой изменение концентрации карбонатов и гидрокарбонатов Ca и Mg.

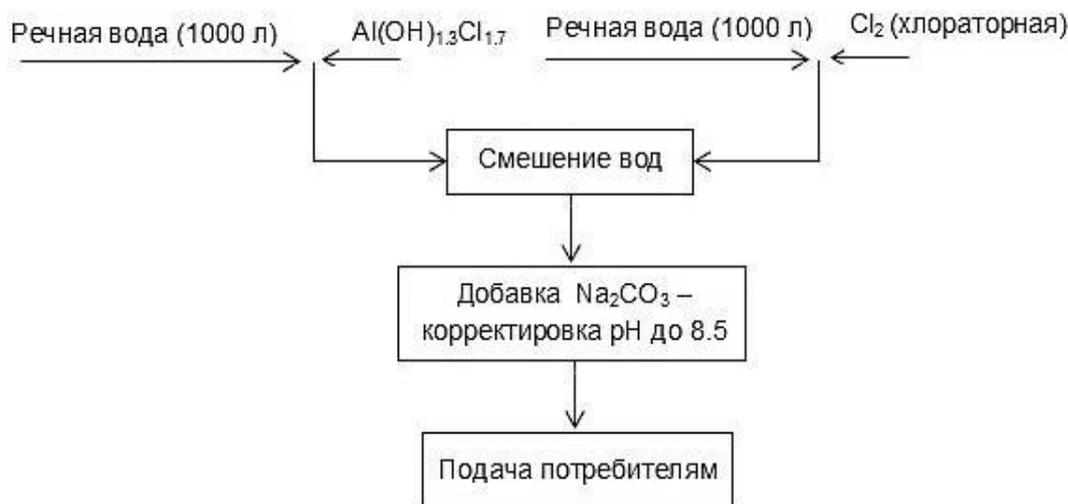


Рис. 2. Схема обработки воды центрального водоснабжения села Ловозеро
 Fig. 2. Water treatment scheme of the central water supply of Lovozero village

Таблица 3. Изменение форм миграции алюминия, концентраций Cl^- , HCO_3^- , состав новообразованных фаз при взаимодействии 10%-го раствора полиоксихлорида алюминия с 1000 л воды р. Вирмы, мг/л ($T=5^\circ C$)

Table 3. Changes in the forms of aluminum migration, Cl^- , HCO_3^- concentrations, composition of newly formed phases during the interaction of a 10 % solution of aluminum polyoxychloride with 1000 liters of water of the Virma river, mg/l ($T=5^\circ C$)

Формы миграции Forms of migration	10%-й р-р, л / 10 % solution, l					
	0,0001	0,0100	0,03162	0,1000	0,3162	1,0000
$Al(OH)_2F$	4,73E-05	5,75E-05	–	3,96E-04	6,42E-02	9,94E-02
$HAIO_2$	4,55E-06	4,67E-06	–	6,55E-06	3,02E-05	3,02E-05
$Al(OH)_2^{2+}$	4,70E-07	6,77E-07	–	2,38E-05	1,82E-01	5,93E-01
$Al(OH)_2^+$	2,13E-06	2,59E-06	–	1,81E-05	3,34E-03	5,84E-03
$Al(OH)_3$	3,26E-06	3,35E-06	–	4,70E-06	2,17E-05	2,17E-05
$AlSO_4^+$	5,47E-11	9,35E-11	–	1,56E-08	4,17E-03	1,84E-02
Al^{3+}	1,85E-08	3,16E-08	–	5,67E-06	1,86E+00	1,20E+01
HCO_3^-	17,7	16,6	–	6,42	0,213	0,130
Cl^-	2,10	2,70	4,03	8,21	21,4	63,3
Eh, В / Eh, V	0,846	0,850	0,858	0,888	0,976	0,989
pH	6,76	6,68	6,53	5,99	4,39	4,17
Новообразованные фазы/Newly formed phases, %						
Al-Si (алюмосиликаты)	3,18	16,66	41,53	92,72	95,88	97,67
SiO_2	85,14	72,3	48,61	–	–	–
$FeO(OH)$	11,0	10,4	9,29	6,85	3,89	2,19
MnO_2	0,67	0,64	0,57	0,42	0,24	0,13

В это же время отмечается рост концентрации $CaCl^+$, уменьшение концентраций $CaCO_3$ и $CaHCO_3^+$, изменяются формы существования редких и РЗЭ – для лантана преобладающим становится La^{3+} вместо $LaCO_3^+$ (при условии $Cl_2 > 0,03162$ моль).

В работах [16, 17] с помощью моделирования показано влияние фтора и хлора на растворимость соединений ряда элементов и формы миграции, в том числе U и РЗЭ, в нашей работе мы рассматриваем влияние хлора, который поступает в ходе водоподготовки.

На рис. 3, б–г показаны формы миграции элементов на примере урана, циркония и церия. Анализ результатов указывает на протекание окислительно-восстановительных процессов с изменением заряда ионов: уран во всех формах миграции 6-валентный, вначале преобладает нейтральная форма UO_3 , концентрация которой уменьшается при достижении концентрации хлора 0,1 моль. Дальнейшее увеличение концентрации хлора в системе приводит к увели-

чению содержания заряженного катиона уранила UO_2^{2+} . Для циркония характерна смена от отрицательного иона $HZrO_3^-$ ($0,0001 < Cl_2 < 0,01$)– ZrO_2 ($0,03162 < Cl_2 < 0,15849$) до ZrO^{2+} ($0,19953 < Cl_2$), для церия преобладающей формой миграции является Ce^{3+} .

В настоящее время накопление РЗЭ в биосубстратах человека и их влияние на здоровье человека недостаточно изучены, но ряд авторов считает, что это направление заслуживает внимания [18]. Биоаккумуляция РЗЭ в волосах детей и взрослого населения, а также в других биосредах показана в работах [18–22].

Изменение форм миграции редких элементов указывает на возможность создания селективного способа извлечения РЗЭ на геохимических барьерах – сорбентах разного типа – с целью очистки вод.

Обратим внимание на формы миграции алюминия: в природной воде преобладает форма $Al(OH)_2F$ (0,111 мг/л при температуре $5^\circ C$), далее, по мере увеличения концентрации хлора до 0,3981 моль и снижения значения pH до 3,34 и концентрации $Al(OH)_2F$ до

$8,52 \cdot 10^{-6}$ мг/л, концентрация Al^{3+} возрастает до $5,68 \cdot 10^{-2}$ мг/л, т. е. Al^{3+} становится преобладающей формой миграции алюминия. Именно это значение

хлора и состав хлорной воды были взяты для исследования системы «речная вода – 0,01 л 10%-го $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}$ – хлорная вода (Cl_2 – 0,3981 моль)».

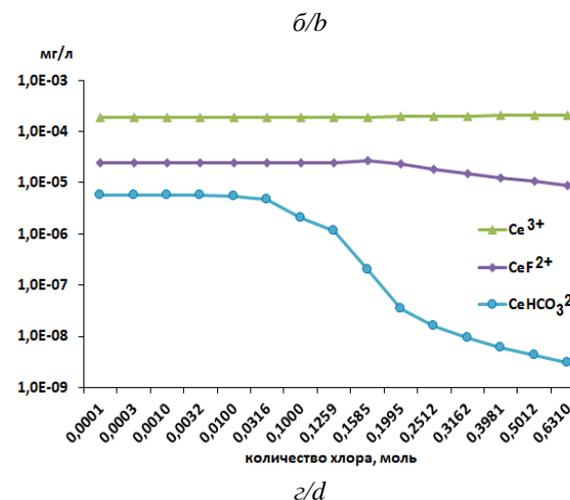
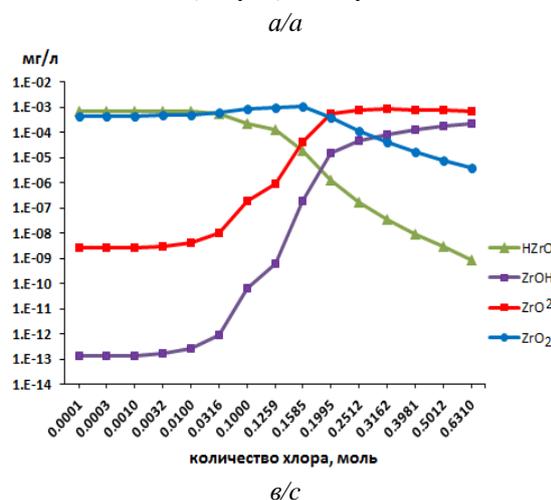
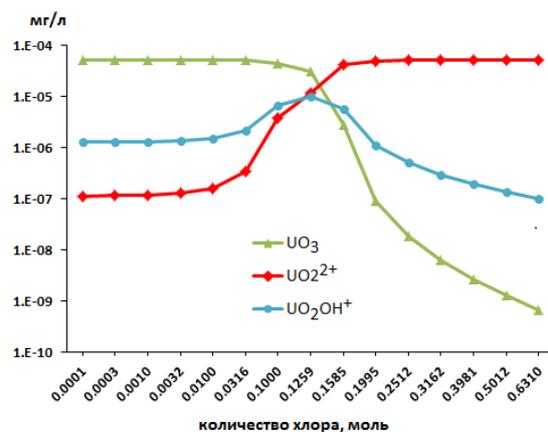
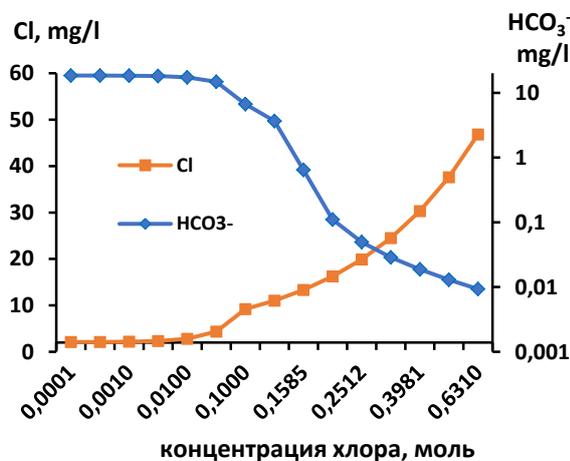


Рис. 3. Изменение концентраций химических элементов (Cl , HCO_3^- (а); U (б); Zr (в); Ce (г)) при добавлении в речную воду (р. Вирма) жидкого хлора ($T=5^\circ C$, $P=1$ бар), мг/л

Fig. 3. Change in concentrations of chemical elements (Cl , HCO_3^- (a); U (b); Zr (c); Ce (d)) when adding liquid chlorine to river water (Virma river) ($T=5^\circ C$, $P=1$ bar), mg/l

Результаты смешения 1000 л речной воды с добавлением 0,01 л 10 %-го раствора коагулянта $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}$ и хлорной воды от 1 до 10000 л представлены на рис. 4.

При смешении более 100 л хлорной воды с речными водами и достижении концентрации хлора более 5 мг/л происходит резкое снижение значения pH, снижение концентрации HCO_3^- и изменение форм миграции всех микроэлементов. Добавление в систему более 1000 л хлорной воды позволяет ряду элементов оставаться в растворенном состоянии (например, Mn и Al), а преобладающей новообразованной фазой остается SiO_2 (рис. 4, б). Состояние системы при смешении 1000 л речной воды с хлорной водой (табл. 4) было зафиксировано добавлением соды для стабилизации значений pH.

В табл. 4 представлены изменения параметров хлорированных речных вод после добавления 5 %-го раствора соды.

Таблица 4. Изменения параметров хлорированных речных вод после добавления 5 %-го раствора соды

Table 4. Changes in the parameters of chlorinated river waters after addition of a 5 % soda solution

5%-й р-р Na_2CO_3 , л 5% Na_2CO_3 solution, l	Eh, В/В	pH	мг/л/mg/l		
			Na^+	Cl^-	HCO_3^-
0	0,997	4,03	2,62	16,5	0,092
1	0,857	6,58	14,0	16,5	23,1
2	0,804	7,54	25,3	16,5	53,0

Физико-химическое моделирование позволяет прогнозировать изменение форм миграции как макро-, так и микрокомпонентов вод и, при необходимости, оптимизировать расход реагентов либо предложить другой тип реагентов. Вместо хлорирования речной воды жидким хлором и дальнейшей ее нейтрализации раствором соды было предложено использовать раствор гипохлорита натрия.

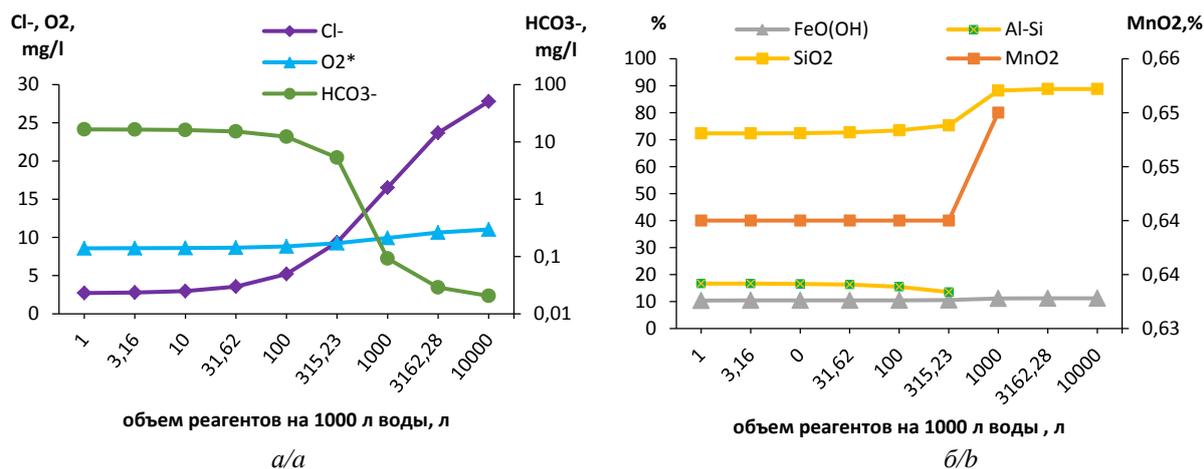


Рис. 4. Изменение концентраций химических элементов Cl^- , O_2 , HCO_3^- (а) и состава новообразованных фаз (б) при смешении речной воды (р. Вирма) с реагентами (Cl_2 , $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}$), Al-Si – алюмосиликаты ($T=5^\circ C$, $P=1$ бар), мг/л; * – нейтральная форма

Fig. 4. Changes of concentrations of chemical elements Cl^- , O_2 , HCO_3^- (a) and composition of newly formed phases (b) when mixing river water (Virma river) with reagents (Cl_2 , $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7}$), Al-Si – aluminosilicates ($T=5^\circ C$, $P=1$ bar), mg/l; * – neutral form

Таблица 5. Сопоставление концентраций некоторых элементов до и после водоподготовки с водами различных категорий, мг/л

Table 5. Comparison of concentrations of some elements before and after water treatment with waters of various categories, mg/l

Элемент Element	Вода природная (р. Вирма) Natural water (Virma river)	Вода питьевая (столовая) Drinking water (dining room)	Полноценность Usefulness [23]	Предельно допустимые концентрации, СанПиН 2.1.4.1116-02 Maximum permissible concentrations, SanPiN 2.1.4.1116-02 [24]	
				1-я категория 1st category	Высшая категория Higher category
Na	1,88	19,87	2–20	200	20
Mg	1,28	1,31	5–65	65	5–50
Al	0,057	0,29	–	0,2	0,1
K	0,31	0,49	2–20	20	2–20
Ca	1,54	3,07	25–130	130	25–80

Анализ результатов моделирования «1000 л исходной воды р. Вирмы – $Al(OH)_{1,3}Cl_{1,7} - NaOCl$ » позволил сделать вывод: добавление $NaOCl$ вместо жидкого хлора не приводит к изменению значений pH, Eh, HCO_3^- , форм миграции макро- и микрокомпонентов. Образование и увеличение концентрации кислорода приводит к окислению элементов и выпадению твердых фаз: $FeO(OH)$, Al-Si (алюмосиликаты), SiO_2 , MnO_2 . Увеличение концентрации кислорода обычно приводит к окислению элементов и выпадению твердых фаз. При содержании $NaOCl$ 0,31623 моль в системе концентрации составляют, мг/л: Cl^- – 13,9, Na – 9,85, HCO_3^- – 16,6 и pH – 6,68, что соответствует природным значениям воды. При добавлении твердой соли $NaOCl$ нет необходимости добавлять соду для

регулирования значений pH, отпадает необходимость в хлораторной, что упрощает процесс водоподготовки, однако не приближает химический состав воды к нормативам, применяемым для бутилированных вод, и не делает ее более полезной по макрокомпонентам (табл. 5).

Заключение

Являясь необычным веществом нашей планеты и обладая уникальными свойствами, вода – главный фактор глобальной эволюции окружающего мира, она оказывает влияние на геосферно-биосферные системы в целом [25]. В данной работе показано, как в результате водоподготовки (хозяйственной деятельности) меняется химический состав воды, состав новообразованных фаз, а значит, и структура воды [25, 26]. В мировом масштабе такие процессы, связанные с изменением химического состава вод, несомненно окажут влияние и на эволюцию окружающего мира.

В связи с тем, что в последнее время расширяются области применения стратегических металлов (REE, Zr, Hf, Nb, Ta) [27], указанный подход можно применять при разработке, обогащении и извлечении редких и РЗЭ как с целью усовершенствования перечисленных процессов, так и для оценки влияния производства на окружающую среду, в том числе на природные воды (поверхностные и подземные).

Физико-химическое моделирование целесообразно применять при изучении и оптимизации процессов водоподготовки, разработки месторождений и обогащения руд. Предложенный подход позволяет существенно повысить экологическую и промышленную безопасность и снизить эксплуатационные затраты в процессах промышленного и хозяйственного обеспечения горнопромышленного региона водой.

Работа выполнена по темам НИР № 1021051803677-1, FMEZ-2022-0010, FMEZ-2022-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Очистка шахтных вод рудника «Северный» АО «Кольская ГМК» методом электрохимической коагуляции / А.В. Светлов, В.Г. Миненко, А.Л. Самусев, Е.М. Салахов // Цветные металлы. – 2019. – № 11. – С. 52–56. URL: <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.11.06>.
2. Disinfection byproduct formation during drinking water treatment and distribution: a review of unintended effects of engineering agents and materials / S. Ding, Y. Deng, T. Bond, C. Fang, Z. Cao, W. Chu // Water Research. – 2019. – V. 160. – P. 313e329. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.024> (дата обращения 15.02.2023).
3. Экологически безопасный метод переработки и утилизации минерализованных оборотных вод хвостохранилищ обогащительных фабрик АК «АЛРОСА» / Г.П. Двойченкова, В.Г. Миненко, А.В. Письменный, И.В. Зырянов, Г.Х. Островская // Горный журнал. – 2011. – № 1. – С. 97–100.
4. Zahedi R., Mirmohammadi S.J. Sulfate removal from chemical industries' wastewater using ettringite precipitation process with recovery of Al(OH)₃ // Applied Water Science. – 2022. – V. 12. – P. 226. URL: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01748-7> (дата обращения 15.02.2023).
5. Технологический комплекс очистки сбросных вод горного производства / В.Н. Заостровцев, И.А. Миняева, М.М. Суханевич, А.В. Горев // Горный журнал. – 2014. – № 3. – С. 68–73.
6. ГОСТ Р 56237-2014 (ИСО 5667-5:2006). Вода питьевая. Отбор проб на станциях водоподготовки и в трубопроводных распределительных системах. Дата введения 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
7. Схема водоснабжения и водоотведения сельского поселения Ловозеро Ловозерского района Мурманской области на 2014–2018 гг. и на период до 2028 г. – Ловозеро: ООО «ЭнергоКонсалт», 2014. – 186 с.
8. Мазухина С.И. Формирование поверхностных и подземных вод Хибинского горного массива. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2012. – 173 с.
9. Качество вод Арктической зоны Российской Федерации: физико-химическое моделирование формирования вод, формы миграции элементов, влияние на организм человека / С.И. Мазухина, В.В. Максимова, К.В. Чудненко, В.А. Маслобоев, С.С. Сандимиров, С.В. Дрогобужская, П.С. Терещенко, В.И. Пожиленко, А.В. Гудков. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – 158 с.
10. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 287 с.
11. Thermodynamic modeling of hypergene processes in loparite ore concentration tailings / S. Mazukhina, E. Krasavtseva, D. Makarov, V. Maksimova // Minerals. – 2021. – V. 11. – № 9. – P. 996. URL: <https://doi.org/10.3390/min11090996> (дата обращения 15.02.2023).
12. Chemical composition of natural waters of the Lovozero massif, Russia / S.S. Sandimirov, V.I. Pozhilenko, S.I. Mazukhina, S.V. Drogobuzhskaya, A.A. Shirokaya, P.S. Tereshchenko // Model. Earth Syst Environ. – 2022. – № 8. – P. 4307–4315. URL: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01362-1> (дата обращения 15.02.2023).
13. О воде. Как правильно использовать коагулянты для очистки воды? URL: <https://o-vode.net/ochistka/koagulyanty> (дата обращения: 30.08.2022).
14. Линник П.Н., Жежеря В.А. Алюминий в поверхностных водах Украины: содержание, формы миграции, особенности распределения среди абиотических компонентов // Водные ресурсы. – 2013. – Т. 40. – № 2. – С. 165–178.
15. Comparison study of five analytical methods for the fractionation and subsequent determination of aluminium in natural water samples / T. Wickström, N. Clarke, K. Derome, J. Derome, E. Røgeberg // J. Environ. Monit. – 2000. – № 2. – P. 171–181. URL: <https://doi.org/10.1039/a909139d> (дата обращения 15.02.2023).
16. The role of fluorine in hydrothermal mobilization and transportation of Fe, U and REE and the formation of IOCG deposits / Y. Xing, B. Etschmann, W. Liu, Y. Mei, Y. Shvarov, D. Testemale, A. Tomkins, J. Brugger // Chemical Geology. – 2019. – V. 504. – P. 158–176.
17. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: Experimental data and thermodynamic calculations / A. Migdisov, A.E. Williams-Jones, J. Brugger, F.A. Caporuscio // Chemical Geology. – 2016. – V. 439. – P. 13–42. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.005> (дата обращения 15.02.2023).
18. Health effects and toxicity mechanisms of rare Earth elements – knowledge gaps and research prospects / G. Pagano, M. Guida, F. Tommasi, R. Oral // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2015. – V. 115. – P. 40–48. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.01.030
19. Investigation of rare Earth elements in urine and drinking water of children in mining area / Q. Liang, H. Yin, J. Li, L. Zhang, R. Hou, S. Wang // Medicine 97. – 2018. – e12717. DOI: 10.1097/MD.00000000000012717.
20. Prenatal exposure of rare Earth elements cerium and ytterbium and neonatal thyroid stimulating hormone levels: findings from a birth cohort study / Y. Liu, M. Wu, L. Zhang, J. Bi, L. Song, L. Wang, B. Liu, A. Zhou, Z. Cao, C. Xiong, S. Yang, Sh. Xu, W. Xia, Y. Li, Y. Wang // Environ. Int. – 2019. – V. 133. – 105222. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105222.
21. Biological monitoring of exposure to rare Earth elements and selected metals in the Inuit population of Nunavik, Canada / C.M. Cirtiu, M. Valcke, M. Gagne, M.H. Bourgault, C. Narame, S. Gadio, P. Poulin, P. Ayotte // Chemosphere. – 2022 – V. 289. – P. 133142. DOI: 10.1016/j.chemosphere. 2021.133142.
22. Rare Earth elements in human and animal health: State of art and research priorities / G. Pagano, F. Aliberti, M. Guida, R. Oral, A. Siciliano, M. Trifuoggi, F. Tommasi // Environ. Res. – 2015. – V. 142. – P. 215–220. DOI: 10.1016/j.envres.2015.06.039
23. О физической полноценности воды. URL: http://ecowater.ru/stat/page/polnozennosti_pityevoi_vodi.htm (дата обращения: 16.12.2021).
24. СанПиН 2.1.4.1116-02. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. URL: <https://ivo.garant.ru> (дата обращения: 12.02.2023).
25. Шварцев С.Л. Вода как главный фактор глобальной эволюции // Вестник Российской Академии наук. – 2013. – Т. 82. – № 2. – С. 124–131. DOI: 10.7868/S0869587313020199.
26. Хорн Р. Морская химия. – М.: Мир, 1972. – 400 с.
27. Гогарко Л.Н. Новый геохимический критерий редкометалло-оруднения высокощелочных магм (Ловозерское месторождение, Кольский полуостров) // ДАН. – 2019. – Т. 487. – № 4. – С. 424–427.

Поступила: 29.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 12.05.2023 г.

Информация об авторах

Мазухина С.И., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Дрогобужская С.В., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Сандимиров С.С., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Маслобоев В.А., доктор технических наук, главный научный сотрудник института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

UDC 536.7:556.5:54-4:628.16(470.21)

FEATURES OF CHANGES IN CHEMICAL COMPOSITION OF DRINKING WATER AS A RESULT OF WATER TREATMENT (LOVOZERO, KOLA PENINSULA)

Svetlana I. Mazukhina¹,
simazukhina@mail.ru

Svetlana V. Drogobuzhskaya²,
s.drogobuzhskaia@ksc.ru

Sergey S. Sandimirov¹,
sand1966@rambler.ru

Vladimir A. Masloboev¹,
v.masloboev@ksc.ru

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»,
14a, Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia

² Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»,
26a, Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia.

The relevance. Waste water and drinking water treatment is an important and relevant environmental problem faced by the industry. The analysis of scientific literature makes it possible to conclude that it is necessary to apply the methods of water purification and disposal or to develop a scheme for each specific water body, taking into account its physico-chemical characteristics and ionic composition. It is believed that the reagents introduced during water treatment do not change its chemical composition. However, lack of an extended chemical analysis casts doubt on water chemical composition immutability.

The main aim of this work is to assess changes in the chemical composition of drinking water supply in Lovozero village (Murmansk region) as a result of water treatment using physico-chemical modeling (PC «Selector»).

Objects of the research are samples of the waters of the Virma river and drinking waters of the central water supply (canteen, column) of Lovozero village, selected in November 2021.

Methods: inductively coupled plasma mass spectrometry (ELAN 9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA), potentiometry (Expert-001, Russia) and titrimetry. Thermodynamic calculations were performed using the method of physico-chemical (thermodynamic) modeling implemented in the software package (PC «Selector»).

Results. With the help of monitoring and physico-chemical modeling (PC «Selector») of natural waters of the Virma river and the waters of the central water supply (Lovozero village, Murmansk region), the influence of reagents used as a result of water treatment on water chemistry is assessed. The paper shows the change in pH, Eh values, water chemical composition, newly formed phases composition, depending on the amount of reagents (coagulant, liquid chlorine, soda and sodium hypochlorite (NaOCl)). The formation of cations and anions of rare-earth elements at different concentrations of liquid chlorine indicates the possibility of creating a selective method of water purification from rare-earth elements on sorbents of different types or using these properties in ore enrichment. The replacement of reagents with NaOCl solid salt simplifies water treatment, but does not bring water chemical composition closer to that of bottled water and does not make it more useful for macro components.

Key words:

Thermodynamic modeling, natural and drinking water, reagents, water treatment, REE, uranium.

The research was carried out in R&D subjects no. 1021051803677-1, FMEZ-2022-0010, FMEZ-2022-0018.

REFERENCES

1. Svetlov A.V., Minenko V.G., Samusev A.L. Purification of mine water using electrochemical coagulation technology at Kola MMC's Severny Mine. *Non-Ferrous Metals*, 2019, no. 11, pp. 52–56. In Rus.
2. Ding S., Deng Y., Bond T., Fang C., Cao Z., Chu W. Disinfection byproduct formation during drinking water treatment and distribution: a review of unintended effects of engineering agents and materials. *Water Research*, 2019, no. 160, pp. 313e329. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.024> (accessed 15 February 2023).
3. Dvoichenkova G.P., Minenko V.G., Pismenny A.V., Zyryanov I.V., Ostrovskaya G.Kh. Environmentally safe method of processing and disposal of mineralized circulating tailings water at the concentration plants operated by ALROSA. *Mining Journal*, 2011, no. 1, pp. 97–100. In Rus.
4. Zahedi R., Mirmohammadi S.J. Sulfate removal from chemical industries' wastewater using ettringite precipitation process with recovery of Al(OH)₃. *Applied Water Science*, 2022, no. 12, pp. 226. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01748-7> (accessed 15 February 2023).
5. Zaoztrovstev V.N., Minaeva I.A., Sukhanevich M.M., Gorev A.V. Treatment process for mining wastewater. *Mining Journal*, 2014, no. 3, pp. 68–73. In Rus.
6. GOST R 56237-2014 (ISO 5667-5:2006). *Voda pit'ejaya. Otkor prob na stantsiyakh vodopodgotovki i v truboprovodnykh raspredelitelnykh sistemakh* [State Standard 56237-2014. Drinking water. Sampling on water treatment stations and in piped distribution systems]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 23 p.
7. *Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya selskogo poseleniya Lovozero Lovozerskogo rayona Murmanskoy oblasti na 2014–2018 gg. i na period do 2028 g.* [Water supply and sewerage

- system in the Lovozero, Lovozero District, Murmansk Region, for 2014–2018 and for the Period up to 2028]. Lovozero, Energo Consult LLC Publ., 2014. 186 p.
8. Mazukhina S.I. *Formirovanie poverkhnostnykh i podzemnykh vod Khibinskogo gornogo massiva* [Formation of surface and underground water of the Khibiny Mountain Range]. Apatity, KSC RAS Publ. House, 2012. 173 p.
 9. Mazukhina S.I., Maksimova V.V., Chudnenko K.V., Masloboev V.A., Sandimirov S.S., Drogobuzhskaya S.V., Tereshchenko P.C., Pozhilenko V.I., Gudkov A.V. *Kachestvo vod Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: fiziko-khimicheskoe modelirovanie formirovaniya vod, formy migratsii elementov, vliyaniye na organizm cheloveka* [Water quality in the Arctic zone of the Russian Federation: physical and chemical modeling of water. Formation, forms of element migration, impact on the human body]. Apatity, KSC RAS Publ. House, 2020. 158 p.
 10. Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geokhimii: teoriya, algoritmy, programnoye obespechenie, prilozheniya* [Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications]. Novosibirsk, Geo Publ., 2010. 287 p.
 11. Mazukhina S., Krasavtseva E., Makarov D., Maksimova V. Thermodynamic modeling of hypogene processes in loparite ore concentration tailings. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 996. Available at: <https://doi.org/10.3390/min11090996> (accessed 15 February 2023).
 12. Sandimirov S.S., Pozhilenko V.I., Mazukhina S.I. Drogobuzhskaya S.V. Shirokaya A.A. Tereshchenko P.S. Chemical composition of natural waters of the Lovozero massif, Russia. *Model. Earth Syst. Environ.*, 2022, no. 8, pp. 4307–4315. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01362-1> (accessed 15 February 2023).
 13. *O vode. Kak pravilno ispol'zovat' koagulyanty dlya ochistki vody?* [About water. How to properly use coagulants for water purification?] Available at: <https://o-vode.net/ochistka/koagulyanty> (accessed: 30 august 2022).
 14. Linnik P.N., Zhezhera V.A. *Alyuminiy v poverkhnostnykh vodakh Ukrainy: sodержanie, formy migratsii, osobennosti raspredeleniya sredi abioticheskikh komponentov* [Aluminum in surface water in Ukraine: content, forms of migration, distribution of abiotic components]. *Water Resour.*, 2013, no. 40, pp. 157–169.
 15. Wickström T., Clarke N., Derome K., Derome J., Røgeberg E. Comparison study of five analytical methods for the fractionation and subsequent determination of aluminium in natural water samples. *J. Environ. Monit.*, 2000, no. 2, pp. 171–181. Available at: <https://doi.org/10.1039/a909139d> (accessed 15 February 2023).
 16. Xing Y., Etschmann B., Liu W., Mei Y., Shvarov Y., Testemale D., Tomkins A., Brugger J. The role of fluorine in hydrothermal mobilization and transportation of Fe, U and REE and the formation of IOCG deposits. *Chemical Geology*, 2019, no. 504, pp. 158–176.
 17. Migdisov A., Williams-Jones A.E., Brugger J., Caporuscio F.A. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: experimental data and thermodynamic calculations. *Chemical Geology*, 2016, no. 439, pp. 13–42. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.06.005> (accessed 15 February 2023).
 18. Pagano G., Guida M., Tommasi F., Oral R. Health effects and toxicity mechanisms of rare Earth elements - knowledge gaps and research prospects. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2015, no. 115, pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.01.030
 19. Liang Q., Yin H., Li J., Zhang L., Hou R., Wang S. Investigation of rare Earth elements in urine and drinking water of children in mining area. *Medicine* 97, 2018, e12717. DOI: 10.1097/MD.00000000000012717
 20. Liu Y., Wu M., Zhang L., Bi J., Song L., Wang L., Liu B., Zhou A., Cao Z., Xiong C., Yang S., Xu Sh., Xia W., Li Y., Wang Y. Prenatal exposure of rare Earth elements cerium and ytterbium and neonatal thyroid stimulating hormone levels: findings from a birth cohort study. *Environ. Int.*, 2019, no. 133, p. 105222. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105222
 21. Cirtiu C.M., Valcke M., Gagne M., Bourgault M.H., Naramé C., Gadio S., Poulin P., Ayotte P. Biological monitoring of exposure to rare Earth elements and selected metals in the Inuit population of Nunavik, Canada. *Chemosphere*, 2022, no. 289, p. 133142. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133142.
 22. Pagano G., Aliberti F., Guida M., Oral R., Siciliano A., Trifuoggi M., Tommasi F. Rare Earth elements in human and animal health: State of art and research priorities. *Environ. Res.*, 2015, no. 142, pp. 215–220. DOI: 10.1016/j.envres.2015.06.039
 23. *fizicheskoy polnotsennosti vody* [About the physical usefulness of water]. URL: http://ecowater.su/stat/page/polnozennosti_pityevoi_vodi.htm (accessed: 16 December 2021).
 24. SanPiN 2.1.4.1116-02. *Pitevaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody, rasfasovannoy v emkosti* [Potable water. Public health requirements for the quality of water packaged in containers. Quality control]. Available at: <https://ivo.garant.ru> (accessed: 12 February 2023).
 25. Shvartsev S.L. Voda kak glavny faktor globalnoy evolyutsii [Water as the main factor of global evolution]. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2013, vol. 83, pp. 78–85.
 26. Khorn R. *Morskaya khimiya* [Marine chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1972. 400 p.
 27. Kogarko L.N. A new geochemical criterion for rare-metal mineralization of high-alkalic magmas (Lovozero deposit, Kola Peninsula). *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 487, no. 2, pp. 922–924.

Received: 29 March 2023.

Reviewed: 12 May 2023.

Information about the authors

Svetlana I. Mazukhina, Dr. Sc., leading researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems.

Svetlana V. Drogobuzhskaya, Cand. Sc., associate professor, senior researcher, Tananaev Institute of Chemistry.

Sergey S. Sandimirov, Cand. Sc., senior researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems.

Vladimir A. Masloboev, Dr. Sc., professor, chief scientific officer, Institute of North Industrial Ecology Problems.