

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ВОД В ХРАНИЛИЩАХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

**Т. Н. Кравчук,**

аспирант БелГУ, 308015 г. Белгород, ул. Победы, 85,

**С. В. Сергеев,**

зав. кафедрой, БелГУ, профессор, [Sergeev@dsu.edu.ru](mailto:Sergeev@dsu.edu.ru)

**А. Н. Петин**

декан геолого-географического факультета БелГУ, профессор, [Petin@bsu.edu.ru](mailto:Petin@bsu.edu.ru)

Проведен анализ качества поверхностных вод хвостохранилищ на примере Лебединского и Стойленского железорудных предприятий Курской магнитной аномалии. Поставлены и решены задачи прогноза изменения качества поверхностных вод в хвостохранилище. Отмечается, что разработанная методика может иметь практическое применение на горнодобывающих предприятиях для решения проблем защиты и рационального использования водных ресурсов.

It is realized the analysis of surface waters quality in the technical reservoirs on an example of the Lebedinsky and Stoylensky iron ore enterprises of Kursk Magnetic Anomaly. It is formulated and solved the problems of prognosis the changes of technical reservoirs surface waters quality. It is stated that the work out method will have practical application in the mining enterprises for solving the problems of protecting and rational usage of water resources.

**Ключевые слова:** хвостохранилище, качество поверхностных вод, Курская магнитная аномалия.

**Keywords:** surface waters quality, technical reservoirs, Kursk magnetic anomaly.

Одним из основных источников загрязнения подземных вод в зоне влияния объектов Лебединского и Стойленского горнообогатительных комбинатов (ЛГОКа и СГОКа) является инфильтрация технических вод из хранилищ отходов обогащения железных руд в водоносные горизонты.

Качественный состав вод хвостохранилищ СГОКа и ЛГОКа формируется за счет смешения различных категорий вод: технологической воды, поступающей с хвостами и гидровскрышей, свежей воды, подаваемой для подпитки оборотных систем, атмосферных осадков.

Качественный состав поверхностных вод хвостохранилища ЛГОКа за 2007 г. приводится в табл. 1 [1].

Для вод хвостохранилища ЛГОКа характерно постоянное превышение ПДК по содержанию нефтепродуктов, эпизодическое превышение ПДК по содержанию железа общего, нитрата аммония, марганца, бора.

В водах хвостохранилища обнаружены следующие микрокомпоненты: стронций, титан, теллур, селен, бериллий, эпизодически кадмий, хром, ванадий и никель, концентрация которых в воде существенно ниже ПДК [2].

Качественный состав поверхностных вод хвостохранилища СГОКа на 24.07.2007 г. приводится в табл. 2 [2].

В водах хвостохранилища СГОКа наблюдается эпизодическое превышение ПДК по содержанию железа общего и нефтепродуктов.

Из микрокомпонентов в водах хвостохранилища обнаружены фтор, титан, хром, никель, кобальт, кадмий, свинец, цинк, ванадий, олово, стронций, содержание которых не превышает ПДК [2].

Представляет интерес разработка методики прогнозирования изменения качественного состава вод хвостохранилища в процессе складирования отходов обогащения. Будем считать, что их состав будет формироваться за счет процессов смешения вод различного состава (химическими реакциями в первом приближении пренебрегаем).

**Таблица 1**  
**Химический состав поверхностных вод хвостохранилища ЛГОКа**

Содержание компонентов за 2007 г. от — до, мг/л	Отсек			ПДК (по СанПин 2.1.4.1074-01)
	Балка Орлиный Лог	Отсек 4 Балка Могильная Лощина	Отсек 7 Балка Безымянная	
Сухой остаток	321,5—702	518,8—653	565—663,8	1000
Fe <sub>общ</sub>	0,27—0,58	0,2—0,24	0,18—0,25	0,3
Нефтепродукты	0,33—0,4	0,36—0,41	0,37—0,44	0,1
pH	8,35—8,4	8,1—8,3	8,15—8,31	6-9
Взвеш. вещества	17,6—32,5	<2—39	3,2—5,75	
HCO <sub>3</sub>	170,9—244,8	207,5—268,5	194,7—250,2	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,6—0,56	0,26—0,29	0,27—0,52	2
NO <sub>2</sub>	0,182—1	0,2—0,56	0,4—0,5	3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,2—38	29,3—40,5	9,9—12,8	45
Cl <sup>-</sup>	31,6—43,9	31,59—36,9	22,8—35,1	350
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	93—227,7	121,4—205,7	136,3—182,5	500
Cu	<0,002	<0,002	<0,002	1
Mn	<0,05—0,19	<0,05—0,09	0,06—0,11	0,1
Растворимый O <sub>2</sub>	9,06—14,2			
XПК	13,3—29	16,5—22	15,6—26	
БПК-5	4,8—6,7	5,12—9,24	4,8—6,72	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	<0,05	0,012—0,15	<0,05	3,5
Mg	1,14—2,72	1,55—3	0,96—2,35	
Ca	3,05—4,36	2,1—4,24	2,22—2,35	
Zn	<0,005			5
B	1,14	0,069—0,073	0,056—0,059	0,5
Mo	<0,01	<0,01		0,25
Si		6,6—6,9	4,5—5,5	10
СПАВ		<0,015	<0,015—0,012	0,5

В хвостохранилище в некоторый начальный момент времени содержится объем воды  $v_0$  с концентрацией прослеживаемого  $i$ -го компонента  $C_0$ . В хвостохранилище поступает: содержащая воду пульпа с расходом воды  $Q_x$  и содержанием компонента  $C_x$ , «свежая вода» для подпитки расходом  $Q_n$  и концентрацией  $C_n$ , а также может накапливаться дождевая вода со среднегодовым часовым расходом  $Q_{oc}$ , в которой может содержаться прослеживаемый компонент в концентрации  $C_{oc}$ .

Из хвостохранилища, в котором формируется некоторая переменная во времени концентрация прослеживаемого компонента  $C$ , уходит: вода с оборотным водоснабжением с расходом  $Q_{об}$ , вода на фильтрационные потери с расходом  $Q_{ф}$  и вода на испарение с водной поверхности со среднегодовым часовым расходом  $Q_u$ .

Уравнение водного баланса в хвостохранилище может быть записано в

**Таблица 2**  
**Химический состав поверхностных вод хвостохранилища СГОКа**

Содержание компонентов на 24.07.07, мг/л	Отсек		ПДК (по СанПин 2.1.4.1074 01)
	Уплотнения защиты отвалов	Центральный	
Сухой остаток	490	484	1000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	120,9	112,1	500
Cl		37,2	350
NO <sub>2</sub>	0,05	0,22	3
NO <sub>3</sub>	4,2	6,69	45
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		0,54	2
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,09	0,08	3,5
Нефтепродукты	0,14	0,1	0,1
Взвеш. вещества	7,9	10,1	
Fe <sub>общ</sub>	0,1	0,34	0,3
XПК	14,7	17,6	
БПК-5	5,8	7,6	
Растворимый O <sub>2</sub>	6,6	11,7	
СПАВ	<0,014	0,016	0,5
pH	6,8	7,5	6—9

виде: приходная часть:  $Q_x + Q_n + Q_{oc}$ ,  
расходная часть:  $Q_{об} + Q_{ф} + Q_u$ , т. е.  
 $Q_x + Q_n + Q_{oc} - Q_{об} - Q_{ф} - Q_u = 0$ . (1)

Расход вещества определяется как произведение расхода воды на концентрацию растворенного компонента, т. е.

$$G = Q \times C. \quad (2)$$

Составим уравнение материального баланса массы прослеживаемого компонента в хвостохранилище за время  $\Delta t$ :

приходная часть:

$$(Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc}) \times \Delta t,$$

расходная часть:

$$(Q_{об} \times C + Q_{ф} \times C_n) \times \Delta t.$$

Изменение массы вещества в водоеме (хвостохранилище):  $v_0 \times \Delta C$ .

Перейдя от приращений  $\Delta C$  и  $\Delta t$  к дифференциальным, получим исходное дифференциальное уравнение материального баланса в хвостохранилище:

$$Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} = \\ = C \times (Q_{об} + Q_{ф}) + v_0 \times \frac{dC}{dt}. \quad (3)$$

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения 1-го порядка (3) имеет вид:

$$-\frac{v_0}{Q_{об} + Q_{ф}} \times \\ \times \ln \left[ \frac{Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} - (Q_{об} + Q_{ф}) \times C}{v_0} \right] = \\ = t + A, \quad (4)$$

где  $A$  — постоянная интегрирования.

Для нахождения  $A$  воспользуемся начальным условием: при  $t = 0$ ,  $C = C_0$ , тогда из (4):

$$A = -\frac{v_0}{Q_{об} + Q_{ф}} \times \\ \times \ln \left[ \frac{Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} - (Q_{об} + Q_{ф}) \times C_0}{v_0} \right]. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) после очевидных преобразований получим искомое решение задачи в виде:

$$\frac{C_{\Sigma} - C}{C_{\Sigma} - C_0} = e^{-\left(\frac{Q_{об} + Q_{ф}}{v_0}\right) \times t}, \quad (6)$$

откуда

$$C = C_{\Sigma} - (C_{\Sigma} - C_0) \times e^{-\left(\frac{Q_{об} + Q_{ф}}{v_0}\right) \times t},$$

где  $C_{\Sigma}$  — концентрация смешения вод с различным содержанием прослеживаемого компонента.

$$C_{\Sigma} = \frac{Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc}}{Q_{об} + Q_{ф}}. \quad (7)$$

График функции (6) имеет вид (рисунок):

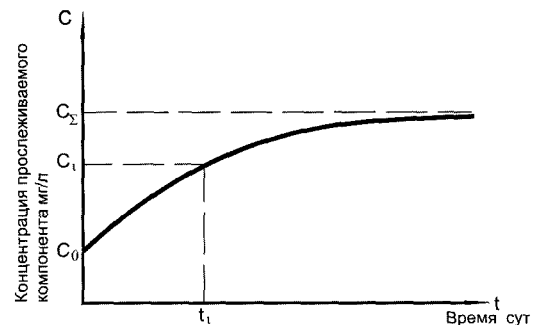


Рис. Изменение концентрации прослеживаемого компонента во времени

Полученные зависимости могут в основном использоваться для прогнозирования изменения состава вод на начальной стадии эксплуатации хвостохранилищ или в периоды, когда по технологическим причинам (например, изменение технологии обогащения) происходит изменение состава сбрасываемых вод.

Рассмотрим методику прогноза изменения качества поверхностных вод в прудке оборотного водоснабжения хвостохранилища с учетом химических реакций. В этом случае уравнение водного баланса аналогично уравнению (1), а дифференциальное уравнение материального баланса примет вид:

$$Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} = \\ = C \times (Q_{об} + Q_{ф}) - G_{хим} + v_0 \times \frac{dC}{dt}, \quad (8)$$

где  $G_{хим}$  — изменение массового расхода компонента за счет химических взаимодействий в прудке оборотного водоснабжения.

В уравнении (8) левая часть — приходная, а правая — расходная.

Рассмотрим различные модели химических взаимодействий.

1. Необратимый распад (например, сорбция на взвешенных частицах, радиоактивный распад и т. п.):

$$G_{\text{хим}} = -v_0 \times \alpha_1 \times C, \quad (9)$$

где  $\alpha_1$  — кинетический коэффициент, 1/сут.

Уравнение (8) примет вид:

$$\begin{aligned} Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} - \\ - C \times (Q_{об} + Q_{ф}) - v_0 \times \alpha_1 \times C = \\ = v_0 \times \frac{dC}{dt}. \end{aligned} \quad (10)$$

Решение уравнения (10) при начальном условии  $C = C_0$ , при  $t = 0$  имеет вид:

$$\begin{aligned} C = C_{\Sigma_1} - (C_{\Sigma_1} - C_0) \times \\ \times e^{-\left(\alpha_1 + \frac{Q_{об} + Q_{ф}}{v_0}\right) \times t}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } C_{\Sigma_1} = \frac{Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc}}{Q_{об} + Q_{ф} + \alpha_1 \times v_0}.$$

2. Привнос (растворение) в воду компонента:

$$G_{\text{хим}} = v_0 \times \alpha_2 \times C, \quad (12)$$

где  $\alpha_2$  — кинетический коэффициент, 1/сут.

Уравнение (8) примет вид:

$$\begin{aligned} Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} - \\ - C \times (Q_{об} + Q_{ф}) + v_0 \times \alpha_2 \times C = \\ = v_0 \times \frac{dC}{dt}. \end{aligned} \quad (13)$$

Решение уравнения (13) при начальном условии  $C = C_0$ , при  $t = 0$  имеет вид:

$$\begin{aligned} C = C_{\Sigma_2} - (C_{\Sigma_2} - C_0) \times \\ \times e^{-\left(\frac{Q_{об} + Q_{ф}}{v_0} - \alpha_2\right) \times t}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } C_{\Sigma_2} = \frac{Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc}}{Q_{об} + Q_{ф} - \alpha_2 \times v_0}.$$

3. Обратимые взаимодействия, выводящие компонент из раствора, сорб-

ция и т. п., имеющие равновесное состояние:

$$G_{\text{хим}} = -v_0 \times \alpha_3 \times (C - C_p), \quad (15)$$

где  $\alpha_3$  — кинетический коэффициент, 1/сут;  $C_p$  — концентрация равновесия (реакция идет, когда  $C > C_p$  или  $C < C_p$ ).

Уравнение (8) примет вид:

$$\begin{aligned} Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} - \\ - C \times (Q_{об} + Q_{ф}) + C_p \times v_0 \times \alpha_3 - \\ - v_0 \times \alpha_3 \times C = v_0 \times \frac{dC}{dt}. \end{aligned} \quad (16)$$

Решение уравнения (16) примет вид:

$$\begin{aligned} C = C_{\Sigma_3} - (C_{\Sigma_3} - C_0) \times \\ \times e^{-\left(\frac{Q_{об} + Q_{ф}}{v_0} + \alpha_3\right) \times t}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $C_{\Sigma_3} =$

$$= \frac{Q_x \times C_x + Q_n \times C_n + Q_{oc} \times C_{oc} + C_p \times v_0 \times \alpha_3}{Q_{об} + Q_{ф} + \alpha_3 \times v_0}.$$

**Выводы.** Хранилища отходов обогащения железных руд Лебединского и Стойленского горнообогатительных комбинатов являются одним из основных источников загрязнения (влияния) на химический и качественный состав подземных вод. Основными загрязняющими компонентами в водах хвостохранилищ ЛГОКа и СГОКа являются нефтепродукты, железо общее и соединения азота. Разработанная методика прогнозирования изменения качественного состава поверхностных вод хвостохранилищ в процессе складирования отходов обогащения железных руд может иметь практическое применение на горнодобывающих предприятиях для решения проблем защиты и рационального использования водных ресурсов.

*Работа выполнена при поддержке Госконтракта № П536 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—21013 год»*

### Библиографический список

1. Отчет по специализированным гидрогеологическим и инженерно-геологическим наблюдениям, проведенным на Лебединском горно-обогатительном комбинате в 2007 году. ОАО «Лебединский горно-обогатительный комбинат». — Губкин, 2008. — 80 с.
2. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод водозабора «Котельная СГОКа». Отчет ООО НТЦ «НОВОТЭК». — Белгород, 2008. — С. 79—80.