

Р. Ф. Абдрахманов, Р. М. Ахметов

ГЕОХИМИЯ ПОРОД И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СЕМЕНОВСКОЙ ЗИФ

Семеновская золото-извлекательная фабрика (СЗИФ), являлась предприятием ГПП «Башзолото». На первом этапе деятельности (начиная с 1908 г.) на СЗИФ для целей извлечения самородного золота тонких фракций из эфелей фабрики Тубинского рудника применялась технология амальгамации. С 1943 г. предприятие работало в сезонном режиме с использованием технологии цианирования золотосодержащих руд. В 1996 г. фабрика прекратила свою деятельность. В связи с обнаружением Уфимским научно-исследовательским институтом медицины труда и экологии человека (УНИИМТиЭЧ) в 1996 г. в крови жителей пос. Семеновский ртути (от 0,00085 до 0,12975 мг/л) и в питьевой воде ее до 59 ПДК вышел Указ Президента РБ № УП 287 от 27 апреля 1996 г. и Распоряжение КМ РБ № 598-р от 15 мая 1996 г. «О мерах по нормализации водоснабжения поселка Семеновский Баймакского района». На основе этих решений Институтом проблем прикладной экологии и природопользования (ИППЭП) в 1996–2000 гг. были проведены научно-исследовательские работы «Исследование источников загрязнения и степени их воздействия на окружающую среду в местах размещения горнорудных предприятий Баймакского района» [Абдрахманов и др., 2000 г.].

В 2012 г. проведены новые изыскательские работы для составления проекта по рекультивации хвостохранилищ на основе «Распоряжения Прави-

тельства РБ № 789-р от 29 июня 2011 г. «Ликвидация экологического ущерба от хозяйственной деятельности СЗИФ». Нами [Абдрахманов, Ахметов, 2013 г.] для реализации проекта выполнены геоэкологические исследования территории СЗИФ.

Геохимия пород и техногенных грунтов. Переработка золотосодержащих руд на предприятии осуществлялась по технологии цианистого илового процесса, основанной на растворении золота и серебра в цианистых растворах с последующим осаждением благородных металлов на цинковой стружке. СЗИФ перерабатывала по указанной технологии золотосодержащие руды месторождений Южного Урала (Горная Байкара, Санкым, Балта-Тау, Красноуральское, Гайское и др.). Содержания тяжелых металлов в рудах, переработанных на СЗИФ, приведены в таблице 1.

В конце технологической цепочки образовывались отходы — хвосты обогащения руд, содержащие тяжелые металлы (которые сбрасывались в хвостохранилища) и сточные воды. На переработку 1 т руды расходовалось 3,5 м³ воды, суточный расход составлял 1000–1200 м³. Осветленные технологические растворы сбрасывались в водохранилище. Применяемая на СЗИФ технология илового цианирования предусматривала использование больших объемов различных реагентов: извести, цианида натрия, металлического цинка, серной и соляной кислот, свинцовых солей, полиакриламида (табл. 2).

Таблица 1

Содержания тяжелых металлов в золотосодержащих рудах месторождений, переработанных на СЗИФ

Компоненты	Содержание, г/т				
	Санкымское	Отходы Тубинской ЗИФ	Красноуральское	Восточно-Семеновское	Гайское
Cu	500–800	2200–2400	1800–2500	н.а.	600
Zn	600	1200	600	210	500
Cd	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	1,0
Fe	47200–61400	299700	353600	н.а.	291000
Pb	400–800	650–950	120–200	93	675
As	440–970	2200–2700	550–850	н.а.	н.а.
Se	25–28	15–83	320–590	н.а.	169
Te	32–35	43–56	40–72	н.а.	55
Bi	35	15–41	н.а.	н.а.	н.а.
Hg	н.а.	н.а.	н.а.	0,11	52

Примечания: н.а. — не анализировалось, н.о. — не обнаружено.

Таблица 2

Расход реагентов (кг) на Семеновской ЗИФ с 1991 по 1995 гг.

Реагент	1991 г.	1992 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.
Известь	744097	721969	445088	428380	239000
Цианид	109087	107725	112509	70191	82633
Цинк	35377	35207	38166	36496	18161
Серная кислота	48016	48502	48688	41892	27741
Соляная кислота	10873	10821	9594	7490	3939
Свинцовые соли	1150	1240	1063	590	н.д.
Полиакриламид	1601	1798	1735	1138	5365

Примечание: н.д. — нет данных.

Как видно из таблицы 2, расход каждого из этих реагентов только за пять лет составил: цианида натрия — 482,15 т, серной кислоты — 214,8 т, соляной кислоты — 42,7 т, полиакриламида — 11,6 т, извести — 2578,5 т, свинцовых солей — 4,1 т. Данных по объемам переработанной руды за весь период работы предприятия не имеется. За 1965–1996 гг. фабрика переработала 2118679 т руды. Расчеты показывают, что суммарный расход каждого реагента, являющегося загрязнителем окружающей среды и накапливающегося в хвостах, за 30 лет составил: цианида натрия — 2669,5 т, серной кислоты — 2097,5 т, соляной кислоты — 233,1 т, цинка металлического — 1122,9 т, полиакриламида — 40,3 т, извести — 17097,74 т, свинцовых солей — 36,02 т.

В результате производственного процесса тяжелые металлы, содержащиеся в минеральном сырье, поступали по технологической цепочке «руда — фабрика — отходы» в хвостохранилище и производственные стоки. Например, содержание тяжелых металлов в рудах Гайского месторождения составляло (мг/кг): ртути — 52, селена — 677, мышьяка — 2000, сурьмы — 260, свинца — 675, меди — 375, цинка — 158, таллия — 15,5. За 1995 г. в составе 9063 т золотоносной руды на фабрику поступило 38432,6 кг токсичных элементов, в том числе (кг): ртути — 471,3, селена — 6135, таллия — 140,5, мышьяка — 2076, сурьмы — 2365,4.

За 53 года работы на хвостохранилищах предприятия в виде отходов производства накоплено 2638,8 тыс. т хвостов, характеризующихся высокими концентрациями тяжелых металлов, в том числе и ртути. Хвосты обогащения представляют собой песчано-илистый материал крупностью не более 1 мм. Минеральный состав хвостов обогащения представлен кварцем до 50–60%, полевыми шпатами до 20–25%, глинистыми минералами до 5–10%, оксидами железа (гетит, гидрогетит, лимонит, гематит) до 13–19%, сульфидами (пирит, халькопирит, ковеллин, халькозин, сфалерит, галенит, арсенопирит) до 1–2%. В 1996–2000 гг. было проведено

обследование материала хвостохранилищ [Абдрахманов и др., 2000 г.]. В старом хвостохранилище СЗИФ было отобрано 15 проб в 5 точках на трех глубинах: 0–20 см, 80–100 см и 160–180 см. В новом хвостохранилище СЗИФ — в 3 точках на двух глубинах (6 проб). Отобранные образцы (21 шт.) анализировались на валовое содержание ртути, меди, никеля, цинка, хрома, кадмия, свинца, кобальта, марганца и серебра. Для того чтобы установить, какую опасность для грунтовых вод представляет содержимое хвостохранилищ, образцы использовались для получения водных вытяжек, исследованных затем на содержание вышеуказанных тяжелых металлов, включая ртуть. В отходах были обнаружены (мг/кг): *Cu* 256,5–889,6, *Zn* 225,5–637,5, *Pb* 344,8–3364,3, *Cd* 0,4–5,2, *As* 220–3700, *Sb* 57–330, *Se* 24–150, *Mn* 15,4–262,3, *Co* 1,3–7,2, *Ni* 1,9–68,1, *Pt* 2,6–6,3. Содержание ртути варьировало во всех пробах в диапазоне 8,8–42,3 мг/кг. Их средний химический состав приведен в таблице 3.

Таблица 3

Химический состав хвостов обогащения Семеновской ЗИФ

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
SiO₂	61,51	MnO	0,09
Al₂O₃	5,90	S_{общ}	2,20
Fe₂O₃	17,01	Cu	0,08
FeO	0,95	Zn	0,08
CaO	1,09	Pb	0,1
MgO	0,52	As	0,08
TiO₂	0,39	Sb	0,009
K₂O	0,79	Se	0,005
Na₂O	0,42	Hg	0,002
P₂O₅	0,13	Pt	0,0002

В материале хвостохранилищ было аккумуляровано (тонн): ртути — 58,8, селена — 130,46, мышьяка — 2076, сурьмы — 234,8, меди — 1541,6,

цинка — 1393,3, свинца — 2111. Отходы производства СЗИФ в виде пульпы направлялись в 2 хвостохранилища (старое и новое). Старое хвостохранилище площадью 23 га находится вблизи фабрики и эксплуатировалось с 1943 г., высота дамбы 5 м. В 1973–1981 гг. провели наращивание дамбы до емкости 320 тыс. м³ с намерением продлить срок эксплуатации до 8 лет. Новое хвостохранилище расположено в 300 м к западу от поселка и по отметкам ниже его на 40 м. Дамба возводилась из глинистого материала, ее высота 12 м. Глубина

пруда-отстойника 0,5 м. Сухая площадь хвостохранилища 0,048 км², площадь пруда — 0,02 км².

К северу и востоку от старого хвостохранилища находится водохранилище, в которое сбрасывались осветленные технологические растворы и накапливаются весенние паводковые воды (рис. 1). Фабрика работала на замкнутом цикле водоснабжения. Площадь водохранилища составляет 142,5 тыс. м², объем воды — 60–100 тыс. м³.

Таким образом, предприятие не только перерабатывало минеральное сырье, содержащее в значи-

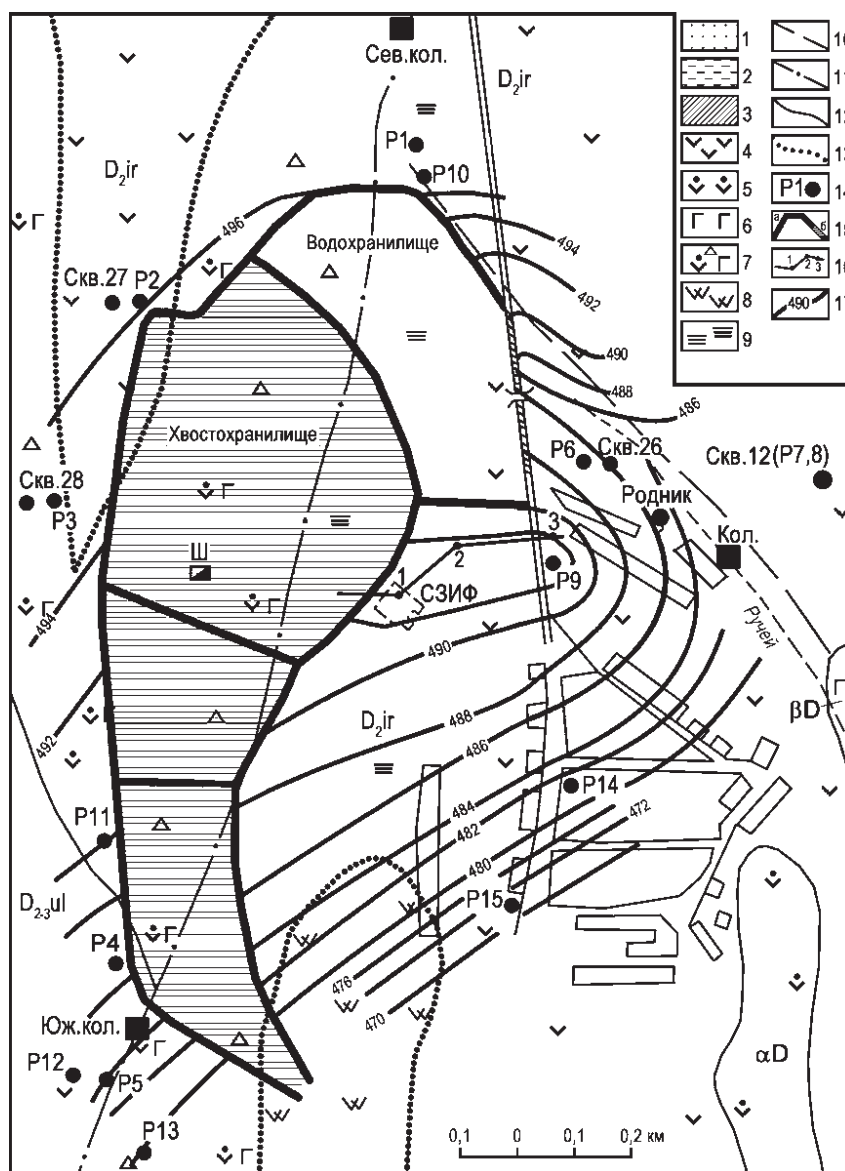


Рис. 1. Гидрогеологическая карта района Семеновской ЗИФ

Условные обозначения: 1–2 — техногенные отложения; 3 — делювий (кора выветривания?); 4 — порфиры андезитовые; 5 — порфиры миндалекаменные андезитовые; 6 — порфиры базальтовые; 7 — лавобрекчии порфиритов; 8 — порфиры дацитовые; 9 — сланцы серицит-хлорит-кварцевые; 10–11 — тектонические нарушения: 10 — без сдвига, 11 — со сдвигом; 12 — стратиграфические границы; 13 — литологические границы; 14 — режимные скважины; 15 — дамба: а — за пределами дороги, б — дамба-дорога; 16 — гидрогеологический разрез Ш-1-4-3; 17 — гидроизогипсы. Возраст пород: D₂ir — девон средний (ирендыкская свита); D₂₋₃ul — девон средний — верхний (улутауская свита)

тельных количествах токсиканты, но и использовало токсичные вещества в технологическом процессе. По завершении процесса цианирования все эти загрязнители природной среды аккумулировались в отходах и сточных водах СЗИФ.

Район исследований находится в западной части Магнитогорской мегазоны. В металлогеническом отношении Магнитогорская мегазона представляет собой основную часть южноуральского колчеданоносного пояса, в котором профилирующее развитие получило оруденение колчеданного типа.

Геологический субстрат в регионе сложен в основном вулканогенными, вулканогенно-осадочными и осадочными породами силура, девона и карбона, прорванными интрузиями различного состава. Семеновская ЗИФ находится в пределах Восточно-Баймакской структурно-формационной подзоны Таналькской зоны Ирэндьковского антиклинория. В геологическом строении территории принимают участие (рис. 1, 2):

- ирэндьковская свита среднего девона (D_{2ef}) — порфириды плагиоклазовые базальтового и андезит-базальтового состава, туфы разнообломочные, преимущественно андезит-дацитового состава,

- улугауская свита среднего — верхнего девона ($D_{2-3}\dot{z}v-f_1$) — туффиты кремнистые, туфопесчаники, туфоалевролиты.

В южной части территории породы прорваны девонскими интрузивными и субвулканическими образованиями в составе которых преобладают

порфириды андезитовые (αD) и порфириды диабазовые (βD). На отдельных участках коренные породы подверглись метасоматозу с образованием хлорит-серицит-кварцевых сланцев [Чекунов, Заварова, 2003 г.].

Породы девона перекрыты отложениями коры выветривания неоген-четвертичного возраста и разновозрастными рыхлыми делювиальными, пролювиальными и техногенными отложениями: суглинками, глинами, супесями, щебенисто-галечными образованиями мощностью от 10–15 до 40–60 м.

Как уже было отмечено, в хвостах высокие содержания токсичных элементов: ртути, свинца, кадмия, селена, теллура, мышьяка, сурьмы и т. д. Наиболее выраженным и опасным было ртутное загрязнение грунтов и подземной гидросферы. Причиной загрязнения грунтовых вод являлась фильтрация сточных вод через тело, ложе и обваловку хвостохранилища, просачивание воды из водохранилища, поверхностный сток с прилегающей загрязненной территории.

В ходе исследований 2012–2013 гг. были отобраны пробы хвостов обогащения и грунтов с прилегающей к СЗИФ территории (табл. 3, 4) на химический анализ. Обнаружены следующие концентрации элементов в грунтах (в скобках среднее, мг/кг): *Fe* 393,6–48369,5 (17657,53), *Cu* 1,55–269021 (4687,43), *Zn* 28,05–11696,28 (420,90), *Mn* 9,46–10805,4 (550,51), *Pb* 1,6–4567,7 (363,77), *As* 0,01–322 (49,58), *Cd* 0,01–5,95 (0,97), *Ni* 0,27–221,1 (25,17), *Co* 0,33–176,5 (6,88), *Ba* 9,19–1602,09 (330,42),

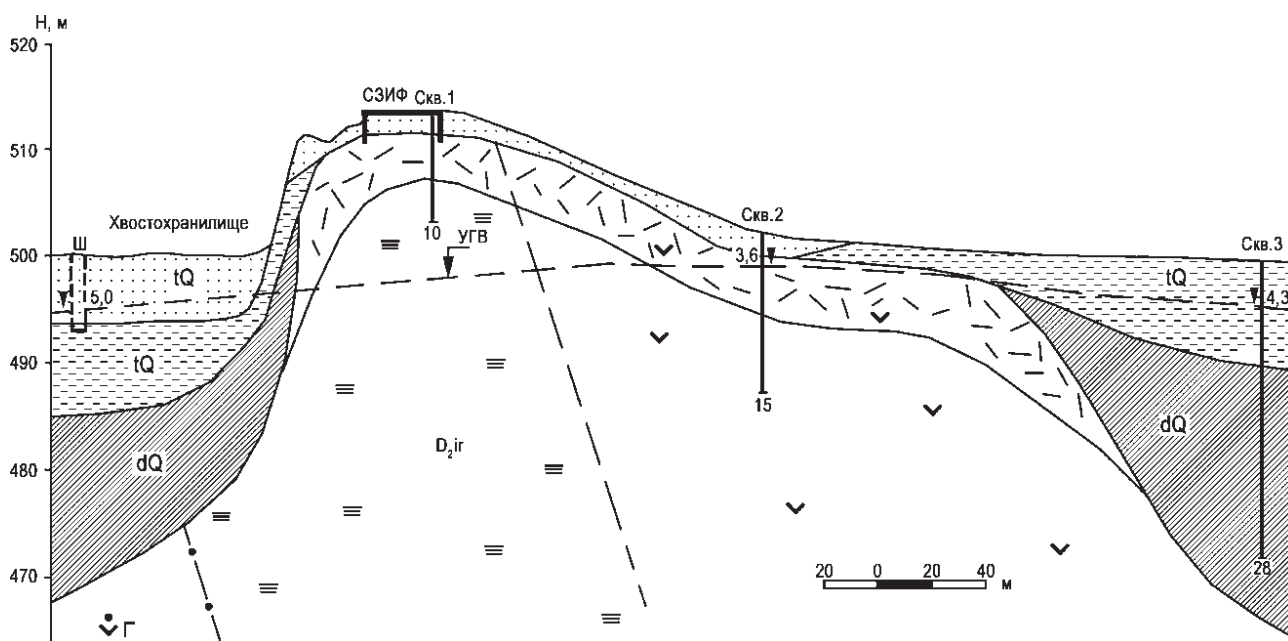


Рис. 2. Гидрогеологический разрез по линии Ш-1-2-3 [Чекунов, Заварова, 2003 г.]
Условные обозначения см. рис. 1

Cr 0,75–231,421 (17,55), *Sn* 0,05–36,92 (11,24), *Mo* 0,01–15,61 (2,01). Из данных анализа проб видно, что в них достаточно высокое содержание *Fe* (до 48369,5 мг/кг), *Cu* (до 269000 мг/кг), *Zn* (до 11696,3 мг/кг), *Pb* (до 4568 мг/кг), *Mn* (11000 мг/кг). Максимальное содержание *Cu* превышает ПДК (ОДК) для почв в 89674 раза, *Zn* в 508 раз, *Pb* в 143 раза, *As* в 161 раз, *Ni* в 55 раз. Пробы отбирались в интервале глубин от 0 до 10 м. Наиболее высокие концентрации *Cu* отмечены в пределах нового хвостохранилища на глубине 1,0 м. Содержания *Pb*, *Cd*, *As* и *Mo* достигают максимальных значений в северной части нового хвостохранилища в непосредственной близости от дамбы, граничащей со старым хвостохранилищем. Повышенные концентрации *Fe*, *Ba* и $Cr_{\text{общ}}$ обнаружены на юго-востоке старого хвостохранилища, в зоне примыкающей к пром. площадке фабрики. Наибольшей подвижностью обладают *Pb*, *Zn*, *Cd*, *Mn*, *Sn*, иногда *Cu* (табл. 4).

Четкой закономерности в распределении меди, цинка, кобальта и кадмия по глубинам в старом хвостохранилище не наблюдается; прослеживается лишь тенденция к увеличению (свинец, хром, никель, марганец) или снижению (серебро) концентрации по мере углубления. Наиболее обогащенным тяжелыми металлами в старом хвостохранилище оказался горизонт 80–100 см. В новом хвостохранилище изменение концентрации тяжелых металлов в зависимости от глубины выражено еще слабее. Содержание ртути в поверхностном слое в среднем было выше, чем на глубине 80–100 см. Можно отметить более высокие концентрации меди (до 269021 мг/кг) по сравнению со старым хвостохранилищем (до 892 мг/кг). Картина распределения остальных элементов в новом хвостохранилище относительно однородна.

Результаты анализов показали, что высокой растворимостью обладают цинк (до 458,2 мг/кг), медь (до 150,3 мг/кг), свинец (до 353,1 мг/кг) и марганец (54 мг/кг), но содержание подвижных форм этих элементов заметно ниже их валовых концентраций. Максимальное содержание подвижных форм ртути составило 0,25 мг/кг породы. Концентрация ртути в грунтах хвостохранилища и промышленной площадки СЗИФ значительно уменьшилась: если в 1996–2000 гг. она достигала 40 мг/кг, теперь концентрация ртути в пробах составила 0,79–6,7 мг/кг. Последнее значение превышает ПДК для почв (2,1 мг/кг) в 3,2 раза. Прослеживается тенденция снижения количества ртути в грунтах с глубиной. Похожая тенденция прослеживается на территории Уфимской городской свалки, где концентрация ртути уменьшается с глубиной от 2,8 до 0,04 мг/кг породы [Абдрахманов, 1997].

Таким образом, в породах в районе влияния СЗИФ в данное время отмечаются повышенные содержания типоморфных *Fe*, *Cu*, *Zn*, *Pb*, *As* и *Ba*. Содержание ртути в хвостах обогащения по сравнению с 1996–2000 гг. значительно снизилось, но на отдельных участках превышает ПДК для почв в несколько раз.

Геохимия подземных вод. В районе Семеновской ЗИФ можно выделить две зоны обводненных пород: воды спорадического распространения в неоген-четвертичных отложениях и трещинные воды девонских образований. Подземные воды данных образований имеют гидравлическую связь между собой, и в данном случае невозможно применить гидростратиграфический принцип их разделения. В трещиноватых породах девонского возраста развиты безнапорные и субнапорные воды грунтового типа. Они слабо защищены от техногенного влияния через зону аэрации. Глубина залегания подземных вод в районе СЗИФ составляет от 0–1,7 до 15–20 м. Максимальные отметки глубин залегания подземных вод (>15 м) характерны для водораздела на участке СЗИФ. В пониженных частях рельефа (восточная часть поселка, участки хвостохранилища и пр.) глубина залегания подземных вод не превышает 3–7 м.

Зона вод спорадического распространения в неоген-четвертичных отложениях сложена делювиальными (кора выветривания) глинами, суглинками с примесью песка до 41%, гравийно-галечного материала до 26%. Коэффициент фильтрации (K_{ϕ}) данных отложений колеблется от 0,02 м/сут до 1,24 м/сут. В 70–90-х годах прошлого столетия (до ртутного загрязнения) для водоснабжения производственных процессов СЗИФ и населения поселка использовались Северный колодец и скважина № 12 (см. рис. 1). Северный колодец, заложенный в рыхлых отложениях, расположен в 200 м к северу от водохранилища и в 300 м от хвостохранилища СЗИФ. Статический уровень — 5,5 м. Дебит колодца — 172,8 м³/сут при понижении 9 м. Гидрогеодинамические параметры техногенного массива (хвосты флотации — tQ) отличаются от природных. Хвосты относятся к категории водопроницаемых: K_{ϕ} пробы, отобранной на глубине 2 м, равен 0,89 м/сут, на глубине 7 м — 0,1 м/сут. Скважина, заложенная в центральной части хвостохранилища, в мелко- и среднезернистых песках, при диаметре 132 мм имеет дебит 10–20 м³/сут при понижении 2–3 м, радиус влияния скважины — 30–50 м, K_{ϕ} находится в пределах 7–11 м/сут. Для скважины, заложенной в глинистых песках или в песках с прослойками суглинков, дебиты при том же диаметре скважины составляют 5–15 м³/сут, радиусы влияния в пределах 10–20 м, K_{ϕ} — 0,3–1,5 м/сут. Водоприто-

Таблица 4
 Результаты анализа грунтов отобранных из хвостохранилища СЗИФ и прилегающей территории (07.12–09.12.2012 г.)

№ п/п	№ выработки	Глубина отбора, м	pH	Форма концен-трации	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	As	Fe	Mn	Co	Mo	Ba	Sn	Cr _{общ}
1	С 48	1,0	7,68	Валовая	131,49	5518,78	11696,28	32,9	4,97	25,97	21363,42	247,08	1,42	1,65	1332,36	0,16	13,35
				Подвижная	51,59	131,09	5835,04	1,18	3,64	2,94	22,13	161,71	0,87	0,02	130,99	0,10	1,31
		0,5	8,70	Валовая	416,97	580,98	378,81	8,54	5,19	97,58	28011,18	157,06	1,49	2,40	998,83	0,07	9,55
				Подвижная	54,59	149,59	62,27	0,38	0,70	0,84	73,85	34,24	0,18	0,04	131,22	0,05	0,31
2	С 57	2,0	8,21	Валовая	103,58	325,99	488,86	20,71	5,23	244,54	23834,34	181,91	1,76	3,91	1321,12	0,21	16,76
				Подвижная	174,76	41,17	107,58	0,21	1,09	8,13	14,53	144,80	0,79	0,05	50,34	0,04	0,49
		5,0	8,24	Валовая	626,92	477,58	413,33	14,06	3,13	280,93	40135,55	227,32	2,10	4,31	1093,30	0,12	13,92
				Подвижная	100,00	41,40	68,54	0,05	0,64	3,39	702,48	103,35	0,49	0,05	72,81	0,04	0,39
3	С 71	0,5	6,27	Валовая	99,22	70,85	102,56	36,30	0,45	32,27	18963,96	440,93	8,02	0,83	908,16	0,22	30,39
				Подвижная	16,41	8,54	10,08	0,96	0,17	0,14	114,83	316,53	0,71	0,57	51,47	0,05	0,41
4	С 77	0,5	8,16	Валовая	362,38	927,24	444,92	4,54	5,95	135,33	28995,94	75,16	1,49	4,00	648,93	0,05	5,04
				Подвижная	26,76	327,57	87,59	0,31	0,95	0,17	173,86	14,34	0,18	0,02	51,51	0,03	0,43
5	С 78	1,5	8,48	Валовая	329,26	332,46	530,64	3,51	1,65	102,98	27247,81	130,00	0,33	2,50	1027,94	0,05	5,26
				Подвижная	23,11	100,53	185,00	0,28	1,18	0,17	86,16	20,97	0,21	0,04	50,81	0,04	0,30
		0,5	8,16	Валовая	266,05	1038,	419,02	13,58	1,11	321,27	4083,17	149,04	2,38	4,63	659,27	0,10	14,56
				Подвижная	65,81	184,90	95,53	0,44	0,74	0,39	136,82	53,28	0,48	0,09	13,45	0,03	0,36
		1,5	8,48	Валовая	377,44	487,21	264,25	7,08	1,09	142,67	4777,74	9,46	0,60	12,53	926,59	0,07	13,39
				Подвижная	71,67	118,15	25,43	0,16	0,57	0,46	26,88	8,68	0,23	0,04	27,50	0,01	0,22
6	ПДК (ОДК) для почв	1,0	7,76	Валовая	13,42	47,72	67,92	37,00	0,47	2,07	17433,10	418,56	6,53	0,44	372,16	0,19	30,85
				Подвижная	2,92	5,21	3,97	1,22	0,16	0,21	5,06	117,65	0,13	0,05	59,57	0,05	0,25
					32,0	3,0	23,0	4,0	2,0	–	1500,0	–	–	–	–	–	–
									2,0 (при pH >5,5)								

ки к скважинам (удельный дебит) не превышают 0,1 л/м, приемистость в кратковременных опытах составляет 0,05–0,08 м³/ч, достигая в отдельных случаях 0,15 м³/ч [Шадрюнова и др., 2011]. Грунты, из которых выполнена дамба, сложены глинами с $K_{\phi} = 0,7$ м/сут. Среднерасчетный K_{ϕ} для рыхлых отложений принят 0,39 м/сут.

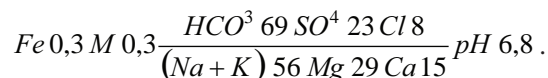
Зона трещинных вод девона сложена вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами среднего и верхнего девона: порфириты базальтовые, андезитовые, дацитовые; лавобрекчии; туфы; туфопесчаники; сланцы серицит-хлорит-кварцевые. K_{ϕ} данных образований по [Чекунов, Заварова, 2003 г.] составляет 0,04–0,07 м/сут. Средний расчетный $K_{\phi} = 0,05$ м/сут. К зоне трещинных вод приурочена скважина № 12, которая ранее использовалась для водоснабжения населения поселка. Скважина субнапорная, расположена в 600 м к востоку от водохранилища и северо-восточнее пос. Семеновский. Дебит — 112 м³/сут при понижении 22 м. Весной и в начале лета скважина самоизливается. В летнюю и зимнюю межень уровень опускается на 2–3 м ниже устья. В 1996 г. воде была обнаружена ртуть в количестве 0,0121 мг/л (24,2 ПДК). В отдельные периоды содержание ртути достигало 678 ПДК [Чекунов, Заварова, 2003 г.].

В 1996 г. в связи со ртутным загрязнением воды был разведан и введен в эксплуатацию новый водозабор у деревни Мунасыпово для водоснабжения поселка. Данный водозабор расположен в 3 км северо-восточнее СЗИФ. Скважины водозабора (5 скв.) заложены в породах ирендыкской свиты девона, представленной туфами, туфобрекчиями андезито-дацитовыми порфиритами и пр. Водоносный горизонт субнапорный, характеризуется следующими гидрогеодинамическими параметрами: $K_{\phi} = 4,50$ м/сут, гидравлический уклон — 0,014, мощность водоносного горизонта — 20,7 м, дебиты скважин — 2,25–3,3 л/с при понижении до 28 м, суммарный дебит водозабора — 517 м³/сут.

Динамика подземных вод в районе СЗИФ представлена на рис. 1, из которого видно, что общий уклон грунтовых вод направлен с севера на юг в сторону Южного дренажного колодца и составляет 0,0052–0,0237, в среднем — 0,014. В северной части хвостохранилища и водохранилища уклоны грунтовых вод сильно зависят от степени его заполнения (колебания уровня). При высоком уровне воды в водоеме уклон грунтовых вод направлен от него в разные стороны (в основном в восточном направлении, от скв. Р1 в сторону скв. Р6, скважины 12 и ручья, уклон составляет 0,0147), а при низком уровне — он направлен к водохранилищу. Более постоянные уклоны наблюдаются к западу от хвостохранилищ. Здесь уклоны грунтовых вод (28.07.2012 г.)

составляют: от режимной скважины Р2 в сторону Р3 — 0,0052, от Р3 до Р12 — 0,0237.

Сложность геохимических условий подземных вод зоны гипергенеза района исследований обусловлена разнообразием вещественного состава пород, различной степенью их дислоцированности и трещиноватости, своеобразием условий питания, движения и разгрузки подземных вод, часто зависящими от ландшафтно-климатических условий, длительности контакта инфильтрующихся вод с породами и техногенными образованиями. Вещественный состав подземных вод в регионе разнообразен. Воды в основном пяти-, шестикомпонентные. Подземные воды вулканогенных образований девона (ирендыкская, улутауская свиты) по анионному составу гидрокарбонатные, реже сульфатно-гидрокарбонатные: содержание HCO_3^- до 80–95, SO_4^{2-} до 30–35%. Хлориды занимают резко подчиненное положение — 5–7%. Среди катионов обычно доминирует кальций (45–70%), за ним следуют магний (20–30%) и натрия (5–25%). Минерализация (М) подземных вод зоны выветривания — 0,3–0,7 г/л. Химический состав воды одной из пяти скважин, пробуренных для водоснабжения поселка Семеновский, характеризуется следующей формулой:



В отдельных скважинах М воды составляет 0,28–0,4 г/л, общая жесткость — 2,72 ммоль/л, рН 6,4–6,8, содержание SO_4^{2-} 38,4–64 мг/л, Cl^- 15,4–22 мг/л, микроэлементов (мг/л): Fe 0,13–0,3, Al 0,05, Mn 0,01–0,02, Cu 0,013–0,09.

Химический состав подземных вод в районе деятельности СЗИФ характеризуется значительными изменениями, вызванными влиянием на них сточных вод предприятия и технологических растворов, примененных на ней. Как видно из таблицы 5, М подземных вод (западнее СЗИФ) с севера на юг, от северного колодца к режимной скважине Р1, сначала увеличивается от 0,5–0,8 до 6,2–9,8 (скв. 28, Р2, Р3), а затем постепенно снижается: 5,4 (Р12) — 2,4 (Р5) — 1,6 (Р4) — 0,9 г/л (Р13).

В восточной части территории СЗИФ и поселка минерализация воды изменяется не так резко: от 0,7 (Р1) — 0,6 (Р10) до 2,5 (Р6) — 3,4 г/л (скв. 26, Р9). Далее на юг (Р14) содержание солей постепенно уменьшается: 2,4 (Р14) — 1,6 г/л (Р15). За период наблюдений с 1996 по 2012 гг. максимальная М подземных вод несколько увеличилась (от 7,7 до 9,8 г/л). Произошли резкие изменения в химическом составе подземных вод. При фоновом сульфатно-гидрокарбонатном составе с М 0,3 г/л (скважина нового водозабора) воды стали сульфатными,

Таблица 5

Химический состав подземных вод в районе Семёновской ЗИФ

№№ п/п	Место отбора пробы	Глубина отбора, м	M, г/л	pH	Компоненты, мг/л, ммоль, %моль							Индекс состава воды
					HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Реж. скв. 1	2,5	0,7	7,73	122,0 2,00 19,0	323,3 6,73 63,8	64,7 1,82 17,3	52,1 2,60 22,2	66,88 5,50 47,1	82,21 3,57 30,5	0,82 0,02 0,2	SCI_{II}^{CaNaMg}
2	Реж. скв. 2	3,9	4,6	5,41	18,3 0,30 0,4	260,6 5,43 6,9	2574,6 72,61 92,7	330,7 16,5 17,3	451,7 37,15 39,0	957,86 41,65 43,7	2,83 0,07 0,1	CI_{III}^{MgNa}
3	Скв. С27	2,0	5,0	5,51	7,9 0,13 0,1	1315,8 27,39 29,6	2304,3 64,99 70,3	290,6 14,50 23,2	392,2 32,25 51,5	363,29 15,8 25,2	2,19 0,06 0,1	SCI_{IIIa}^{CaMgNa}
4	Реж. скв. 3	3,80	9,8	6,44	405,2 6,64 4,5	4615,0 96,08 65,4	1560,4 44,01 30,0	520,0 26,00 15,5	632,3 52,00 31,0	2066,5 89,85 53,5	— — —	CI_{II}^{MgNa}
5	Скв. С28	3,4	6,5	6,86	85,4 1,4 1,2	1784,4 37,15 32,7	2658,7 74,98 66,0	350,7 17,5 16,4	532,0 43,75 41,0	1042,7 45,34 42,5	1,97 0,05 0,1	SCI_{IIIa}^{MgNa}
6	Реж. скв. 4	5,0	1,6	6,63	48,8 0,8 3,0	476,2 9,91 37,4	561,0 15,82 59,6	80,2 4,00 13,3	133,8 11,00 36,5	347,9 15,13 50,2	1,70 0,04 0,1	SCI_{IIIa}^{MgNa}
7	Реж. скв. 5	5,4	2,4	6,70	61,0 1 3,1	793,1 16,51 50,4	539,7 15,22 46,5	88,2 4,40 8,6	143,5 11,80 23,1	800,8 34,82 68,1	4,01 0,1 0,2	CI_{II}^{MgNa}
8	Реж. скв. 6	1,2	2,5	6,21	18,3 0,3 0,8	952,9 19,84 53,4	602,6 17,00 45,8	200,4 10,00 20,0	231,0 19,00 38,0	480,6 20,90 41,8	2,47 0,06 0,1	CI_{IIIa}^{CaMgNa}
9	Скв. С26	2,5	3,4	5,88	9,2 0,15 0,3	2035,0 42,37 73,4	539,7 15,22 26,4	190,4 9,50 20,8	246,2 20,25 44,4	363,3 15,80 34,6	2,45 0,06 0,1	CI_{II}^{CaNaMg}
10	Реж. скв. 7	0,0	0,6	6,88	85,4 1,4 12,9	335,3 6,98 64,5	86,9 2,45 22,6	56,1 2,80 34,9	43,78 3,60 44,9	36,96 1,61 20,1	0,45 0,01 0,1	CI_{IIIa}^{NaCaMg}
11	Реж. скв. 8	0,0	0,6	7,82	91,5 1,50 15,2	281,0 5,85 59,4	88,6 2,50 25,4	48,1 2,40 30,0	41,34 3,40 42,6	49,82 2,17 27,2	0,66 0,02 0,3	CI_{II}^{NaCaMg}
12	Реж. скв. 10	2,4	0,6	7,60	177,0 2,90 34,7	217,8 4,53 54,3	32,79 0,92 11,0	36,1 1,80 24,2	37,70 3,10 41,7	58,1 2,53 34,0	0,58 0,01 0,1	CS_{II}^{CaNaMg}
13	Реж. скв. 11	4,4	4,2	7,80	262,4 4,30 5,6	2384,8 49,65 64,6	810,9 22,87 29,8	168,3 8,40 18,6	248,1 20,40 45,0	378,3 16,45 36,3	1,72 0,04 0,1	CI_{II}^{NaMg}
14	Реж. скв. 12	15,8	5,4	7,64	36,6 0,60 0,6	429,7 8,95 9,6	2964,5 83,61 89,8	188,4 9,40 9,0	501,6 41,25 39,5	1238,6 53,86 51,5	2,24 0,06 0,1	CI_{IIIa}^{MgNa}
15	Реж. скв. 13	9,5	0,9	8,88	67,1 1,10 7,9	333,7 6,95 50,1	206,5 5,82 42,0	23,0 1,15 9,5	29,79 2,45 20,1	191,45 8,32 68,4	9,85 0,25 2,1	CI_{II}^{MgNa}
16	Реж. скв. 14	8,2	2,3	7,78	598,0 9,80 27,0	1061,3 22,10 60,9	155,98 4,40 12,1	79,2 3,95 16,2	116,7 9,60 39,3	249,17 10,83 44,4	0,64 0,02 0,1	CS_{II}^{MgNa}
17	Реж. скв. 15	11,0	1,6	7,41	195,3 3,20 13,0	500,8 10,43 42,4	389,1 10,97 44,6	76,2 3,80 15,3	97,89 8,050 32,4	297,96 12,96 52,2	0,82 0,02 0,1	SCI_{II}^{MgNa}

хлоридно-сульфатными, сульфатно-хлоридными и хлоридными (см. табл. 5). Воды содового типа метаморфизовались в хлормagneиновые и хлоркальциевые воды. Такое изменение весьма существенно, т.к. воды типа IIIa и IIIб формируются в особых гидрогеологических условиях. В воде резко выросло содержание хлор-иона от 15–22 (фоновое) до 2658 г/л, сульфат-иона от 38–64 до 2385–4615 мг/л, pH понизился до 5,41.

Формирование химического состава подземных вод зоны влияния СЗИФ происходит в результате разгрузки технологических растворов (HCl , H_2SO_4 и пр.) из хвостохранилищ и сточных вод из водохранилища.

В результате сложных геохимических процессов растворения и выщелачивания (экстракции), сорбции, ионного обмена и др. сформировались воды, аномальные для этих отложений. Процесс формирования химического состава подземных вод вызван, по нашему мнению, двумя основными геохимическими процессами, это:

- воздействие техногенных кислотных растворов на горные породы (диссоциация кислот);
- гипергенная трансформация рудных минералов медноколчеданных месторождений в результате окислительного перевода труднорастворимых сульфидов (пирит FeS_2 и пр.) в хорошо растворимые сульфаты $2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O = 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$. Образующаяся H_2SO_4 в известных литолого-гидрогеохимических ситуациях нейтрализуется карбонатным веществом, в результате чего формируются воды сложного химического состава с минерализацией до 8–12 г/л:



Такие гипергенные трансформации рудной медноколчеданной массы месторождений имеют гидрогеохимическим следствием увеличение концентраций SO_4^{2-} и многих рудных элементов. Все эти окислительные трансформации сопровождаются переходом в подземные воды значительных количеств иона H^+ , что определяет снижение pH этих вод и соответственно резкое увеличение их окислительно-восстановительного потенциала [Крайнов и др., 2004].

Изменение M и химического состава подземных вод с севера на юг происходит в результате уменьшения влияния стоков хвосто- и водохранилища на них. Результаты исследований [Абдрахманов и др., 2000 г., 2013 г.] показывают, что коренные девонские вулканогенные образования перекрыты мощными глинистыми отложениями коры выветривания и делювия, обладающими значительными ёмкостями поглощения — 40–70 ммоль/100 г и более [Абдрахманов, Попов, 2010]. При движении

подземных вод с севера на юг эти отложения становятся мощными геохимическим барьерами. В этой барьерной зоне на коротком расстоянии происходит резкая смена гидрогеохимических условий миграции химических элементов. Эффективность геохимических барьеров (окислительный, восстановительный, сорбционный и др.) определяется геохимическими ситуациями, которые возникают при движении подземных вод [Перельман, 1972]. Сорбционный глинистый барьер наиболее активен в зоне гипергенеза. В результате геохимических процессов на этих барьерах M подземных вод довольно быстро снижается.

Анализ микрокомпонентного состава подземных вод с 1996 по 2012 гг. свидетельствует о значительных колебаниях содержаний микроэлементов по сезонам года. В воде были обнаружены превышающие ПДК концентрации Mn до 20, Fe до 500, Cd до 2. Остальные элементы, в том числе Cu , Zn , As и Sb , находились в пределах нормы. Содержание ртути также многократно превышало ПДК. В поверхностных водах (пруд-осветлитель, оборотное водохранилище) содержание ртути превышало ПДК в 59–67 раз.

Режимные наблюдения за химическим составом подземных вод в 2012 г. показали (табл. 6) практически повсеместное превышение нормативов Fe до 322000 ПДК (P3) и Mn до 50 ПДК (P2, P3). Также отмечены превышения ПДК для Pb (5 ПДК), Cd (13 ПДК), Ba (4 ПДК). Ртутное загрязнение установлено лишь в двух скважинах: P2 до 3,2 ПДК и P6 до 2,4 ПДК в августе 2012 г. Обе скважины находятся в непосредственной близости от водохранилища. Повторный отбор и анализ проб, выполненный в декабре 2012 г., показал отсутствие Hg в подземных водах во всех режимных скважинах, в пределах чувствительности аналитических приборов¹.

Таким образом, сравнительный анализ данных прошлых лет и современной информации показывает, что содержание ртути в подземных водах существенно снизилось до 3 ПДК и отсутствия, что свидетельствует о естественной демеркуризации отходов СЗИФ.

Выполнен ориентировочный расчет потока загрязненных подземных вод с территории СЗИФ. Поток двухсторонний (см. рис. 1): разделен относительно водоупорными ($K_{\phi} = 0,05$ м/сут) вулканогенными породами девонского возраста. В связи с этим расчет выполнен отдельно для западной и восточной части зоны влияния СЗИФ. Для гидрогеологических расчетов определены размеры потока: среднерасчетная ширина с западной стороны — 500 м,

¹анализатор ртути «Юлия-5К»

Содержание микроэлементов в подземных водах района Семеновской ЗИФ (03.08.2012)

№ п/п	Место отбора	Компоненты, мг/л													
		Cu	Zn	Pb	Co	Ni	Fe	Mn	As	Cd	Hg	Cr _{общ}	Mo	Ba	Sn
1	Реж. скв. 1	0,150	0,083	0,0403	0,0217	0,0099	22,129	1,987	<0,0005	0,00017	0,0003	0,0069	<0,001	0,397	0,0047
2	Реж. скв. 2	0,444	0,346	0,1539	0,0021	0,0382	67,156	4,845	0,0058	0,01249	0,0016	0,0003	<0,001	0,026	0,0063
3	Реж. скв. 3	0,132	0,211	0,0637	0,0305	0,0398	96,442	5,387	0,0015	0,00035	<0,0001	0,0197	<0,001	0,403	0,0090
4	Реж. скв. 4	0,048	0,114	0,0236	0,0165	0,0156	49,264	1,047	0,0048	0,0002	<0,0001	0,0134	<0,001	0,140	0,0004
5	Реж. скв. 5	0,159	0,104	0,0257	0,0105	0,0130	36,2	1,051	0,00053	0,00032	0,0003	0,0127	<0,001	0,122	0,0018
6	Реж. скв. 6	0,310	0,218	0,0712	0,0364	0,0387	87,685	4,085	0,0013	0,00034	0,0012	0,0178	<0,001	0,195	0,0017
7	Реж. скв. 7	0,009	0,012	0,0024	0,0035	0,0010	13,127	0,204	0,0007	0,00003	0,0002	0,0010	<0,001	0,007	0,0003
8	Реж. скв. 14	<0,001	0,008	0,0012	0,0002	<0,0002	0,297	0,005	<0,0005	0,00002	<0,0001	0,0085	<0,001	0,009	<0,0005
9	Реж. скв. 15	<0,001	0,013	0,0026	0,0013	0,0003	0,069	0,004	<0,0005	0,00002	<0,0001	0,0005	<0,001	0,003	<0,0005
10	Южный колодец	0,030	0,023	0,0006	0,0021	0,0017	1,241	0,042	<0,0005	0,00002	<0,0001	0,0003	<0,001	0,026	0,0009
11	ПДК для питьевых вод	1,0	5,0	0,03	0,1	0,1	0,3	0,1	0,05	0,001	0,0005	—	0,25	0,1	—

с восточной — 600 м, мощность потока — 20 м, среднерасчетный уклон — 0,014.

Действительная скорость фильтрации с учетом среднерасчетной активной пористости глинистых отложений ($n=0,41$) определена по формуле:

$$u = \frac{k \cdot I}{n}$$

где k — среднерасчетный коэффициент фильтрации (0,39 м/сут), I — гидравлический уклон (0,014).

Действительная скорость составляет 0,013 м/сут. По этим данным произведен расчет объема фильтрационных стоков по методу Дарси [Скабалланович, 1960]:

$$Q = u \cdot F,$$

где u — действительная скорость фильтрации (0,013 м/сут), F — площадь поперечного сечения потока: с западной стороны — 10000 м², а с восточной — 12000 м².

Суточный объем потока в западной части территории составляет 130 м³, а в восточной части — 156 м³.

Общий объем подземного потока загрязненных вод от СЗИФ на юг составляет ~286 м³/сут.

В качестве заключения можно сделать следующие **выводы**:

Геоэкологические условия района исследований определяются техногенными преобразованиями природной среды, вызванными деятельностью Семеновской золотоизвлекательной фабрики. Предприятие не только перерабатывало минеральное сырье, содержащее в значительных количествах токсиканты, но и использовало токсичные вещества (H_2SO_4 , HCl , CN и др.) в технологическом процессе. По завершении процесса цианирования все эти загрязнители природной среды аккумулировались в отходах и сточных водах СЗИФ. За 53 года работы на хвостохранилищах предприятия в виде отходов производства накоплено 2638,8 тыс. т хвостов, характеризующихся высокими концентрациями продуктов разложения технологических реагентов и тяжелых металлов.

Сравнительный анализ данных прошлых лет и современной информации показывает, что содержание ртути в подземных водах существенно снизилось до 3 ПДК и отсутствия, происходит естественная демеркуризация отходов СЗИФ. Основными загрязнителями подземных вод являются тяжелые металлы (Fe , Mn и Ba) и компоненты разложения

кислот, использованных в технологическом процессе (сульфаты, хлориды и пр.). Ориентировочный расход загрязненного потока подземных вод из зоны влияния СЗИФ составляет 286 м³/сут.

Литература:

- Абдрахманов Р.Ф.** Геохимия экотоксикантов в подземных водах урбанизированных территорий // Геохимия. — 1997. — № 6. — С. 630–636.
- Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г.** Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала. — Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. — 420 с.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.** Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. — М.: Наука, 2004. — 677 с.
- Перельман А.И.** Геохимия элементов в зоне гипергенеза. — М.: Недра, 1972. — 288 с.
- Скабаланович И.А.** Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод. — М.: Госгортехиздат, 1960. — 408 с.
- Шадрунова И.В., Горлова О.Е., Провалов С.А.** Адаптивные методы доизвлечения золота из хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень № 9. — М: Горная книга, 2011. — С. 180–185.