

УДК 550.42 (571.55)

**ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОНЫ ТЕХНОГЕНЕЗА
ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ****Замана Л.В., Чечель Л.П.***ФГБУН «Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН», Чита,
e-mail: l.v.zamana@mail.ru*

В статье представлены результаты гидрогеохимических исследований горнорудных объектов полиметаллических месторождений Юго-Восточного Забайкалья. Воды характеризуются нейтральными и слабощелочными значениями показателя pH, солёностью немногим более 1.0 г/л и обогащённостью рудными компонентами (Zn, Cu, Pb, Al, Fe, Mn и др.). Определены основные формы миграции компонентов техногенных вод, показана динамика их концентраций и зависимость от режима стока.

Ключевые слова: полиметаллические месторождения, дренажный сток, концентрация компонентов, хвостохранилище.

**HYDROGEOCHEMICAL FEATURES OF THE ZONE TECHNOGENESIS
POLYMETALLIC DEPOSITS SOUTHEASTERN TRANSBAIKALIA****Zamana L.V., Chechel L.P.***Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS (INREC SB RAS), Chita,
e-mail: l.v.zamana@mail.ru*

The article presents the results of hydrogeochemical studies mining sites polymetallic deposits Southeastern Transbaikalia. Water is characterized of neutral and weakly alkaline values pH, salinity slightly more than 1.0 g/l and richness of ore elements (Zn, Cu, Pb, Al, Fe, Mn, etc.). Defined basic inorganic forms of technogenic water migration components, shown dynamics of their concentration and dependence on the flow regime.

Keywords: polymetallic deposits, drainage flow, components concentration, tailing.

Введение

Разработка полиметаллических (свинцово-цинковых) месторождений в Юго-Восточном Забайкалье началась в последней трети XVII столетия – в 1676 г. здесь был выплавлен первый свинец [3]. На Акатуевском и Благодатском рудниках отбывали каторгу декабристы. Наибольший разворот добыча полиметаллов получила в 1950-1990-е годы, когда в регионе одновременно работало 4 рудника, каждый из которых имел собственную обогатительную фабрику. В 90-х годах прошлого столетия рудники были закрыты. Месторождения разрабатывались преимущественно подземным способом, поэтому объемы вскрышных и рудовмещающих пород небольшие, основные отходы горнопромышленного производства представлены хвостами обогащения. Рекультивация отвалов и хвостохранилищ не проводилась. В 2005 г. введено в эксплуатацию Новоширокинское золотополиметаллическое месторождение. Трансграничное положение горнорудных объектов определяет повышенное внимание к их воздействию на природную среду, в особенности на химический состав поверхностного стока, поступающего в р. Аргунь, разделяющую Россию и Китай (рис. 1). В данном со-

общении представлены результаты гидрогеохимического опробования, выполненного в последние годы.

Объекты исследований

Особенностью разрабатывавшихся Акатуевского, Благодатского, Кадаинского, Кличкинского и некоторых других свинцово-цинковых месторождений Юго-Восточного Забайкалья является локализация их в пределах карбонатных толщ нижнего палеозоя, выходы которых разобщены крупными массивами гранитов варисского и каледонского возрастов [4]. Месторождения приурочены, как правило, к контактам доломитов со сланцами или известняковым прослоям, заключённым в толще сланцев. Рудные тела в основном жильные и в виде трубообразных залежей.

На *Акатуевском* месторождении рудные минералы представлены галенитом, сфалеритом, пирротинном, пиритом, арсенопиритом, халькопиритом и др. Жильные минералы наряду с кварцем и доломитом включают кальцит, мангананкерит, олигонит, анкерит и флюорит.

На *Кадаинском* месторождении главными рудными минералами являются сфалерит, галенит, пирит, церуссит, арсенопирит [2].

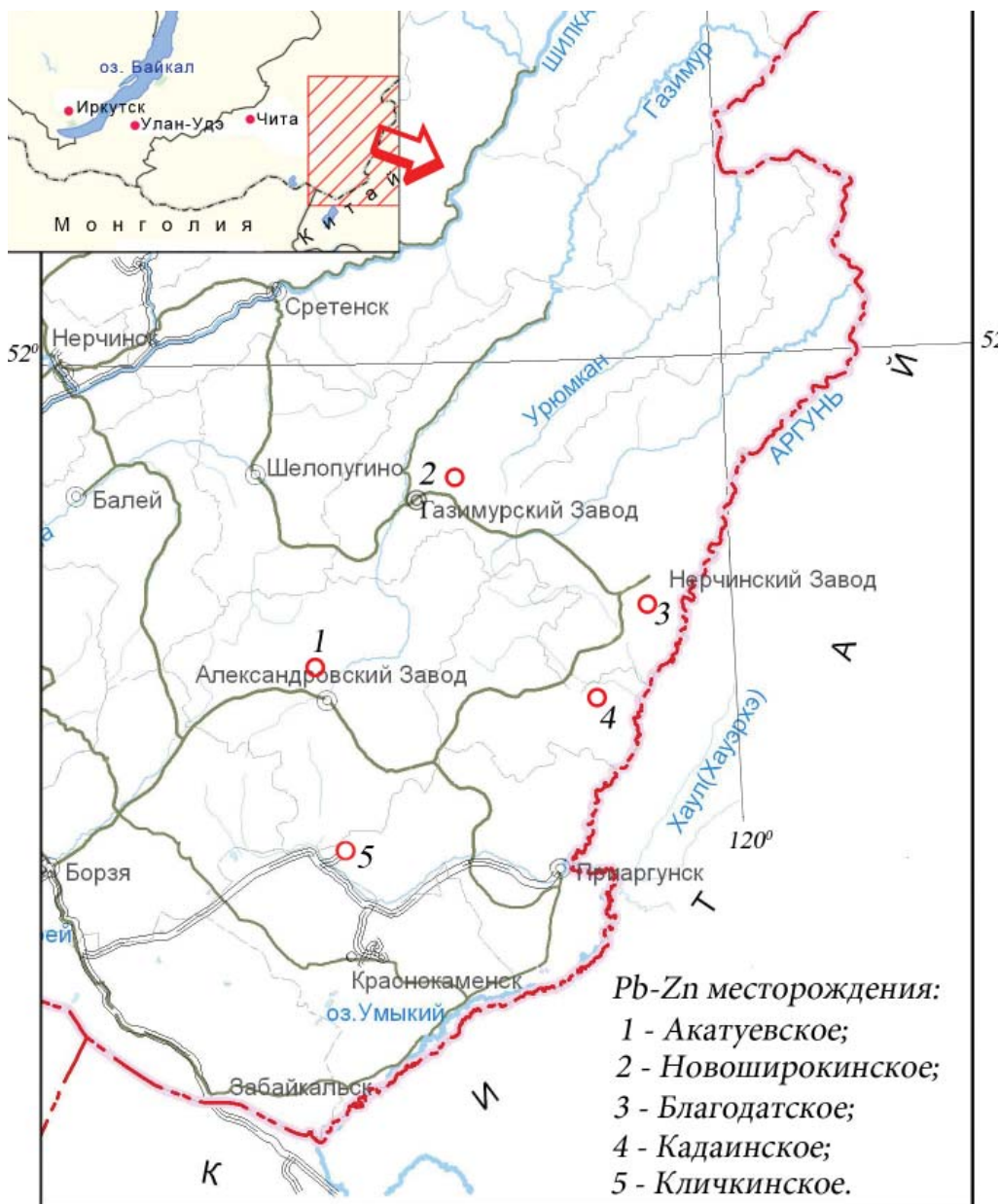


Рис. 1. Местоположение объектов гидрогеохимических исследований

На *Кличкинском* месторождении к рудным минералам относятся сфалерит, галенит, пирротин, пирит, арсенопирит, а к нерудным – волластонит, пироксен, гранат, кварц, кальцит, флюорит и др. [6].

Месторождения *Благодатского* рудного поля (Благодатское, Екатерино-Благодатское, Центральное и Воздвиженское), расположенные поблизости друг от друга, относятся к Нерзаводской группе и имеют много общего в геологическом строении и минеральном составе руд. Главными рудными минералами здесь являются пирит, сфалерит, арсенопирит, галенит, буланжерит, в подчинённом количестве отмечаются блё-

кляя руда, станнин, касситерит. Жильные минералы представлены кварцем, доломитом, кальцитом [4].

Новоширокинское золотополиметаллическое месторождение локализовано в пределах мезозойской вулканотектонической впадины [9]. Для рудообразования этого месторождения характерна многостадийность с несколько отличающимся минеральным составом руд по стадиям. Сульфиды здесь в основном представлены пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, блеклыми рудами, в составе нерудных минералов распространены кварц, халцедон, доломит.

Результаты гидрогеохимических исследований

Из-за засушливых климатических условий последних лет дренажный сток опробован только из штольни Акатуевского месторождения. По остальным объектам гидрогеохимические данные характеризуют влияние на качество вод хвостохранилищ.

Несмотря на сульфидный состав руд и особенно присутствие пирита, для всех опробованных вод характерны нейтральные или слабощелочные значения рН (табл. 1), что определяется высоким потенциалом нейтрализации вмещающих свинцово-цинковое оруденение карбонатных пород, а также присутствующих в рудах карбонатных

минералов и поступающих в составе кеков в хвостохранилища. В свою очередь, такая среда ограничивает миграцию в водах тяжелых металлов вследствие насыщения по гидроксидам, имеющим низкую растворимость. Если на рудных месторождениях региона с кислым дренажным стоком, к примеру, золоторудных [5] или вольфрамовых [7], концентрации железа в водах достигают десятков и сотен, а цинка и меди – десятков мг/л, на рассматриваемых полиметаллических месторождениях концентрации этих элементов существенно ниже (табл. 2). Исключение составляет проба по Благодатскому хвостохранилищу, где концентрация цинка в воде превысила 75 мг/л.

Таблица 1

Макрокомпонентный состав вод

№ пробы	Место и дата отбора пробы	Eh, мВ	pH	Si, мг/л	ПК, мгО ₂ /л
АК-10-1	Сток из штольни Акатуевского месторождения, 17.08.10	212	7.73	7.74	2.7
РМ-12-09-13	Дренажный сток из той же штольни, 17.09.12	334	7.40	5.32	0.32
АК-10-2	Ручей ниже Акатуевского хвостохранилища, 17.08.10	220	8.01	9.06	3.8
РМ-12-09-14	Выход под дамбой Акатуевского хвостохранилища, 17.09.12	257	7.35	12.56	1.4
РМ-12-09-2	Хвостохранилище Новоширокинского ГОКа, 14.09.12	412	7.30	2.84	8.8
РМ-12-09-06	Ручей выше Благодатского хвостохранилища, 14.09.12	145.3	7.70	5.04	3.4
РМ-12-09-07	Ручей ниже Благодатского хвостохранилища, 15.09.12	150.7	8.30	4.79	3.1
СБ-13-10	Хвостохранилище Кадаинского рудника, 20.07.13	262	7.80	1.1	2.42

№ пробы	Место и дата отбора пробы	CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ионов
		мг/л									
АК-10-1	Сток из штольни Акатуевского месторождения, 17.08.10	11.0	244.0	154.0	7.1	0.44	87.3	32.5	2.8	0.50	528.6
РМ-12-09-13	Дренажный сток из той же штольни, 17.09.12	12.3	255.0	173.6	1.4	0.42	92.6	39.0	2.92	0.4	565.4
АК-10-2	Ручей ниже Акатуевского хвостохранилища, 17.08.10	6.6	247.1	110.0	6.3	0.66	78.9	26.9	3.0	1.38	474.2
РМ-12-09-14	Выход под дамбой Акатуевского хвостохранилища, 17.09.12	12.3	241.0	518.5	2.8	0.79	189.5	50.0	8.89	1.42	1013
РМ-12-09-2	Хвостохранилище Новоширокинского ГОКа, 14.09.12	5.3	91.5	442.0	7.1	0.35	104.9	17.2	96.2	15.1	774.3
РМ-12-09-06	Ручей выше Благодатского хвостохранилища, 14.09.12	5.3	256.0	29.3	1.6	0.30	56.2	18.1	6.3	0.56	368.3
РМ-12-09-07	Ручей ниже Благодатского хвостохранилища, 15.09.12	н.о.	273.0	138.2	1.8	0.27	73.6	33.1	7.0	0.52	527.6
СБ-13-10	Хвостохранилище Кадаинского рудника, 20.07.13	4.4	73.2	1150.0	3.7	0.72	300.2	112.5	16.2	5.73	1662

Таблица 2

Азот, фосфор и металлы в водах

№ пробы	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	P _{общ.}	Sr
мг/л					
АК-10-1	<0.62	<0.01	0.50	0.083	0.02
РМ-12-09-13	<0.62	<0.01	0.07	0.07	0.12
АК-10-2	<0.62	<0.01	0.50	0.180	0.023
РМ-12-09-14	<0.62	0.01	0.06	0.063	0.53
РМ-12-09-2	41.0	7.50	4.75	0.085	0.38
РМ-12-09-06	0.98	<0.01	<0.017	0.08	0.063
РМ-12-09-07	<0.62	<0.01	0.079	0.06	0.078
СБ-13-10	<0.62	0.013	0.13	0.078	1.143

№ пробы	Mn	Fe	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd	Co	Al	Ag	As	Cr
	мкг/л											
АК-10-1	3.6	66.8	20.7	8.28	0.16	21.7	8.58	0.54	11.8	0.76	<0.52	2.13
РМ-12-09-13	35.1	142.5	412.5	<0,18	<0,18	2.22	2.08	<0,30	48.4	0.72	5.88	<0.07
АК-10-2	4.3	65.0	18.8	3.02	0.14	10.2	8.82	0.21	8.43	0.64	56.5	0.42
РМ-12-09-14	17.1	1558	201.7	4.68	<0,18	4.6	1.77	0.35	45.5	0.59	48.8	0.27
РМ-12-09-2	13.7	94.2	16.1	9.87	4.38	33.0	0.45	7.86	40.4	0.10	<0.52	0.21
РМ-12-09-06	1.1	45.8	0.70	22.9	3.07	7.3	0.51	0.85	28.9	0.52	2.85	<0.07
РМ-12-09-07	24.4	24.6	75751	1.05	8.74	4.6	2.22	8.45	46.0	9.89	<0.52	<0.07
СБ-13-10	161.4	1067	1548	73.3	2.71	20.3	8.78	7.83	313.8	<0.1	<0.52	1.72

Вода ручья в хвостохранилище Благодатского ГОКа (рис. 2), имеющем общую протяженность около 3 км и ширину до 0,6-0,7 км, по потоку заметно обогащается соевыми компонентами, минерализация ее растет в 1,4 раза, при этом содержание сульфата увеличивается в 4,7 раза, а состав из гидрокарбонатного становится сульфатно-гидрокарбонатным. Магниево-кальциевый состав при этом остается неизменным, хотя концентрация Mg по сравнению с Ca растет более интенсивно – соответственно в 1,8 и

1,3 раза. Немного, исключая Zn, увеличиваются и концентрации большинства рудных компонентов, что также определяется высокими значениями pH. Параллельный рост концентраций магния, цинка и сульфатного иона обусловлен, по всей вероятности, растворением соответствующих новообразованных сульфатных минералов (магниевого эпсомита и цинкового голларита), формирующихся на испарительном геохимическом барьере в сухую погоду и растворяющихся в период дождей.



Рис. 2. Хвостохранилище Благодатского ГОКа (слева) и минеральные новообразования (светлое) в стенке промоины в его ложе

Состав вод на Акатуевском месторождении сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый, кроме пробы, отобранной в 2012 г. под дамбой в нижней части хвостохранилища, по которой доминировал сульфат. Концентрации макрокомпонентов штольневых вод и их минерализация за два периода опробования существенно не отличались, тогда как вода из выхода под дамбой, дренажного хвостохранилища, имела значительные отличия как по величине pH, так и по концентрациям макрокомпонентов и минерализации (табл. 1). Произошел существенный рост содержания ионов SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ , почти в 2 раза выросла минерализация. Изменение состава штольневого дренажа в 2010 г. после прохождения по пескам хвостохранилища выразилось в некотором возрастании значений pH и Eh, а также концентраций ионов HCO_3^- , F^- , Na^+ и K^+ , при этом отмечалось снижение минерализации и содержания в воде SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Последнее обусловлено разбавлением штольневых вод, поступающим по рельефу поверхностным стоком, тогда как накопление ряда компонентов – результат выщелачивания их из хвостов обогащения. В 2012 г., когда стока по ложу хвостохранилища не было, после фильтрации через хвосты произошло увеличение минерализации при росте основных ионов и фтора, кроме HCO_3^- . Если рост концентраций компонентов – следствие растворения взаимодействующих с водой хвостов обогащения, то снижение концентраций HCO_3^- указывает на выпадение из раствора карбонатов. Такая направленность процесса растворения-осаждения отражает известный принцип равновесно-неравновесного состояния системы вода-порода [8].

Изменения микрокомпонентного состава опробованных водопроявлений на Акатуевском месторождении при сравнении данных за 2010 и 2012 годы выражаются в многократном увеличении концентраций марганца, железа и цинка и снижении концентраций никеля и кадмия (табл. 2). В пробах 2010 г. после хвостохранилища отмечался рост содержания марганца и мышьяка и одновременно снизились концентрации цинка, меди, никеля, кобальта, алюминия, серебра и хрома. В 2012 г. концентрации Fe, Cu, Ni, Co, As, Cr увеличились, а Mn, Zn, Cd и Ag – упали.

Воды пруда-отстойника хвостохранилища Новоширокинского ГОКа при такой же околонеutralной реакции имеют относительно повышенную минерализацию и от-

личаются сульфатным натриево-кальциевым составом (табл. 1). Содержания микрокомпонентов в них десятки (Mn, Fe, Zn, Ni, Al), единицы (Cu, Pb, Co) и доли мкг/л (табл. 2). Особо следует обратить внимание на явно аномальный уровень всех форм азота. Возможны два источника обогащения ими пристоков: цианиды, применяемые в технологии извлечения золота, и взрывчатые вещества, используемые при добыче руды. За счет последних ранее установлены аномальные концентрации форм азота в водотоке работающих карьеров Спокойнинского вольфрамового и Апрельковского золоторудных месторождений.

Пруд в Кадаинском хвостохранилище выделяется наиболее высокими значениями по ряду показателей (табл. 1, 2), что объясняется его бессточностью и, следовательно, более продолжительным временем взаимодействия воды с кеками, обогащенными сульфидами и продуктами их окисления.

Полученные данные указывают, таким образом, на заметные изменения физико-химических характеристик водного стока в зоне техногенеза рассматриваемых месторождений, зависящие от режима выпадения атмосферных осадков. В сухие периоды происходит концентрирование поровых растворов в горнопромышленных отходах, их насыщение относительно различными вторичными минералами (алюмосиликаты, карбонаты, сульфаты и др.) и выпадение части растворенных веществ в минеральный осадок, что способствует некоторому очищению вод. Усиливается минералообразование на испарительном барьере (рис. 2). В периоды дождей фильтрующиеся осадки за счет поровых вод и растворения ранее высаженных минералов, особенно хорошо растворимых сульфатов, обогащаются рудными компонентами, которые выносятся в речную сеть, формируя паводковый тип загрязнения. Его отличительная особенность – рост концентраций загрязняющих веществ, в особенности тяжелых металлов, в начале паводков.

Расчет форм нахождения элементов в водах с использованием программного комплекса HG32 [1] показал, что растворенные неорганические формы миграции Zn, Pb, Cu, Al, Mn и Fe представлены простыми катионами, карбонатными, сульфатными и гидроксильными комплексами. Цинк, марганец и железо (II) в основной массе мигрируют в виде акваионов, медь – в форме нейтрального карбонатного комплекса, свинец,

алюминий и железо (III) – в виде гидроксо-комплексов. Для цинка, железа и марганца на Акатуе отмечено некоторое увеличение сульфатных форм после фильтрации через хвостохранилище в сравнении со штольневными водами, обусловленное возрастанием концентраций сульфат-иона.

По данным опробования в 1984-1990 годы, отличавшимся более высоким атмосферным увлажнением, дренажные воды всех полиметаллических месторождений также имели нейтральную или слабощелочную реакцию и относительно невысокие концентрации рудных элементов (табл. 3).

Таблица 3

Основные характеристики вод зоны техногенеза полиметаллических месторождений по данным опробования 1984-1990 годов

Показатель	Месторождения			
	Кличкинское	Акатуевское	Благодатское	Кадаинское
pH	7.8-8.6	7.8-8.1	8.0-8.6	7.2-7.7
HCO ₃ ⁻ , мг/л	130.0-542.0	160.0-276.0	260.0-316.0	232.0-316.0
SO ₄ ²⁻	5.5-298.0	11.2-151.0	-	22.0-48.3
Cl ⁻	9.5-37.1	0.3-25.7	-	6.3-39.8
F ⁻	0.54-4.30	0.29-0.79	0.28-0.49	0.50-0.47
∑ ионов	203-871	241-575	241-632	363-534
Химический тип	HCO ₃ Mg-Ca	HCO ₃ -SO ₄ Ca	HCO ₃ Ca-Mg	HCO ₃ Ca-Mg
Fe, мкг/л	48-2280	54-304	43	100-236
Mn	6.1-2220	2.6-191.0	46.1	23.3-71.3
Cu	1.8-116.0	14.0-35.8	2.7	3.8-7.7
Zn	8.5-1700	6.9-255.0	1380	152-278
Pb	5.8-4000	1.8-9.6	16.3	6.0-26.9
Mo	0.55-4.37	0.30-20.0	0.25-0.54	1.40-2.30

Примечание: прочерк – нет данных.

Таким образом, в зонах влияния разработки полиметаллических месторождений Юго-Восточного Забайкалья воды характеризуются нейтральными и слабощелочными значениями pH, относительно небольшой минерализацией, немного превышающей 1,0 г/л, и в целом невысокими концентрациями рудных элементов. Водная миграция последних ограничивается кислотнo-основными свойствами среды, которые определяются высоким потенциалом нейтрализации кислотности, образующейся при окислении содержащихся в рудах сульфидов, в особенности пирита, карбонатами вмещающих пород и руд.

Исследования выполнены по проекту «Гидрогеохимия, криогеохимия и электрофизические свойства ледяных образований в зоне техногенеза рудных месторождений Забайкалья» и при поддержке партнерского интеграционного проекта СО РАН, ДВО РАН и УрО РАН № 23 «Трансграничные речные бассейны в азиатской части России: комплексный анализ состояния природно-антропогенной среды и перспективы межрегионального взаимодействия».

Список литературы

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТПУ. – 2002. – Т. 305. – Вып. 8. – С. 348–365.
2. Геология и закономерности размещения эндогенных месторождений Забайкалья. Коллектив авторов. – М.: Недра, 1970. – 232 с.
3. Геологические исследования и горнопромышленный комплекс Забайкалья: История, современное состояние, проблемы, перспективы развития. К 300-летию основания Приказа рудокопных дел / Г.А. Юргенсон, В.С. Четкетин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская форма РАН, 1999. – 574 с.
4. Добровольская М.Г., Гордеев В.И. Свинцово-цинковые месторождения // Месторождения Забайкалья / коллектив авторов / под ред. акад. Н.П. Лаверова. (в 2 книгах). – М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. I, кн. 1. – С. 70-92.
5. Замана Л.В., Усманов М.Т. Эколого-гидрогеохимическая характеристика водных объектов золотопромышленных разработок Балейско-Тасеевского рудного поля (Восточное Забайкалье) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2009. – Т. 34. – № 1. – С. 105-111.
6. Талдыкина К.С. Минералогия полиметаллических месторождений Кличкинской группы Восточного Забайкалья. – М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 122 с.
7. Чечель Л.П., Замана Л.В. Основные геохимические типы дренажных вод вольфрамовых месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 329. – С. 271-277.
8. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
9. <http://www.drillings.ru/novoshir>: Новоширокинское месторождение золота.