

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕБИТА ПОВЕРХНОСТНЫХ И СКРЫТЫХ ВОДОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХИМИЧЕСКОЙ МЕТКИ И ОЦЕНКА ТЯЖЕЛОМЕТАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ Р. САК-ЭЛГА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КИСЛЫХ РУДНИЧНЫХ ВОД**

*П.Г. Аминов<sup>1</sup>, В.Н. Удачин<sup>1,2</sup>, К.А. Филиппова<sup>1</sup>,  
Г.Ф. Лонцакова<sup>1</sup>, Л.Г. Удачина<sup>1</sup>*

На натурном объекте проведены нетрадиционные исследования по оценке дебитов поверхностных вод с использованием Li химической метки. В отличие от стандартных методов гидрологических оценок, метод позволяет определить вклад скрытых притоков подземных и грунтовых напорных вод. Кроме того, использование Li-метки делает более точной оценку техногенной нагрузки на малые водотоки, в первую очередь для тяжелых металлов. Использование метода проведено на примере р. Сак-Элга, которая находится под влиянием кислых рудничных вод г. Карабаша в Челябинской области.

Ключевые слова: поверхностные воды, химический состав, литий, кислые рудничные воды, техногенез.

### **Введение**

Природные поверхностные водотоки от самых своих истоков постоянно испытывают подпитку за счет впадающих притоков, и это находит свое выражение в увеличении дебита основного водотока. В ряде моментов видимых источников пополнения водотоков бывает недостаточно для объяснения увеличения дебита и в этом случае имеет смысл говорить о невидимых или «скрытых» источниках подпитки. Происхождение таких вод может быть весьма разнообразное (воды затопленных шахт, придонные родники и т.д.), что определяет их физико-химические показатели. Поэтому каждый такой невидимый приток может вносить вклад, как в кислотность, так и в металлоносную нагрузку потока.

Целью работы было установление дебита водотоков, как одной из главных характеристик, определяющих перенос металлов в р. Сак-Элга на территории Карабашского горнопромышленного комплекса (Челябинская область, Южный Урал). Для определения дебита водотоков использовался метод «химического снаряда» (Х-снаряда), предложенный гидрохимиками

---

<sup>1</sup> Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс.

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе.

США [6, 9, 10]. В качестве химической метки использовался Li в виде раствора хлорида лития (LiCl). Параллельно с определением особенностей поведения метки в основных гидрологических створах, проведено опробование водотоков с последующим анализом гидрохимических проб для получения данных о химизме главных ионов и металлов в поверхностных водах.

На изучаемом участке наблюдаются лишь два видимых притока: небольшой ручеек из «кислых прудков» (прудки, сформированные над устьями затопленных шахт Сталинского рудника на юго-западной окраине города с дебитом 0,25 л/сек 30.09.2004 г.) и «Рыжий ручей». Основное воздействие на главный водоток оказывают сульфидно-силикатные отходы обогатительной фабрики, работавшей здесь с 1934 г., в результате чего в речку было сброшено около 6 млн. т отходов. И только с 1952 г. было организовано первое изолированное хранилище отходов. Расположенные в долине речки отходы, одним из продуктов преобразования которых, являются кислые воды с рН 3–4, за последние 70 лет «выжгли» все живое в долине р. Сак-Элга [1, 3, 4].

### Методика эксперимента

*Опробование и анализ.* Введение литиевой метки происходило в точке Ф (рис. 1), чуть ниже истока р. Сак-Элга из Богородского пруда. Исследуемый участок водотока был условно разделен на 4 зоны, в пределах которых наблюдаются видимые притоки. Исходя из обозначенных зон, производилось опробование (см. рис. 1). Предварительно, до введения метки, во всех точках отобраны пробы для определения природных концентраций Li.

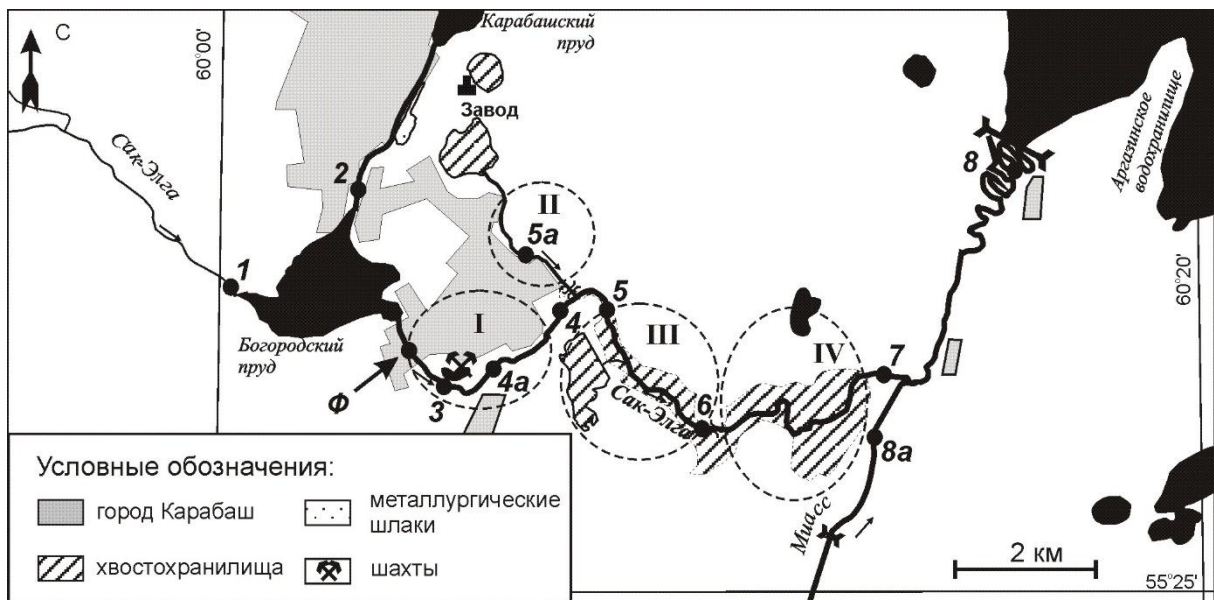


Рис. 1. Схема опробования водораздела р. Сак-Элга, согласно условно выделенным 4 зонам, с потенциальными скрытыми притоками (I – «Кислые прудки», II – «Рыжий ручей», III – «Хвостохранилище Новое», IV – «Шламная долина р. Сак-Элга»)

В водоток вводили раствор LiCl, с концентрацией Li – 50 мг/л. Эксперимент проводили 13 октября 2004 г. Капельная установка, установленная в центральной части водотока, поддерживала норму введения X-снаряда 500 мл/мин (0,0083 л/с) [9]. Эксперимент продолжался в течение 14-ти часов, что, с учетом скорости водотока, позволило осуществить опробование на всей протяженности участка исследований. Соли Li (хлориды и бромиды) или Na являются наиболее подходящими индикаторами. Литий работает хорошо в водотоках с низким рН [7]; Cl и Br, напротив, предпочтительны для водотоков с высоким рН. Превышения фоновых концентраций Li и Br в горных водоразделах встречаются редко. Несмотря на то, что в водоток вводятся растворы с повышенной концентрацией соли, концентрация ее в потоке только несколько мг в литре, и не оказывает вредного воздействия на водные организмы. Другие индикаторы, имеют ряд недостатков, являясь неустойчивыми при низких значениях рН и сорбируясь органическим субстратом в зоне гипергенеза. Основные принципы и процедуры методов введения индикатора представлены в работах [8, 11].

Отбор проб проведен в 1,5-литровые емкости из полипропилена, дважды сполоснутые деионизированной водой (установка Millipore, США). Гидрохимические пробы были отфильтрованы через мембранные фильтры Whatman с размером пор 0,45 мкм. Анионный состав определен стандартными аналитическими методами [5]: титриметрия, турбидиметрия, гравиметрия, фотоколориметрия (КФК-2), определение рН, Eh (рН-метр Yokogawa 8221-E), и  $\gamma$  вод (кондуктометр HI-933000). Содержания металлов, включая Li, определены методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Perkin-Elmer 3110 в пламенном варианте. Этот метод анализа обеспечивает предел обнаружения микроэлементов в диапазоне 0,1–0,01 мг/л, что является достаточным для анализа многих природных объектов (воды, породы, почвы, растения). Точность метода 1–3 %. Более низкие концентрации элементов определены на атомно-абсорбционном спектрометре Analyst 300 с электротермическим режимом атомизации, с пределом обнаружения по Pb – 0,2 мкг/л, по Cd – 0,02 мкг/л.

Все аналитические исследования выполнены в Южно-Уральском центре коллективного пользования по исследованию минерального сырья, г. Миасс (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.514536).

*Определение дебитов.* Схема (рис. 2) и основные формулы, использовавшиеся для расчета [9], приведены ниже:

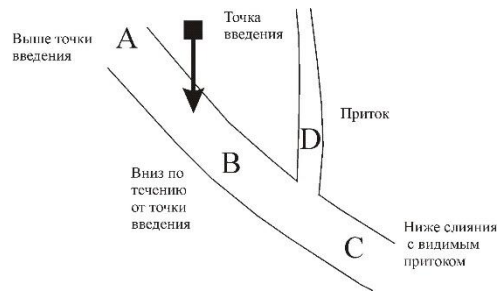


Рис. 2. Схема буквенного обозначения участков опробования для расчета объемов скрытых притоков

Уравнения, определяющие расчетные количества водотоков с использованием Li-метки:

1. Массовый баланс вниз по течению от точки введения Li-метки:

$$M_B = C_B Q_B = C_A Q_A + C_{BB} Q_{BB};$$

$$Q_B = Q_A + Q_{BB},$$

где  $Q_{BB}$  – расход раствора хлорида Li,  $C_{BB}$  – концентрация Li в растворе,  $C_B$  – концентрация на участке В,  $Q_B$  – дебит участка В,  $C_A$  – концентрация на участке А,  $Q_A$  – дебит на участке А.

2. Дебит реки на первом участке вниз по течению от введения Li-метки:

$$Q_B = Q_{BB} (C_{BB} - C_A) / (C_B - C_A).$$

3. Дебит реки на последующих вниз по течению участках с однородными концентрациями фона:

$$Q_C = Q_B (C_B - C_D) / (C_C - C_D);$$

$$Q_C = Q_{BB} (C_{BB} - C_A) / (C_C - C_A),$$

где  $C_C$  – концентрация Li на участке вниз по течению,  $Q_C$  – дебит на участке вниз по течению.

### Обсуждение результатов

Дебит водотоков определялся по описанной выше методике, с использованием изменения концентрации Li (рис. 3а), вводимого в водную систему.

На графике наблюдается уменьшение концентрации Li от 0,76 до 0,12 мг/л по удалению от точки введения X-метки, что происходит в результате разбавления водами видимых или скрытых притоков (см. рис. 3а). Видно, что на протяжении первых 8000 м снижение концентрации Li небольшое, местами наблюдается повышение концентрации. Это происходит вследствие привноса притоками существенных «естественных» концентрации Li (табл. 1), когда при низких рН в условиях сернокислой среды происходит мобилизация Li из отходов добычи и обогащения руд и переход в водную среду.

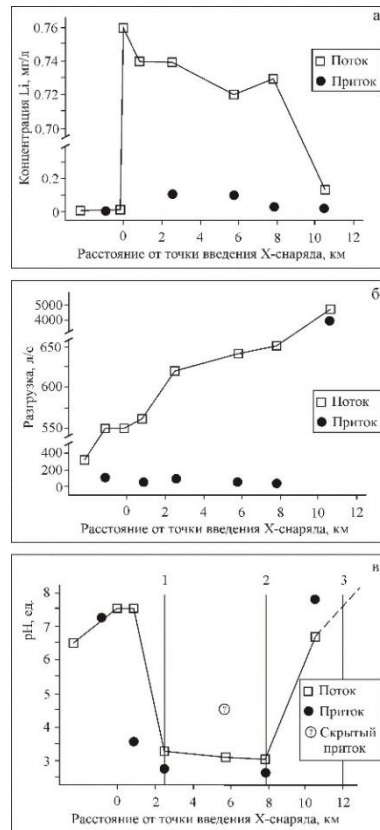


Рис. 3. а) график распределения Li по удалению от точки введения, р. Сак-Элга;  
б) график изменения дебита водотока в точках наблюдения, р. Сак-Элга;  
в) изменение величины pH водотока по удалению от точки введения:  
1 – фоновый участок (до воздействия кислых водотоков),  
2 – влияние техногенных объектов, 3 – разбавление водами р. Миасс

Таблица 1

Дебит поверхностных и скрытых водотоков по результатам эксперимента

Место отбора	№ пробы (рис. 1)	Расстояние от точки ввода, м	Li прир., мг/л	Li прир. +введ., мг/л	Расчитанный дебит, л/с	Дебит (Челобл-гидро-мет), л/с
р. Сак-Элга	1	–	<0,01	0,01	–	380
р. Серебрянка	2	–	0,03	0,01	–	175
р. Сак-Элга (ввод LiCl)	Ф	0	0,01	0,01	553,3	–
р.Сак-Элга	3	50	0,01	0,76	553,3	–
Воды «Кислых прудков»	4а	950	0,15	0,12	15	–
р. Сак-Элга	4	2450	0,01	0,74	568,5	560
«Рыжий ручей»	5а	2500	0,12	0,13	51,7	53
р. Сак-Элга	5	4200	0,03	0,74	620	–
р. Сак-Элга	6	5750	0,02	0,72	637,7	690
р. Сак-Элга	7	7750	0,02	0,73	647	–
р. Миасс	8а	8250	<0,01	0,01	4127	–
р. Миасс	8	10000	0,01	0,12	4774	–

Дебит водотока Сак-Элга и притока р. Серебрянка до Богородского пруда был взят по ориентировочным неопубликованным данным Челябинского гидромет. В точке введения Li-метки расчет дебита производился по формуле (3), с проверкой массового баланса Li в соответствии с формулой (1, 2). Для последующих участков водотоков при расчете использовались формулы (4, 5). Полученные в результате расчетов данные приведены в таблице 1.

Из таблицы следует, что на всех обозначенных нами и перечисленных ранее участках обнаруживается приток воды в различных объемах. Причем на участке «Кислые прудки» при видимом дебите 0,25 л/сек суммарный скрытый дебит составляет по расчетам 15 л/сек. Можно, с достаточной степенью достоверности, предположить существование двух основных источников дополнительного питания р. Сак-Элга на этом участке – приток хозяйственных городских вод и подземные воды шахтных выработок.

На участке «Рыжий ручей» воды дополнительного притока имеют поверхностное происхождение, они визуально хорошо фиксируются и впадают в р. Сак-Элга объемом 51,7 л/сек (30.09.2004 г.). Рассчитанная величина этого притока хорошо согласуется с данными прямых замеров в этом гидрологическом створе. На участках «Хвостохранилище Новое» и «Шламовая долина» видимых притоков не наблюдается. На этих участках скрытые притоки составляют 17 л/сек и 10 л/сек соответственно (см. табл. 1, рис. 3б).

Таким образом, на исследованном участке р. Сак-Элга (до р. Миасс) пополняется дополнительными водами в размере 106 л/сек, что составляет 19 % от дебита реки в начале участка исследования. Следует отметить, что воды, пополняющие водоток, являются техногенными водами с очень низкими показателями pH (рис. 3в, табл. 2).

Окислительно-восстановительные и кислотнo-щелочные условия среды определяют общую картину геохимической обстановки в системе, существование и направленность геохимических процессов. Отображенная в таблице 2 пониженная кислотность определяет физико-химические параметры вод.

Для природных систем немалое значение для процессов «самоочищения» имеет удаленность от источника загрязнения, протяженность водотока и разбавление водами притоков. Поскольку изучаемый нами участок водотока протекает среди хвостов с большим содержанием пирита (pH 3–5 на всем протяжении), то здесь главным фактором снижения концентраций тяжелых металлов является разбавление водами притоков с увеличением показателя pH [2]. Такая закономерность проявляется и для всех типоморфных для данной геотехнической системы металлов (рис. 4).

Таблица 2

Физико-химические параметры поверхностных вод Карабашской ГТС

№	1	2	Ф	5а	4	5	8	7	8а
pH	6,53	7,01	7,21	2,89	7,26	3,32	7,07	3,46	7,93
Eh, мВ	239	255	240	432	250	444	245	545	230
$\gamma$ , мкСм	102	956	416	3710	475	1149	480	971	349
мг/л (н.а. – не анализировано)									
HCO <sub>3</sub>	42	85	58	нет	72	нет	110	нет	143
Cl <sup>-</sup>	30,1	2,1	14,6	127,6	11,7	16,0	20,7	12,8	21,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	283	22	130	3560	128	289	50	215	15
Ca	22	13	48	335	53	107	50	106	34
Mg	4,7	30	16	200	19	62	27	20	20
K	1,6	13	5,1	7,5	5,6	5,7	4,4	5,7	3,9
Na	4,9	34	15	27	14	17	13,5	16	12,5
Fe	0,08	1,0	0,2	430	0,01	54	7,7	32,5	0,03
Mn	0,004	2,1	0,2	31	0,3	6,9	1,2	4,4	0,005
Cu	0,02	0,1	0,02	20	0,02	4,1	0,3	2,1	0,01
Zn	0,1	9,8	0,9	60	0,9	12	1,5	5,3	0,1
Ni	0,01	н.а.	0,02	2,1	0,03	н.а.	н.а.	н.а.	0,09
Co	0,004	н.а.	0,01	1,7	0,005	н.а.	н.а.	н.а.	0,003
Pb	0,1	0,01	н.а.	0,8	0,06	н.а.	0,02	0,4	0,01
Cd	0,00002	0,01	0,0002	0,3	0,0002	0,03	0,0003	0,01	0,00001
Ba	0,1	н.а.	0,4	28	0,4	н.а.	н.а.	н.а.	0,2
Sr	0,06	0,3	0,1	1,0	0,1	0,25	0,1	0,2	0,08
Li	<0,01	0,03	0,01	0,1	0,01	0,03	0,01	0,02	н.а.
Al	0,1	0,02	0,02	40	0,02	0,05	0,004	0,05	0,007

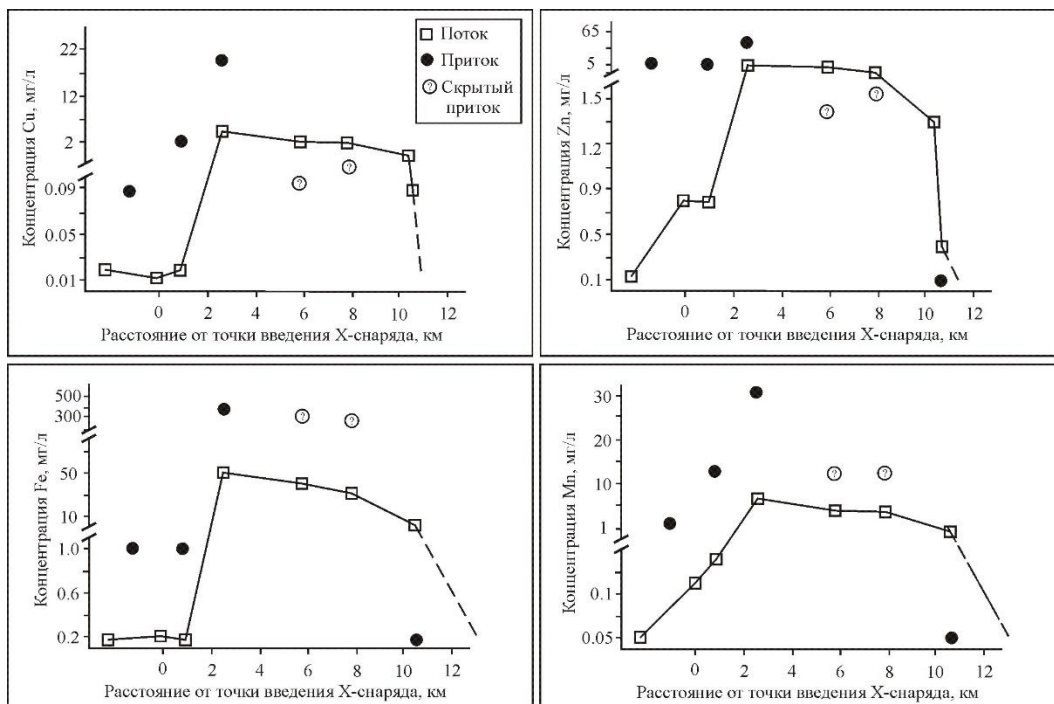


Рис. 4. Изменения концентрации типоморфных техногенных металлов в р. Сак-Элга с удалением от точки введения X-метки

### Выводы

Проведенные исследования показали возможность точного определения дебита не только видимых, но и скрытых притоков при помощи Li-метки. Сравнение результатов с неопубликованными данными Челябинсблгидромета, полученными классическими приемами гидрологических исследований (метод прямых замеров в основных гидрологических створах) позволяет сделать следующие выводы:

– рассматриваемый метод изучения позволяет точно определить дебит водотока. Расхождения с традиционно применяемым методом составляют не более 10 % отн.;

– метод позволяет выделить скрытые притоки и определить их объемы.

Принимая во внимание возможность искусственного изменения русла р. Сак-Элга в верхнем течении, следует отметить, что согласно полученным данным в исследуемом русле останется более 50 % стока, а это порядка 320 л/с в паводковый период и около 60 л/с в период межени. Причем с концентрациями тяжелых металлов, на порядки превышающими концентрации в сегодняшних условиях, при ультранизких значениях рН.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 14-17-00691).*

### Библиографический список

1. Аминов, П.Г. Изучение состава эпифитовзвеси для индикации горнопромышленного техногенеза / П.Г. Аминов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2008. – № 6. – С. 93–100.
2. Аминов, П.Г. Осадкообразование в водотоках, испытывающих воздействие отходов обогащения колчеданных руд Карабашской фабрики / П.Г. Аминов, Г.Ф. Лонцакова // Металлогения древних и современных океанов–2009. Модели рудообразования и оценка месторождений. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2009. – С. 319–324.
3. Удачин, В.Н. Геохимия геотехнических систем Южного Урала / В.Н. Удачин, Б. Вильямсон, П.Г. Аминов // Естественные и технические науки. – 2009. – № 6. – С. 298–306.
4. Удачин, В.Н. Химический состав и механизмы формирования кислых рудничных вод Южного Урала / В.Н. Удачин, Б. Вильямсон, Р. Китагава, Г.Ф. Лонцакова, П.Г. Аминов, Л.Г. Удачина // Вода: химия и экология. – 2011. – № 11. – С. 3–8.
5. Фомин, Г.С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. Энциклопедический справочник / Г.С. Фомин. – М.: Протектор, 2000. – 839 с.
6. Bencala, K.E. Characterization of transport in an acidic and metal-rich mountain stream based on a lithium tracer injection and simulations of transient storage / K.E. Bencala, D.M. McKnight, G.W. Zellweger // Water Resources Research. – 1990. – V. 26. – Pp. 989–1000.
7. Bencala, K.E. The Stability of Rhodamine WT Dye in Trial Studies of Solute Transport in an Acidic and Metal-Rich Stream / K.E. Bencala, D.M. McKnight,



G.W. Zellweger, J. Goad // Water-Supply Paper 2310. – US Geological Survey. – 1986. – Pp. 87–95.

8. Kilpatrick, F.A. Measurement of discharge using tracers / F.A. Kilpatrick, E.D. Cobb // In Techniques of Water-Resources Investigations of the US Geol. Surv. – US Geological Survey. – 1985. – Book 3, chapter A16.

9. Kimball, B. Assessment of metal loads in watersheds affected by acid mine drainage by using tracer injection and synoptic sampling: cement Creek, Colorado, USA / B. Kimball, R. Runkel, K. Walton-Day, K. Bencala // Applied Geochemistry. – 2002. – V. 17. – Pp. 1183–1207.

10. Runkel, R. A simulation-based approach for estimating premining water quality: Red Mountain Creek, Colorado / R. Runkel, B. Kimball, K. Walton-Day, P. Verplanck // Applied Geochemistry. – 2007. – V. 22. – Pp. 1899–1918.

11. Zellweger, G.W. Practical Aspects of Tracer-Injection Experiments in Acidic, Metal-Enriched Streams / G.W. Zellweger, K.E. Bencala, D.M. McKnight, R.M. Hirsch, B.A. Kimball. – US Geological Survey. – 1988. – Open-file Report 87–764. – Pp. 125–130.