

## ГЕОЭКОЛОГИЯ (НАУКИ О ЗЕМЛЕ)

УДК 502/504

**Методические основы использования природно-техногенных систем для очистки сточных вод****Т.И. Караваева, В.П. Тихонов**

Естественнонаучный институт Пермского государственного национально-исследовательского университета, 614990, Пермь, ул. Генкеля, 4

E-mail: georisk@psu.ru

*(Статья поступила в редакцию 4 апреля 2018 г.)*

Рассмотрены возможности использования аллювиально-техногенных отложений, образующихся при разработке россыпных месторождений в долинах рек, в виде фильтрационных полей для очистки вод от взвешенных веществ. Приведены результаты опытно-промышленных испытаний предложенной системы. Результаты внедрения показали ее высокую эффективность в различных геологических, гидрологических и технологических условиях разработки россыпных месторождений.

Ключевые слова: *очистка сточных вод от взвешенных веществ, фильтрационные поля, аллювиально-техногенные отложения.*

DOI: 10.17072/psu.geol.17.2.187

**Введение**

Разработка месторождений полезных ископаемых является сложнейшим видом хозяйственной деятельности, приводящим к созданию природно-техногенной системы с новыми свойствами и условиями функционирования, нарушениям целостности и качества лито- и гидросферы, негативным экологическим последствиям. На всех стадиях проектирования и освоения месторождений обязательным является применение эффективных и экономических методов очистки сточных вод, предотвращение загрязнения поверхностных водоемов и подземных вод отходами производства. Наиболее распространенным и проблемным загрязнителем поверхностных вод при отработке россыпных месторождений в долинах рек являются взвешенные вещества, которые относятся к одному из важнейших санитарных показателей качества природных и сточных вод (Вода..., 2002; Водоотведение..., 2000; Об утверждении..., 2016).

Анализ существующих в горнодобывающей промышленности способов очистки сточных вод от взвешенных веществ показал, что применяемые при разработке россыпных месторождений в долинах рек со значительным водопотреблением и водоотведением и высокими концентрациями взвешенных веществ системы очистки не позволяют соблюдать допустимые концентрации взвешенных веществ в водотоках, являются экономически неэффективными.

Комплексный анализ свойств аллювиально-техногенных отложений, образующихся при разработке месторождений полезных ископаемых, позволил разработать методические основы создания системы очистки сточных вод от взвешенных веществ в фильтрационных полях на полигонах гидромеханизированной и дражной разработки месторождений. В основе методики находятся новые свойства отложений, не характерные для естественного состояния геологической среды территории. Используя эти свойства, можно

управлять экологическим качеством всей природно-техногенной системы, существенно снижая негативное воздействие на окружающую среду.

### **Актуальность исследований**

Разработка россыпных месторождений в долинах рек приводит к созданию природно-техногенных систем и практически к одинаковым негативным последствиям для основных компонентов природной среды. Процесс разработки сопровождается значительными объемами сброса загрязненных сточных вод. Вследствие загрязнения поверхностных вод взвешенными веществами практически полностью уничтожается гидрофауна рек, в долинах которых производятся работы дражным или гидромеханизированным способом. В период промывочного сезона мутность водотоков ниже объектов промывки россыпей может достигать 15,29 г/дм<sup>3</sup>. Дальность миграции техногенных частиц во взвесах рек значительно превышает аналогичное значение для донных наносов и максимально оценивается величиной порядка 300 км (Ciszewski, 1997).

Анализ применяемых на практике систем очистки воды от взвешенных веществ показал их недостаточную экологическую и экономическую эффективность для условий разработки месторождений полезных ископаемых в долинах рек со значительным водопотреблением и водоотведением. Использование флокулянтов и коагулянтов при работе на прямотоке не допускается в связи с опасностью химического загрязнения реки. Электрохимические методы очень затратные и не обеспечивают очистку значительных объемов воды. Низкая эффективность очистки воды от взвешенных веществ в водоемах-отстойниках подтверждена проведенными независимыми исследованиями (Научно-исследовательские..., 2004). Эффективность очистки отстоем в весенний период может составлять всего 11 %, что не обеспечивает соответствие качества воды предъявляемым требованиям. Очистка

воды от взвешенных веществ фильтрующими плотинами (Зелинская и др., 2009) отличается низкой эффективностью и незначительным объемом очищаемой воды, максимально до 13 дм<sup>3</sup>/с, при расходе воды для технологического водоснабжения драги 200 дм<sup>3</sup>/с. Время заполнения порового пространства плотины взвешенными веществами на 75 % составляет около 40 суток (Максимович, 2005). Использование существующих способов очистки не обеспечивает соблюдение требований природоохранного законодательства Российской Федерации.

Разработанные авторами системы очистки сточных вод от взвешенных веществ позволяют минимизировать негативные воздействия на водотоки и обеспечить технологической водой обратное водоснабжение обогатительных приборов. Системы очистки прошли опытно-промышленные испытания на различных полигонах работ по добыче алмазов и золота и внедрены в производство.

### **Теоретические основы и методика исследований**

В природно-техногенных системах как последствиях хозяйственной деятельности человека формируются новые техногенные породы за счет дезинтеграции горных пород при добыче полезных ископаемых и их переработке (Талалай и др., 1996). В процессе недропользования природно-техногенная система создается с заранее неизвестными свойствами и функциями, что существенно снижает возможности ее практического использования. Свойства и возможности такой системы на практике не изучаются. Используя новые свойства, не характерные для естественного состояния геологической среды данной территории, можно управлять экологическим качеством всей природно-техногенной системы. Анализ состава песчаных аллювиально-техногенных отложений, образующихся в процессе дражной и гидромеханизированной отработки россыпных месторождений в долинах рек, показывает,

что они обладают свойствами фильтрующей загрузки промышленных фильтров и могут использоваться для очистки поверхностных вод от взвешенных веществ (Караваева и др., 2015). Фильтрационные и физические свойства песчаных отложений традиционно используются в промышленных зернистых фильтрах для очистки воды.

Теоретические основы очистки воды от взвешенных веществ в песчаных отложениях позволяют максимально использовать природные особенности этих отложений и выбрать наиболее эффективную технологию очистки при недропользовании. Твердые глинистые частицы суспензии могут механически задерживаться в порах песчаных отложений, а также вступать в физико-химическое взаимодействие с каркасом фильтрующих отложений и друг с другом с образованием коагуляционных связей. Проявление физического и механического поглощения глинистых частиц песком убедительно было доказано исследованиями Е.М. Сергеева (Сергеев, 1954; Сергеев и др., 1961). Роль адсорбционного поглощения глинистых частиц возрастает с ростом дисперсности песков в связи с тем, что мелкозернистые пески обладают повышенной удельной поверхностью, закономерно возрастающей по мере измельчения песков, и значительно большей поверхностной энергией по сравнению с крупнозернистыми песками. Техногенные образования, создаваемые в результате принудительной дифференциации по размеру частиц в процессе разработки россыпных месторождений, обладают широким спектром свойств, не изученных до настоящего времени.

Адсорбционное взаимодействие между глинистыми и песчаными частицами, коагуляция и структурообразование самих глинистых частиц, механическое поглощение частиц и агрегатов в порах песка составляют основу эффективной работы систем очистки от взвешенных веществ. Реализация этих процессов проведена в особой структуре системы очистки на по-

лигонах разработки месторождений, которая позволяет наиболее эффективно использовать свойства отложений для очистки воды от взвешенных веществ. В основе методики проведения опытно-промышленных исследований эффективности отложений, используемых в качестве фильтрационного поля для очистки воды от взвешенных веществ, находится выбор оптимального напора фильтрации воды, позволяющего очищать требуемый по технологическим нормам водоснабжения расход воды и достигать заданной степени очистки. Центральным звеном системы является собственно фильтрационное поле, в пределах которого создаются условия для наиболее эффективного механического осаждения взвешенных частиц из сточной воды в поровом пространстве. Эффективность очистки воды зависит от равномерного распределения взвесей по всему поровому пространству фильтрационного поля. Для решения этой задачи в зависимости от состава отложений и длины пути фильтрации экспериментально подбираются напоры воды на входе в фильтрационное поле. Создаются структурные элементы системы очистки: подводящая сточную воду траншея, напорная траншея, обеспечивающая напорную фильтрацию воды через фильтрационное поле, и траншея, отводящая очищенную воду. Эксплуатационные условия работы системы заключаются в определении значений, до которых допустимо увеличивать градиент напора или расход воды, сохраняя при этом ламинарный режим фильтрации воды в фильтрационном поле и обеспечивая наиболее эффективную очистку от взвешенных веществ.

Опытно-промышленные исследования эффективности разработанной системы проведены в различных геологических, гидрологических и технологических условиях разработки россыпных месторождений. Система очистки воды на дражном полигоне в Красновишерском районе Пермского края представляет собой участок долины реки в виде параллельно рас-

положенных каскадом напорных и отводящих водоемов, разделенных фильтрационными полями – переработанными драгой аллювиальными отложениями. После обогащения в процессе работы драги содержание песчаных фракций (2,0-0,05 мм) в фильтрационных полях из аллювиально-техногенных отложений со-

ставляет около 90%. Длина участка 310 м, ширина 50-70 м (рис. 1). Вода из дражного водоема направляется в «пазуху», проходящую вдоль всего участка работ по левому борту долины реки. Сток загрязненных вод оказывается на более высоких абсолютных отметках по сравнению с существующим руслом реки.



Рис. 1. Схема системы очистки воды в фильтрационных полях дражного полигона

Создание напора обеспечивается строительством подпорных фильтрующих перемычек в русле «пазухи». В результате создаются условия для фильтрации воды через песчаные отложения перпендикулярно долине в сторону существующего русла реки. Напорная фильтрация осуществляется фронтально по всей длине фильтрационных полей. Для отведения профильтрованной очищенной воды используются оставшиеся после дражной разработки понижения – отводящие водоемы. Вода из понижений отводится по каналам в русло реки.

Напор подаваемых на очистку загрязненных вод регулируется изменением высоты слива из напорных водоемов. В результате исследований выбраны напоры, обеспечивающие осаждение взвешенных веществ в поровом пространстве песка и очистку максимально возможного расхода воды. Оптимальное соотношение этих

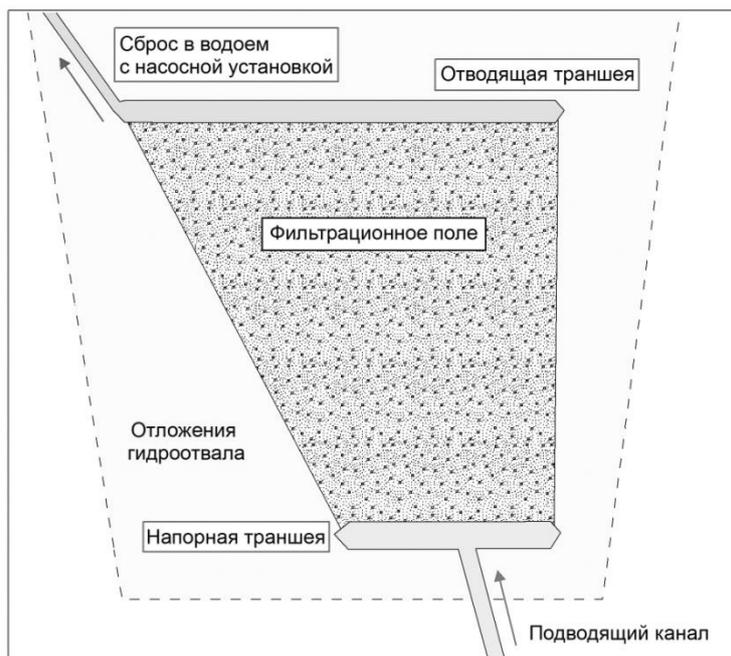
условий является критерием эффективности предлагаемой системы очистки.

В условиях эксплуатационного режима работы достигнута концентрация взвешенных веществ в очищенных водах ниже допустимых значений. Эксплуатационный режим работы системы очистки заключается в соблюдении рекомендованных уровней воды в напорных водоемах, которые обеспечивают допустимую концентрацию взвешенных веществ – 46,41 мг/дм<sup>3</sup>. Степень очистки сточных вод изменялась от 89,9 до 99,3 %. Расход очищаемой в фильтрационных полях воды составляет 0,368 м<sup>3</sup>/с, что превышает объем технологического водоснабжения 250-литровой драги, равный 0,2 м<sup>3</sup>/с. Высокая эффективность очистки поверхностных вод от взвешенных веществ определяется тем, что в качестве фильтра используется весь песчаный массив пло-

щадью 18600 м<sup>2</sup>, обладающий значительной сорбционной емкостью.

Методические основы очистки воды и практическая эффективность разработанной системы очистки проверены в других горно-геологических условиях. На полигоне работ обогатительной установки в Свердловской области проведены работы по очистке сточной воды в фильтрационных полях из намывных песков на место-

рождении золота, разрабатываемого гидромеханизированным способом. Структура системы очистки практически аналогична структуре при дражном способе разработки месторождений и состоит из подводящего канала, напорной траншеи, фильтрационного поля из отложений гидроотвала и отводящей очищенную воду траншеи (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема системы очистки оборотной воды в фильтрационных полях в отложениях гидроотвала

По результатам выполненного гранулометрического анализа отложений гидроотвала, используемых в качестве фильтрационного поля, установлено, что отложения относятся к гравийным грунтам. Весовая доля песчаной фракции (2,0-0,05 мм) в отложениях гидроотвала составляет 41,2%.

Испытания системы начинались с заполнения сточной водой напорной траншеи. Предварительно на дне напорной траншеи была установлена мерная рейка и произведена привязка по высоте всех значимых элементов системы в относительной системе высот. Заполнение водой напорной траншеи производилось постепенно, чтобы равномерно распределить поток фильтрующейся воды в фильтраци-

онном поле. При уровне в напорной траншее 1,32 м началось интенсивное высачивание воды с борта отводящей траншеи и формирование постоянного стока воды. При повышении уровня воды до 1,7 м на дне отводящей траншеи сформировались постоянное русло и постоянный расход отводимой воды. Концентрации взвешенных веществ в очищенной воде из отводящей траншеи практически одновременно с формированием постоянного стока воды достигли оптимальных значений для геологических условий полигона и незначительно изменялись с течением времени проведения эксперимента. Степень очистки воды от взвешенных веществ достигала 99,9%. Напорный градиент не более 0,128. Полученные парамет-

ры опытно-промышленной системы очистки воды рекомендованы в качестве эксплуатационных (Тихонов и др., 2013). Достигнутая степень очистки воды при эксплуатационном режиме работы системы доказывает принципиальную возможность получения воды нормативного качества при использовании отложений гидроотвала в качестве фильтрационного поля.

### Обсуждение результатов работ

Система очистки сточных вод, состоящая из параллельно расположенных напорных и отводящих водоемов, разделенных фильтрационными полями из песчаных аллювиально-техногенных отложений, позволяет получать допустимую концентрацию взвешенных веществ в поверхностных водах и необходимый расход технологической воды для оборотного технологического водоснабжения. Анализ промышленных систем очистки воды от взвешенных веществ показывает, что они имеют высокую стоимость и значительные эксплуатационные затраты. Исходная концентрация взвешенных веществ в очищаемой воде не превышает  $1000 \text{ мг/дм}^3$ . На полигонах драг концентрация в сбрасываемых водах может достигать  $10000 \text{ мг/дм}^3$ , а на полигонах гидромеханизированной разработки месторождений  $34200 \text{ мг/дм}^3$ . Степень очистки технологических вод достигает 99 %. Производительность существующих систем в десятки раз ниже предлагаемой авторами системы, что не позволяет очищать минимально необходимый расход технологических вод.

Капитальные затраты на сооружение разработанной системы очистки отсутствуют. Эксплуатационные затраты минимальны и заключаются в использовании бульдозера в количестве не более 8-10 машино-смен за сезон для поддержания эксплуатационной высоты порога слива фильтрующей дамбы и 1-2 машино-смен работы экскаватора для зачистки фронтального откоса в напорных транше-

ях, чтобы удалить закольматированный слой отложений.

Высокая эффективность очистки поверхностных вод от взвешенных веществ определяется тем, что в качестве фильтра используется весь объем фильтрационного поля из преимущественно песчаной фракции аллювиально-техногенных отложений, достигающий  $40\,000 \text{ м}^3$  и обладающий значительной емкостью осаждения взвешенных частиц. Комплексные свойства пористой системы – механическое осаждение и адсорбционные возможности – значительно повышают эффективность работы фильтрационно-сорбционной системы. Результаты внедрения в ЗАО «Уралалмаз» разработанной системы очистки показали ее высокую эффективность.

Область практического применения системы очистки определяется следующими основными условиями: использованием поверхностных вод в технологическом цикле и наличием в долине реки участков с преобладанием песчаных фракций в аллювиальных отложениях. Других ограничений практически нет. Этим условиям соответствует большинство месторождений, разрабатываемых в долинах рек, независимо от вида полезного ископаемого.

### Выводы

Формализация свойств аллювиально-техногенных отложений природно-техногенных систем в целях использования для очистки воды от взвешенных веществ фильтрованием показывает, что отложения, представленные преимущественно песчаной фракцией, принципиально соответствуют требованиям к зернистой загрузке промышленных фильтров. В теоретическом отношении эти отложения следует рассматривать как фильтрационно-сорбционную систему, перспективную для детального изучения. Практическое использование отложений природно-техногенных систем осуществляется в виде фильтрационного поля с напорной фильтрацией на входе и отведе-

нием очищенной до заданных значений воды на выходе. Эксплуатационные напоры в системе подбираются в зависимости от геологических, гидрологических и технологических условий полигона разработки россыпных месторождений в целях организации оборотного водоснабжения при разработке россыпных месторождений.

### Библиографический список

*Вода* и водоподготовка. Термины и определения: ГОСТ 30813-2002 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.complexdoc.ru>.

*Водоотведение* населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод: СанПиН 2.1.5.980-00 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gostrf.ru>.

*Об утверждении* нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Утв. Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 года № 552 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420389120>.

*Научно-исследовательские работы* для разработки технологии очистки дренажных стоков до ПДС на объектах ЗАО «Уралалмаз»: отчет о НИР (заключительный) / ФГНУ ЕНИ; рук. С.М. Блинов. Пермь, 2004. 75 с.

*Зелинская Е.В., Тальгамер Б.А., Киселева М.А.* и др. Разработка рекомендаций по природоохранным мероприятиям при дренажном способе переработки песков месторождения р.

Ирелях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т.15, № 12. С. 247-256.

*Максимович Н.Г.* Создание искусственных механических барьеров для очистки сточных вод россыпных месторождений // Россыпи и месторождения кор выветривания: факты, проблемы, решения: тез. докл. XIII Междунар. совещ. Пермь, 2005. С. 149-152.

*Талалай А.Г., Макаров А.Б., Глушкова Т.А.* Основы литотехногенеза // Техногенез и экология: инф. тем. сб./ НТО «Горное». Екатеринбург, 1996. С. 4-17.

*Караваева Т.И., Тихонов В.П.* Природно-техногенные системы: экологические перспективы использования: монография / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. 150 с.

*Сергеев Е.М., Куприна Г.А.* Исследование кольматации песков на опытных котлованах // Тр. совещ. по теор. основам техн. мелиор. грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1961.

*Сергеев Е.М.* Роль химико-минералогического состава вещества в процессе кольматации песков // Вестник. Моск. ун-та. 1954. № 10.

*Тихонов В.П., Караваева Т.И., Наумова О.Б., Бардиж А.Ю.* Методическое обоснование исследований по очистке воды в отложениях гидроотвала обогатительной установки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/111-10391>.

*Ciszewski D.* Source of pollution as a factor controlling distribution of heavy metals in bottom sediments of Chechlo River (south Poland) // Environ. Geol. 1997. Vol. 29. № 1-2. P. 50-57.

## Methodical Principles of Using the Natural and Technogenic Systems for Wastewater Treatment

**T.I. Karavaeva, V.P. Tihonov**

Natural Sciences Institute of the Perm State University, 4 Genkelya Str., Perm 614990, Russia. E-mail: [georisk@psu.ru](mailto:georisk@psu.ru)

The feasibility of usage the alluvial-technogenic alluvial deposits developed in river valleys for the purification of wastewaters from suspended solids is considered. Practical use of alluvial-technogenic deposits of natural-technogenic systems is implemented in the form of filtration fields. Results of experimental industrial tests of the proposed system for water purification from suspended solids using filtration fields are present-

ed. The results of usage of the developed purification system have shown its high efficiency in various geological, hydrological and technological conditions.

Key words: *wastewater treatment; suspended solids; filtration fields; alluvial-technogenic deposits.*

## References

- Voda i vodopodgotovka. Terminy i opredeleniya* [Water and water treatment. Terms and Definitions]. GOST 30813-2002, COMPLEXDOC: Normativnye dokumenty. URL: <http://www.complexdoc.ru> (Accessed 05.14.2018)
- Vodootvedenie naseleennykh mest, sanitarnaya okhrana vodnykh obyektoy. Gigienicheskie trebovaniya k okhrane poverkhnostnykh vod* [Drainage of populated areas, sanitary protection of water bodies. Hygienic requirements for the protection of surface waters]. SanPiN 2.1.5.980-00 [Elektronnyy resurs]. Gosty, standarty, normativy. URL: <http://www.gostrf.ru>. (Accessed 04.24.2018) (in Russian)
- Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh obyektoy rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predelno dopustimyykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh obyektoy rybokhozyaystvennogo znacheniya* [On the approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance]. Elektronnyy fond pravovoy i normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420389120>. (Accessed 04.14.2018) (in Russian)
- Nauchno-issledovatel'skie raboty dlya razrabotki tekhnologii ochistki drazhnykh stokov do PDS na ob'yektakh ZAO «Uralalmaz»* [Research works for the development of the technology for cleaning the drains to the PDS at the facilities of CJSC "Uralalmaz"]. FGNU ENI, Perm, 2004. p. 75. (in Russian)
- Zelinskaya E.V. et al.* 2009. Razrabotka rekomendatsiy po prirodookhrannym meropriyatiyam pri drazhnom sposobe pererabotki peskov mestorozhdeniya r. Irelyakh [Development of recommendations on environmental measures in the process of dradging of sand deposits of the Irelyakh river]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 15(12):247-256. (in Russian)
- Maksimovich N.G.* 2005. Sozdanie iskusstvennykh mekhanicheskikh baryerov dlya ochistki stochnykh vod rossypnykh mestorozhdeniy [Creation of artificial mechanical barriers for treatment of placer deposits wastewater]. In *Rossypi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya: fakty, problemy, resheniya*. Perm, pp. 149-152. (in Russian)
- Talalay A.G. et al.* 1996. Osnovy litotekhnogeneza [Fundamentals of lithotechnogenesis]. In *Tekhnogenez i ekologiya*, NTO Gornoe, Ekaterinburg, pp. 4-17. (in Russian)
- Karavaeva T.I. Tikhonov V.P.* 2015. Prirodno-tekhnogennyye sistemy: ekologicheskie perspektivy ispolzovaniya [Natural and technogenic systems: ecological prospects of usage]. PGU, Perm, p. 150. (in Russian)
- Sergeev E.M., Kuprina G.A.* 1961. Issledovanie kolmatatsii peskov na opytnykh kotlovanakh [Investigation of sand colmatation on experimental excavations]. In *Tr. soveshch. po teor. osnovam tekhnich. melior. gruntov*. MGU, Moskva. (in Russian)
- Sergeev E.M.* 1954. Rol khimiko-mineralogicheskogo sostava veshchestva v protsesse kolmatatsii peskov [The role of the chemical-mineralogical composition of the substance in the process of sand colmatization]. *Vestn. Mosk. univ.*, n. 10. (in Russian)
- Tikhonov V.P., et al.* 2013. Metodicheskoe obosnovanie issledovaniy po ochistke vody v otlozheniyakh gidrootvala obogatitel'noy ustanovki [The methodological rationale of the studies on water purification in the deposits of the concentration plant]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, n. 5. URL: <http://www.science-education.ru/111-10391>. (Accessed 02.15.2018) (in Russian)
- Ciszewski D.* 1997. Source of pollution as a factor controlling distribution of heavy metals in bottom sediments of Chechlo River (south Poland). *Environ. Geol.* 29(1-2):50-57.