

УДК 556.31

В.В. КУЛАКОВ

## Использование внутрипластовой очистки подземных вод от железа и марганца (на примере водоснабжения г. Хабаровск)

*Приводятся результаты опытно-промышленной эксплуатации (2007–2011 гг.) пилотной установки внутрипластовой очистки воды от железа и марганца на Тунгусском водозаборе подземных вод г. Хабаровск, характеризующихся высоким содержанием железа и марганца на фоне низких значений pH и большого содержания растворенной углекислоты. На основе анализа данных качественного состава воды из наблюдательных скважин, расположенных на различном расстоянии от эксплуатационных и в разных слоях водоносного горизонта, дана схематическая визуализация размеров зоны осадконакопления вокруг эксплуатационных скважин. По результатам работы пилотной установки выполнен рабочий проект водозабора с внутрипластовой очисткой производительностью 106 тыс. м<sup>3</sup>/сут.*

*Ключевые слова:* некондиционные подземные воды, железо, марганец, водоподготовка в пласте.

**Use in situ treatment of groundwater from iron and manganese (by the example of water supply in Khabarovsk).**  
V.V. KULAKOV (Institute of Water and Ecological Problems FEB RAS, Khabarovsk).

*Results of pilot operation (2007–2011) of the pilot water-treatment facility on the Tungus water supply in Khabarovsk in situ groundwater treating from iron and manganese are resulted. Ground waters are characterized by the high maintenance of iron and manganese against the low pH values and the big maintenance of the dissolved carbonic acid. On the basis of the data analysis of qualitative structure of water from the observant wells located on various distance from exploitation wells and in different layers of aquifer, schematic visualization of the sizes of deposition zone around exploitation wells is given. By results of work of the pilot facility the equipment design of the water supply with in situ clearing by productivity of 106 thousand m<sup>3</sup>/day is executed.*

*Key words:* sub-standard groundwater, iron, manganese, treatment in the aquifer.

Территория Приамурья входит в провинцию железосодержащих и марганецсодержащих пресных подземных вод Дальнего Востока России с низкими концентрациями фтора. Содержание железа в подземных водах – от 10–20 до 30–50 мг/л, концентрация марганца – 1–8 мг/л, что существенно превышает нормативы предельно допустимых концентраций этих компонентов для питьевых вод (0,3 и 0,1 мг/л, соответственно). В то же время в подземных водах наблюдается дефицит фтора – 0,3 мг/л и менее при биологической норме около 1,5 мг/л.

Площади распространения подземных вод с повышенными концентрациями железа и марганца на территории приурочены к артезианским бассейнам и долинам рек, выполненным рыхлыми осадочными отложениями. Необходимо отметить, что именно с водами этого качества, не соответствующего нормативным показателям для питьевых вод и требующего проведения водоподготовки, связаны все крупные месторождения подземных вод территории с обеспеченными запасами, снабжающие водой крупные города и поселки.

Цель исследований – оптимизация источников водоснабжения населения региона, выбор экологически предпочтительной и экономически рациональной технологии подготовки питьевой воды за счет использования некондиционных подземных вод.

КУЛАКОВ Валерий Викторович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник (Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск). E-mail: vvkulakov@mail.ru

Для очистки некондиционных подземных вод от железа и марганца при подготовке питьевой воды применяют две принципиально разные группы технологий: на поверхностных станциях обезжелезивания и деманганации и непосредственно в водоносном горизонте. При таких высоких концентрациях в подземных водах железа и марганца, какие характерны для Дальнего Востока и других регионов России, на поверхностных установках возможна только многоступенчатая очистка с использованием нескольких реагентов. При этом возникают экологические проблемы, связанные с утилизацией промывных вод и шламов.

Выполненные в 1990-х годах специальные обследования более чем 100 станций обезжелезивания на водозаборах подземных вод Дальнего Востока показали, что практически все они работают неудовлетворительно [2].

Единственной безотходной технологией обработки некондиционных подземных вод, содержащих избыточные концентрации нормируемых компонентов, является внутриводопластовая их очистка, успешно используемая в России уже более 10 лет, а за рубежом известная более 100 лет [1, 4–6]. Успешное применение данной технологии возможно на новых или реконструируемых водозаборах, запроектированных с учетом всех специальных требований, предъявляемым к системам подземной очистки воды.

Очистка подземных вод от повышенных концентраций железа в водоносном горизонте при использовании их для питьевых нужд населения впервые применена в Германии, на что имелся патент 1901 г. [2, 6]. Способ обезжелезивания подземных вод в пласте, известный сейчас как технология VYREDOX [5], разработан и запатентован в Финляндии в 1969 г., в СССР его авторам выдано авторское свидетельство на изобретение (№ 310442 от 13.02.1970 г.), и дальнейшее развитие получил в Швеции. В СССР с 1980 г. силами ВНИИ ВОДГЕО проводились комплексные гидрогеохимические и технологические исследования по обезжелезиванию подземных вод в пласте на более чем 40 объектах в Европейской части СССР, Западной Сибири и Дальнего Востока. В 1985 г. технология внутриводопластовой очистки подземных вод рекомендована к широкому внедрению [1].

К настоящему времени, в основном за рубежом, действуют несколько тысяч установок обезжелезивания и деманганации подземных вод в пласте – односкважинные (типа Fermanox) и дуплетные (двухскважинные) установки циклического действия типа SUBTERRA, а также многоскважинные установки типа VYREDOX (BioEcoTech) циклического или постоянного действия [5, 6].

В основу технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном пласте заложена возможность искусственного создания в нем на участках водозаборных скважин гидрогеохимических зон, резко отличающихся по окислительно-восстановительным условиям от природных [3, 4]. Технология обезжелезивания и очистки некондиционных подземных вод в пласте соответствует условиям, которые создает сама природа с помощью различных типов бактерий при изменении гидрогеохимической обстановки с восстановительной на окислительную за счет насыщения воды кислородом непосредственно в водоносном горизонте [2].

При искусственном насыщении подземных вод кислородом и при удалении избыточных концентраций растворенного  $\text{CO}_2$  на участках водозаборных скважин происходит изменение состояния среды с восстановительной на окислительную [2]. Водовмещающие породы пласта, окружающие скважины в районе фильтров, и размножившиеся в порах или трещинах пласта железо- и марганецпоглощающие бактерии при откачке из скважины начинают работать как медленные фильтры, способствуя биогеохимическому окислению железа и марганца и осаждению их нерастворимых соединений в поровом (трещиноватом) пространстве.

В период эксплуатации водозаборных скважин поддерживается динамическое равновесие (циклы откачки воды сменяются циклами насыщения подземных вод кислородом) таким образом, чтобы содержание железа и марганца в откачиваемой из скважины воде за



Рис. 1. Формирование биогеохимического реактора по подготовке питьевых подземных вод в водоносном горизонте у эксплуатационной скважины

эксплуатационные скважины (рис. 1), так и через расположенные вокруг каждой из них специальные инъекционные (наливные или спутниковые) скважины.

Хотя продукты химических реакций остаются в водоносном горизонте, можно не опасаться закупорки водоносного пласта. Расчеты показывают, что при сроке эксплуатации 100 лет произойдет уменьшение гидравлически эффективного потенциала пор до максимального значения 9,0%, т.е. сроки возможного получения питьевых подземных вод при эксплуатации водоносного горизонта по технологии *in situ* намного превосходят сроки эксплуатации самих скважин.

Начиная с 1990-х годов в Приамурье и на Тунгусском месторождении некондиционных подземных вод ведутся комплексные исследования качества воды в условиях естественного состояния подземных вод и при техногенных технологических процессах в период работы установок водоподготовки подземных вод в пласте [3, 4].

В 1993–2006 гг. специалисты Водоканала г. Хабаровск ознакомились более чем с 30-летним опытом эксплуатации водозаборов с очисткой подземных вод от железа и марганца в пласте по технологиям SUBTERRA и VYREDOX в Словакии, Германии и Швеции [3]. В результате предпочтение было отдано технологии SUBTERRA, обеспечивающей надежность и простоту управления технологическим процессом водоподготовки питьевых подземных вод [6]. В 2007–2011 гг. выполнена ее апробация на Тунгусском водозаборе г. Хабаровск [2].

Пилотная установка включала 3 эксплуатационные (1105, 1106 и 1108) и 14 наблюдательных скважин, а также узел обогащения кислородом и распределения закачиваемой воды [3]. В целях использования подземных вод с повышенным содержанием ионов железа и марганца для питьевых нужд предусмотрено активизировать природный потенциал железомарганцевых бактерий путем искусственного насыщения кислородом водоносных горизонтов (в природных условиях величины pH и Eh недостаточно высокие, чтобы происходило окисление железа и марганца). При искусственном насыщении подземных вод кислородом Eh увеличивается от 0 (-10...-30) до 250–400 mV, pH повышается от 6 до 7 и более. Обезжелезивание и деманганация воды наиболее активно происходят на границе вода–порода, где осуществляются химическая адсорбция, ионный обмен и микробиологические процессы. После определенного промежутка времени, связанного с циклами откачки–закачки, вокруг скважин образуется биогеохимический барьер, на котором и происходят процессы очистки подземных вод [2].

Для сорбции кислорода на поверхности частиц породы пласта и увеличения биомассы железо- и марганцеокисляющих бактерий требуется определенное время. Снижение содержания растворенных в воде железа и марганца происходит за счет образования гидратов окислов и их аккумуляции в биомассе бактерий, прикрепленных на частицах пород водоносного горизонта [2]. Окисление марганца происходит вне клетки

весь период откачки не превышало нормативного значения.

Таким образом, основы технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод в пласте опираются на естественные природные окислительно-восстановительные процессы по созданию искусственных биогеохимических барьеров за счет насыщения подземной воды кислородом непосредственно в водоносном горизонте.

Процесс обогащения подземных вод кислородом воздуха (или закачки–налива азрированной воды) может осуществляться как непосредственно через

хемоорганотрофных бактерий и стимулируется повышением концентрации кислорода. Время генерации поколения марганцеоксиляющих бактерий составляет несколько недель, в то время как у других бактерий при благоприятных условиях оно может составлять 6 ч.

Следует отметить, что Тунгусское месторождение является уникальным по запасам подземных вод [2], обеспечивающим их расход в объеме 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в том числе для первоочередного промышленного освоения – 120 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Качественный же состав подземных вод месторождения не соответствует требованиям СанПиН, предъявляемым к источникам питьевого и хозяйственно-бытового назначения, и с точки зрения водоподготовки является весьма сложным.

При выборе наилучшей доступной технологии водоподготовки для Тунгусского месторождения предпочтение было отдано внутрислоевой очистке, так как расчеты показали, что в этом случае себестоимость 1 м<sup>3</sup> воды в 2,8 раза ниже, чем при очистке на традиционных наземных сооружениях.

Для окончательного обоснования целесообразности применения внутрислоевой очистки на Тунгусском месторождении проведены опытно-промышленные исследования. В соответствии с технологией SUBTERRA скважины 1105 и 1106 попеременно работали в режимах закачки и откачки с равной производительностью, составлявшей 140–160 м<sup>3</sup>/ч [3]. Избыточное количество откачиваемых подземных вод, которое не требовалось для насыщения кислородом и инфильтрации в эксплуатационную скважину 1105 или 1106, направлялось в скважину 1108. В процессе исследований варьировали объем закачиваемой и откачиваемой воды, соотношение объемов откачки и закачки, продолжительность времени простоя скважин после закачки.

Насыщение закачиваемой воды кислородом осуществляли в оксигенаторе, работающем по принципу эжектора. После оксигенатора вода поступала в промежуточную емкость, где происходила окончательная ее дегазация. В скважины вода поступала самотеком. Работа пилотной установки была полностью автоматизирована.

Установлено, что подпитка некондиционных подземных вод пласта кислородсодержащей водой с более высокими значениями pH на участке расположения эксплуатационных скважин стимулирует жизнедеятельность железо-марганцеоксиляющих бактерий и интенсифицирует физико-химические и микробиологические процессы удаления железа и марганца [2].

Подземные воды характеризуются высоким содержанием железа (до 30 мг/дм<sup>3</sup>) и марганца (до 3 мг/дм<sup>3</sup>) на фоне низких значений pH (5,9–6,1) и большого содержания растворенной углекислоты (до 250 мг/дм<sup>3</sup>). Эксплуатацию пилотной установки продолжали в течение 5 лет (2007–2011 гг.); от железа вода была очищена за одну неделю, а содержания марганца ниже предельно допустимой концентрации для питьевых вод были достигнуты через 1,5 года (рис. 2).

Исследование данных химических анализов подземных вод из наблюдательных скважин пилотной установки позволяло контролировать развитие реакционных зон в пласте вокруг скважин и приблизительно оценивать их размеры. Установлено, что зона осаждения железа в пласте находится на расстоянии около 7 м от скважин и простирается в радиальном направлении до 10–15 м. Зона осаждения марганца приближена к скважинам, но ее граница не установлена из-за отсутствия наблюдательных скважин на расстоянии ближе 6 м от эксплуатационных.

Результаты эксплуатации пилотной установки подтвердили эффективность внутрислоевой очистки подземных вод в сложных гидрохимических условиях Тунгусского месторождения и явились основанием для выполнения рабочего проекта первой очереди водозабора производительностью 106 тыс. м<sup>3</sup>/сут. В 2011 г. завершено строительство пускового комплекса – первой секции водозабора в составе 12 эксплуатационных скважин, обогатительной установки и 4 инфильтрационных скважин на верхнюю часть пласта для инициирования микробиологических процессов. Первый пусковой комплекс Тунгусского

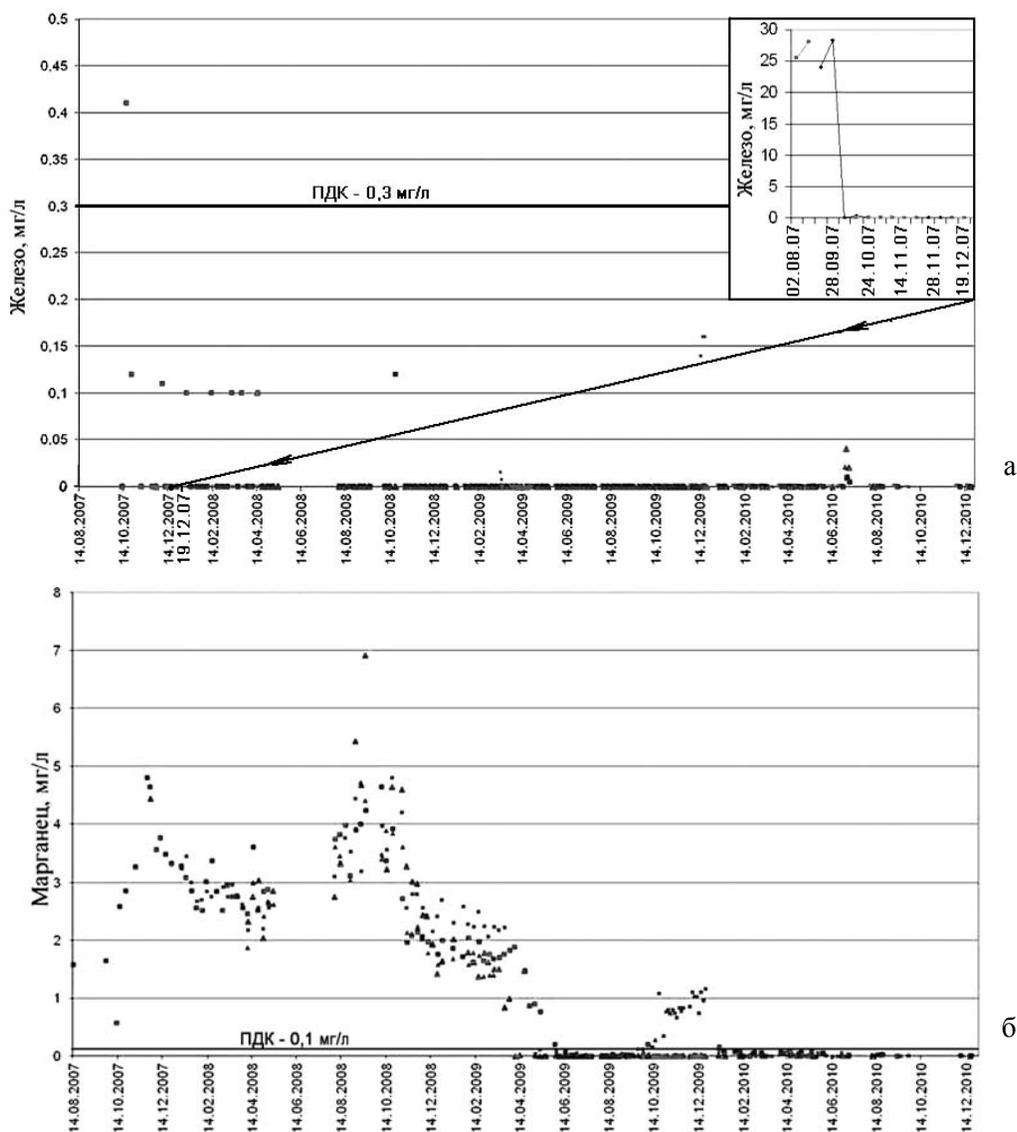


Рис 2. Изменение содержания железа (а) и марганца (б) в подземной воде скважин 1105 и 1106 в период опытно-промышленной эксплуатации пилотной установки. Треугольниками обозначены результаты анализов в начале, квадратами – в конце откачки воды

водозабора мощностью до 25 тыс. м<sup>3</sup> питьевой воды в сутки запущен в стадию пуско-наладочных работ 29 ноября 2011 г. [3]. Подача питьевой воды в Хабаровск после выполнения пуско-наладочных работ на 1 секции водозабора осуществляется с июля 2012 г.

### Заключение

Ориентация на подземные воды является единственным выходом при создании надежных источников водоснабжения крупных городов. Выбор МУП «Водоканал» г. Хабаровск в пользу технологии внутрислоевого очищения оказался оправданным со всех точек зрения, что доказали результаты опытно-промышленной пилотной установки на Тунгусском водозаборе [3]. Несмотря на весьма сложные гидрохимические условия

удалось достичь полной очистки воды от железа и марганца до концентраций ниже ПДК без применения реагентов и громоздких наземных сооружений.

Эксплуатация пилотной установки показала, что инициация микробиологического процесса в пласте путем искусственного пополнения водоносного горизонта кислородсодержащей водой с повышенным рН способствует ускорению процесса деманганации. Несомненным достоинством технологии внутрислоевой очистки является и то, что формируемый в пласте биогеохимический барьер, на котором осаждаются железо и марганец, является препятствием для поступления к скважинам вредных примесей, транспортируемых вместе с речным фильтратом из р. Амур. По результатам моделирования известно, что при полной нагрузке водозабора (106 тыс. м<sup>3</sup>/сут) до 65% водоотбора питьевых подземных вод формируется за счет поступления речных вод из Пемземской протоки. При любых негативных ситуациях барьер из гидроксидов железа и марганца способен сорбировать большинство микро- и макрокомпонентов подземных вод.

Расчетное время поступления речного фильтрата к скважинам при полной производительности водозабора составляет около 2 лет. За это время органические вещества, которые поступят в водоносный горизонт с речными водами, будут трансформироваться до углекислого газа и воды за счет активизации биогеохимических (микробиологических) процессов на контакте дно реки – водоносный горизонт и при движении по пласту.

Более чем 100-летний опыт применения безреагентной технологии очистки подземных вод в водоносном горизонте показал, что по сравнению с традиционной она имеет ряд экономических и экологических преимуществ. В технологическом процессе для очистки подземных вод используется кислород из воздуха, т.е. не требуется применения реагентов, а соответственно, сооружения реагентного хозяйства, поставки (транспортировки) химических веществ и утилизации отходов.

Эксплуатация установок полностью в автоматическом режиме упрощает их техническое обслуживание, для которого требуется минимальное количество обслуживающего персонала. При более низкой себестоимости подаваемой потребителю по этой технологии питьевой воды она по качеству превосходит российские и европейские стандарты. Исследованиями на пилотной установке Тунгусского месторождения доказана возможность очистки подземных вод от нормируемых компонентов непосредственно в водоносном пласте до принятых международных норм (железо – менее 0,1 мг/дм<sup>3</sup>, марганец – менее 0,05 мг/дм<sup>3</sup>).

Несомненные преимущества технологии внутрислоевой очистки подземных вод, в том числе безотходность и экологичность, дают основания считать ее наиболее соответствующей требованиям централизованного обеспечения населения городов и поселков питьевой водой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Тесля В.Г. и др. Опыт внутрислоевой очистки подземных вод от железа // Водоснабжение и сан. техника. 1989. № 5. С. 14–15.
2. Кулаков В.В., Кондратьева Л.М. Биогеохимические аспекты очистки подземных вод Приамурья // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 109–118.
3. Кулаков В.В., Стеблевский В.И., Домнин К.В., Херлитциус Й., Тесля В.Г. Опытнo-промышленная эксплуатация пилотной установки очистки подземных вод на Тунгусском водозаборе // Водоснабжение и сан. техника. 2012. № 7. С. 29–35.
4. Кулаков В.В. 100 лет технологии очистки подземных вод от железа в водоносном горизонте (in situ) // Материалы 6-го междунар. конгр. ЭКВАТЭК-2004 «Вода: экология и технология» (Москва, 1–4 июня 2004 г.). Ч. 1. М., 2004. С. 173–174.
5. Martinell R. Controlled water treatment in the soil – in situ removal of iron and manganese according to the Vyredox method. Paris: IWSA, 1980.
6. Rott U., Friedle M. 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland // J. Wasser – Abwasser. 2000. N 13. P. 99–107.