

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В  
ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ АМУРО-ТУНГУССКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ**

**В.В. Кулаков<sup>1</sup>, Н.В. Бердников<sup>2</sup>, В.О. Крутикова<sup>2</sup>, Е.Е. Архипова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Дикопольцева 56, г. Хабаровск, 680000;  
e-mail: [vvkulakov@mail.ru](mailto:vvkulakov@mail.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;  
e-mail: [nick@itig.as.khb.ru](mailto:nick@itig.as.khb.ru)

<sup>3</sup>МУП Водоканал г. Хабаровска, e-mail: [arhipova\\_ee@mail.ru](mailto:arhipova_ee@mail.ru)

Поступила в редакцию 18 июля 2018 г.

На материале наблюдательных скважин на Тунгусском месторождении подземных вод изучены изменения минералогического состава, происходящие при внутрислоевой подготовке питьевых вод. Установлено, что в водоносных слоях месторождения интенсивно идут процессы разрушения полевых шпатов, пироксенов, сидерита, в меньшей мере кварца с образованием вторичных минералов – аморфного кремнезема, глинистых минералов и вторичного сидерита. Кроме того, образуются твердые продукты разрушения – микрообломки минералов, которые вместе с первичными глинистыми, вторичными минералами и образующимися в процессе внутрислоевого окисления вод оксидами и гидроксидами железа и марганца участвуют в кольматаже щелей и прищелевого пространства фильтров скважин. Регенерационные мероприятия приводят лишь к частичному восстановлению удельного дебита скважин, поскольку применяющаяся в них соляная кислота выщелачивает только оксидно-гидроксидную часть кольматанта, оставляя практически без изменения ее алюмосиликатную составляющую.

**Ключевые слова:** минералогический состав, водоносный горизонт, железо, марганец, кремнезем, внутрислоевая водоподготовка, Тунгусский водозабор, Дальний Восток России.

**ВВЕДЕНИЕ**

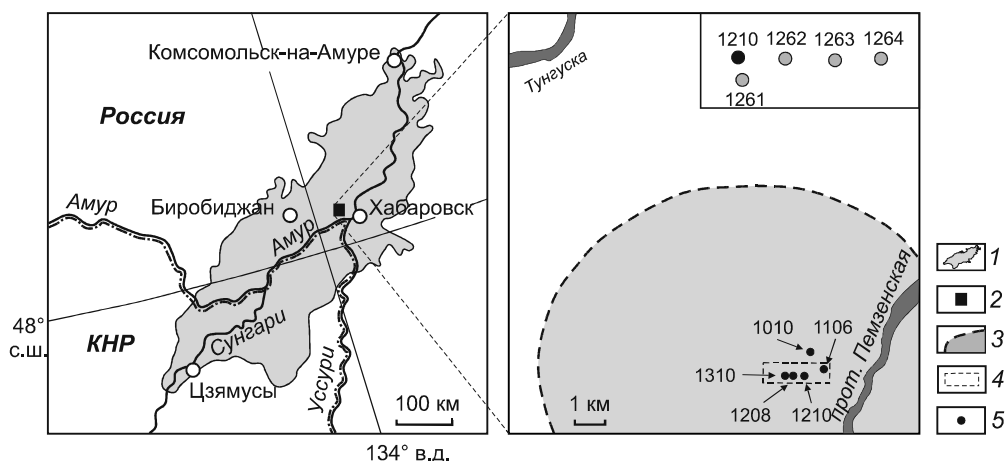
В Амуро-Тунгусском междуречье (ЕАО, Дальний Восток России) расположено Тунгусское месторождение некондиционных подземных вод (рис. 1). В целях водоснабжения г. Хабаровска на месторождении в 2012 г. введен в эксплуатацию Тунгусский водозабор, на котором для подготовки питьевой воды используется технология внутрислоевой очистки «Subterra». В соответствии с технологией, насыщенная кислородом и освобожденная от избыточных концентраций углекислого газа подземная вода закачивается в эксплуатационные скважины, через которые она инфильтруется в водоносный пласт. Растворенный кислород окисляет присутствующее в подземной воде избыточное количество железа и марганца до оксидов и гидроксидов с последующей откачкой очищенной воды в сеть.

В геологическом разрезе и по площади Тунгусского месторождения химический состав подземных вод существенно не меняется за исключением незна-

чительного роста общей минерализации, концентраций железа, марганца и кремния с глубиной (табл. 1).

Поскольку подземные воды Тунгусского месторождения отличаются высокими концентрациями Fe, Mn, органического углерода, растворенного CO<sub>2</sub>, отрицательными величинами Eh, низкими значениями pH и температуры (6–7 °С), были предприняты меры по адаптации технологических параметров к специфическим условиям водозабора.

В процессе пуско-наладочных работ и тестовой эксплуатации эксплуатационных скважин зафиксирована тенденция существенного снижения их удельного дебита. При этом во время водоотбора уровень воды в скважине снижается более интенсивно, чем за ее пределами, даже в непосредственной близости от обсадной трубы. Это свидетельствует о кольматаже фильтров в скважине. Для уменьшения кольматажа проводится периодическая регенерация скважин и околоскважинного пространства с использованием соляной кислоты и гипохлорита натрия. Однако пол-



**Рис. 1.** Тунгусское месторождение подземных вод.

1 – Среднеамурский артезианский бассейн, 2 – район исследований (справа увеличено), 3 – контур Тунгусского месторождения подземных вод, 4 – площадка Тунгусского водозабора, 5 – скважины и их номера (1210 – эксплуатационная и параметрические скважины согласно врезке).

ного восстановления удельного дебита скважин после регенерации не происходит.

В статье приведены результаты изучения изменений минералогического состава водовмещающих пород в водоносном горизонте Тунгусского месторождения и в прифилтровом пространстве скважин при эксплуатации, оценено влияние этих изменений на водоотдачу пластов и удельный дебит скважин.

#### ТУНГУССКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Тунгусское месторождение подземных вод находится в центральной части Среднеамурского артезианского бассейна [2, 4, 6]. На севере, востоке и юге его граница проходит по береговой линии рек Тунгуска и Амур. На западе водоносная толща простирается на расстояние более 100 км, здесь граница месторождения проводится по выступам фундамента из-под чехла рыхлых образований в районе пос. Волочаевка (рис. 1).

Территория участка разведки на месторождении занимает часть поверхности озерно-аллювиальной равнины.

Основной водоносный горизонт приурочен к плиоцен-четвертичным аллювиальным отложениям приамурской свиты. Водовмещающими породами являются кварц-полевошпатовые пески с гравием и галькой, отмечаются прослои глинистых песков и алевритов. В песках присутствует сидерит в виде бурой кристаллической массы, развивающейся в пространстве между песчинками. Количество глинистого материала, растительных остатков и аморфного кремнезема незначительное (до первых процентов). Мощ-

ность водоносного горизонта выдержанна и составляет около 60 м. С поверхности залегают покровные суглинки и глины мощностью 5–7 м. Подстиляется водоносный горизонт водоупорными глинами, аргиллитами и бурыми углями олигоценых отложений ушумунской свиты.

Для подземных вод Среднеамурского артезианского бассейна и других территорий Приамурья характерны высокие концентрации закисного железа и марганца, препятствующие использованию этих вод в качестве питьевых [2, 3, 5, 7, 9].

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения литологических характеристик водоносных пластов и их изменений МУП города Хабаровска «Водоканал» пробурены параметрические скважины с отбором керна в 18 м (1264), 12 м (1263), 6 м (1262) и 2 м (1261) вблизи от эксплуатационной скважины 1210 (рис. 1). Контрольная скважина 1010 пробурена вне зоны активного воздействия кислородсодержащих вод и регенерационных растворов, подаваемых в скважины (рис. 1). Более 200 проб керна материала водоносных грунтов из этих скважин передано в ИТиГ ДВО РАН для исследования. Кроме того, для получения материала непосредственно из зоны фильтров (предполагаемая зона кольматации) прифилтровый интервал скважин 1106 и 1208, находящихся длительное время в эксплуатации, и скважины 1310, в которой производилась только откачка подземных вод, был подвергнут импульсному гидравлическому воздействию с последующей откачкой. Предполагалось, что механическое воздействие

Таблица 1. Показатели качества подземных вод Тунгусского месторождения.

Показатели	Единицы измерения	Нормы по СанПиН 2.1.4.1074-01	Некондиционные подземные воды месторождения	Достиженные при водоподготовке питьевых вод в водоносном горизонте
Цветность	градусы	20	13–20	2–3
Мутность	мг/дм <sup>3</sup>	1.5	1.1–1.5	< 0.58
Водородный показатель	Единицы рН	6–9	5.9–6.2	6.7–7.0
Редокс-потенциал (Eh)	mV	Не нормируется	-40÷-100	320–450
Растворенный кислород	мг/дм <sup>3</sup>	Не нормируется	0–1.1	7.0–10.0
Растворенная углекислота		Не нормируется	190–250	4–20
Общая минерализация (сухой остаток)		1000	127–176	140–165
Мышьяк (As, суммарно)		0.05	0.016–0.035	< 0.002
Никель (Ni, суммарно)		0.1	0.037	0.004
Железо (Fe, суммарно)		0.3	25–28	< 0.01
Марганец (Mn, суммарно)		0.1	2.5–2.7	< 0.01
Кремний		10	10.1–13.9	11–14
Органическое вещество		Не нормируется	0.8–4.1	1–3

освободит коагулирующий фильтры материал, а последующая откачка вынесет его на поверхность и сделает доступным для исследования.

Исследования проводились в Инновационно-аналитическом центре коллективного пользования ИТиГ ДВО РАН. Минералогический состав изучался с помощью оптической микроскопии (стереомикроскоп Discovery v. 12, Carl Zeiss, Germany), рентгенофазового анализа (прибор Miniflex II, Rigaku, Japan) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ VEGA 3 LMH, TESCAN, Czech Republic) с энергодисперсионным микроанализатором XMax-80 (Oxford, GB). Химический состав песков и растворов после их выщелачивания определялись методами рентгенофлуоресцентного анализа (прибор S4 Pioneer, Bruker, Germany) и ICP-MS (прибор ELAN 9000, Perkin Elmer, USA).

Особое внимание было уделено изучению распределения в песках сидерита и аморфного кремнезема как потенциальных коагулянтов фильтров скважин. При определении содержания карбоната использовалась реакция с соляной кислотой, применяющаяся в химическом анализе пород на породообразующие оксиды [1] для удаления карбонатной составляющей. Методика предполагает, что соляная кислота при кон-

центрации 1:1 не растворяет ничего, кроме карбоната. Это положение проверено нами на керновом материале с глубины 27.2–28.5 м. Навеска 2 г обрабатывалась 30 мл 1:1 HCl до завершения реакции (выделение CO<sub>2</sub> полностью прекратились через 30 мин). Затем осадок был промыт, высушен, взвешен и повторно залит кислотой. После 60 мин выдержки осадок был также промыт, высушен и взвешен. Разница в весе между осадками после первой и второй обработками HCl составила 0.0056 г, что не превышает погрешности взвешивания. Опыт также показывает, что выдержки 30 мин достаточно для полного прохождения реакции растворения карбоната. Содержание карбоната вычислялось по разнице значений веса пробы до и после обработки HCl.

Для определения содержания аморфного кремнезема в пробах использовано его свойство растворяться в плавиковой кислоте. Попыты по определению оптимальных времени реакции и концентрации кислоты проведены на химически чистой аморфной SiO<sub>2</sub>. Навеска 0.5 г в платиновых чашках обрабатывалась 10 мл кислоты. Оптимальными для работы опытным путем выбраны концентрация HF 20 % и время реакции 48 сек, при которых проходит умеренно бурная реакция с полным растворением SiO<sub>2</sub>.

При анализе реальных проб, имеющих богатую кремнеземом матрицу (кварц-полевошпатовый песок), во время реакции с плавиковой кислотой кроме аморфного кремнезема будут также растворяться кварц и полевой шпат. Для учета этого эффекта был поставлен опыт по растворению кварц-полевошпатовой матрицы. Навеска кварц-полевошпатового песка без сидерита обрабатывалась 20 мл 20 % HF в течение 48 сек для растворения аморфного кремнезема. После промывки, высушивания и взвешивания остаток повторно обрабатывался 20 мл 20 % HF в течение 48 сек. При этой обработке растворялась только матрица. Промытый и высушенный остаток взвешивался и по разнице веса остатков после первой и второй обработками HF оценивалось количество растворившейся кварц-полевошпатовой матрицы. В среднем потеря веса пробы за счет растворения кварц-полевошпатовой матрицы составляет 6.125 %. Для получения истинного содержания аморфной  $\text{SiO}_2$  в породе эта величина должна отниматься от значения разности весов, полученных после обработки пробы соляной и плавиковой кислотами. Однако в процессе обработки полученных данных было отмечено, что в ряде случаев после этой операции получаются отрицательные результаты. Это происходит в том случае, когда содержание аморфной  $\text{SiO}_2$  в пробе меньше 0.1225 г. Чтобы не исключать эти пробы из анализа, было решено эту операцию не производить. В этом случае мы не получаем истинных содержаний аморфной  $\text{SiO}_2$ , но закономерности вариаций их содержаний в пробах сохраняются, поскольку потеря за счет растворения матрицы величина постоянная. В то же время возможность вычислить истинное содержание аморфной  $\text{SiO}_2$  в конкретных пробах сохраняется.

Биогеохимические процессы, протекающие при использовании технологии водоподготовки питьевых вод в водоносном горизонте, в представленной статье не обсуждаются. Они подробно рассмотрены в публикациях [2, 3, 5–7].

#### МИНЕРАЛЬНЫЙ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДОНОСНЫХ ПЕСКОВ

Методами оптической микроскопии и рентгенофазового анализа показано, что водоносные пески в основном состоят из кварца (40–70 вес.%) и полевого шпата (анортит, альбит, ортоклаз, 20–50 вес. %), к которым в количестве первых процентов примешиваются халцедон, слюды и глинистые минералы. В виде единичных зерен встречаются гранат, пироксены, амфибол и акцессорные – циркон, рутил, сфен. Отмечаются слои, обогащенные растительными остатками и обломочным материалом гравийно-галечной размер-

ности. Оксидов и гидроксидов железа и марганца не обнаружено.

Содержание сидерита в песках в основном варьирует от 0 до 14.35 вес. %, в целом увеличиваясь с глубиной. Сидерит кристаллизуется в поровом пространстве песков, иногда практически полностью закупоривая его бурой кристаллической массой с образованием конкреций.

Концентрации железа и марганца в валовом составе песков по данным рентгено-флуоресцентного анализа варьируют в пределах 1.93–13.66 и 0.12–1.86 вес. %, соответственно, изменяются согласованно и коррелируются с количеством сидерита. Поскольку собственные минералы этих элементов не обнаружены, мы полагаем, что они совместно и практически в полном объеме входят в состав сидерита.

В большинстве образцов водоносных песков присутствует аморфный кремнезем в виде тонкозернистых хлопьевидных агрегатов. Его содержание колеблется в пределах 5–15 вес. % и не зависит от близости точки опробования к эксплуатационной скважине.

#### ИЗМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ВОДОНОСНЫХ ПЕСКОВ

По данным оптической микроскопии, основной объем матричных компонентов водоносных песков месторождения (кварц и полевые шпаты) в процессе эксплуатации остаются неизменными. В то же время в пробах из всех изученных скважин отмечается наличие тонкой фракции, состоящей из глинистого материала, аморфного кремнезема, тонкозернистого сидерита и микрообломков преимущественно полевошпатового состава (рис. 2). В ее состав входят как

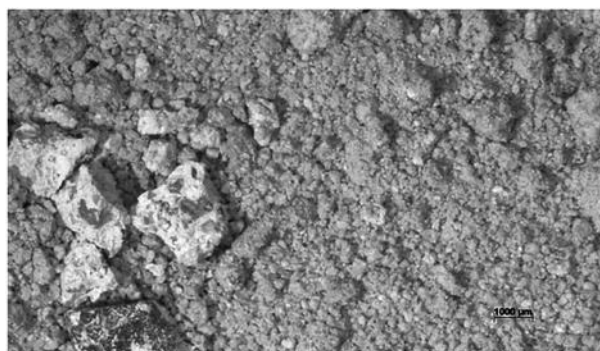
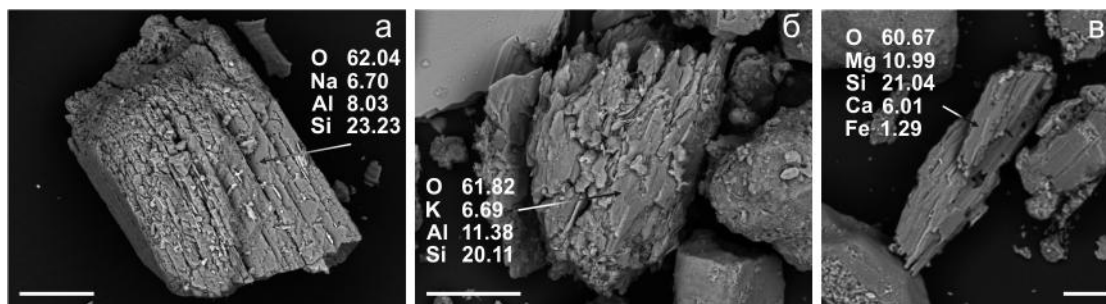


Рис. 2. Микрофотография водоносных песков Тунгусского месторождения.

Скважина 1010, интервал 29.35–29.55 м. Песчинки кварца, полевого шпата и тонкозернистая фракция, состоящая из глинистого материала, аморфного кремнезема, тонкозернистого сидерита и микрообломков полевошпатового состава. Слева фрагменты сидеритового стяжения.



**Рис. 3.** Разрушение альбита (а), ортоклаза (б) и авгита (в) в водоносных песках Тунгусского месторождения. Сквжина 1010, интервал 41.65–42.10 м. Стрелки указывают на точки микроанализов, результаты в ат. %. Линейка 50  $\mu\text{м}$ .

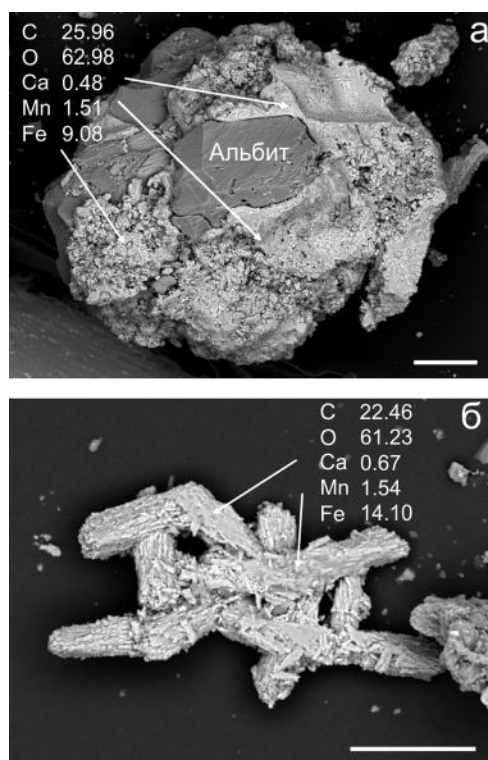
первично осадочные, так и вновь образованные компоненты, являющиеся продуктами разрушения\* минералов песков с последующим отложением в виде вторичных минералов.

Глинистый материал частично является первично осадочным, а частично – вторичным, образованным после разрушения и переотложения полевых шпатов [9]. Как видно из рис. 3 а, б, коррозия полевых шпатов идет преимущественно по направлениям спайности. При этом образуются микрочешуйки размером от единиц до десятков микрометров уплощенной и неправильной формы. Так же происходит разрушение авгита (рис. 3 в).

Видимого разрушения кварцевых песчинок не отмечено, возможно, из-за равномерной коррозии поверхности кварца, не имеющего спайности. Этот процесс, а также высвобождение кремнезема в процессе разрушения полевых шпатов и других минералов песков (пироксены, амфиболы, слюды), обеспечивает высокое содержание растворенного кремнезема в водах месторождения и наличие в составе тонкой фракции аморфного кремнезема.

По результатам оптических исследований в водоносных песках месторождения присутствуют две разновидности сидерита (рис. 4). Первая (рис. 4 а) образует полнопроявленные достаточно крупные (до первых мм) бурые кристаллы, цементирующие песчаный материал с образованием линз и прослоев песков с пониженной пористостью. Вторая (рис. 4 б) – скрытокристаллическая, входит в состав тонкой фракции в виде пылевидного материала.

Подземные воды Тунгусского месторождения являются достаточно агрессивными и весьма сложными



**Рис. 4.** Кристаллический сидерит, цементирующий водоносные пески (а, скв. 1010, интервал 41.65–42.10 м), и пылевидный сидерит из их тонкой фракции (б, скв. 1010, интервал 44.05–45.2 м).

Линейка 50  $\mu\text{м}$ .

с точки зрения водоподготовки. Концентрация железа в них достигает 30  $\text{мг/дм}^3$ , марганца – 3.0  $\text{мг/дм}^3$ , растворенной углекислоты – 250  $\text{мг/дм}^3$ , величина рН составляет 5.9–6.2. Система «вода-порода» в водоносном горизонте месторождения является неравновесной, что приводит к интенсивному разрушению матричного материала песков и накоплению в них продуктов разрушения и вторичного минералообразования. При отсутствии внешних воздействий эта система приобретает

\*Термин «разрушение» употребляется нами обобщенно для обозначения процесса изменения минералов при взаимодействии с водной средой. В действительности этот процесс более сложный и включает в себя растворение, гидролиз, образование промежуточных фаз и др. [9].

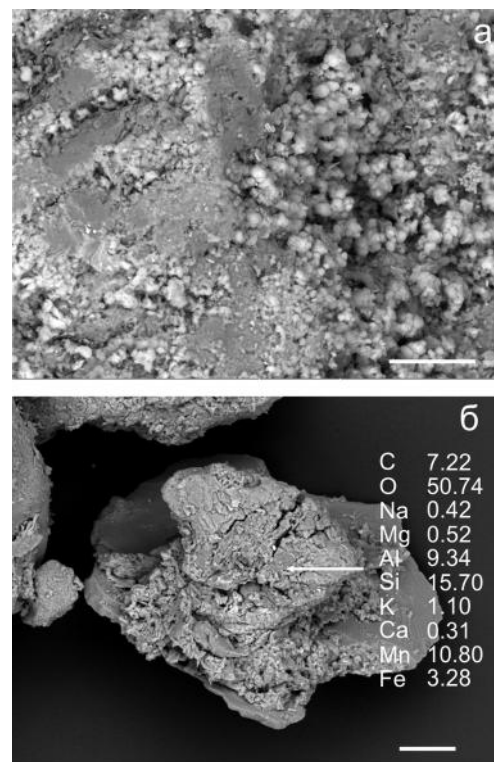
черты динамического равновесия, когда реакции разрушения сдерживаются накоплением их продуктов. Перенос продуктов разрушения током подземных вод с весьма незначительной скоростью (около 10 см в сутки, до 40 м в год) обеспечивает достаточно медленный темп разрушения. Внутрипластовая подготовка вод с существенными изменениями динамики и состава системы «вода-порода» приводит к нарушению ее динамического равновесия.

#### КОЛЬМАТАЖ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН И ЕГО ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ

В процессе внутрипластовой водоподготовки некондиционных подземных вод в пласте и подачи питьевой воды потребителям было отмечено снижение удельных дебитов водозаборных скважин, достигающее 10–23 % за 5–6 месяцев эксплуатации. При этом регенерационные мероприятия, связанные с закачкой в скважины соляной кислоты и гипосульфита натрия, восстанавливали удельные дебиты лишь на 70–80 %. Снижение удельных дебитов сопровождалось усилением эффекта гидродинамического скачка уровней, когда при откачке уровень воды в скважинах над насосами становился существенно ниже уровня пластовых вод непосредственно за обсадной трубой. Таким образом, возникло предположение, что кольматация происходит непосредственно в водозаборных щелях фильтров и в ближайшем прифильтровом пространстве – в гравийной обсыпке рабочей части фильтров. Для проверки этого предположения из скважин 1208, 1106 и 1310 был отобран и изучен материал, извлеченный в процессе откачки непосредственно после воздействия на фильтры гидродинамическим активатором высокого давления (установка насосная гидроочистная – УНГД-75-63, производительностью 75 л/мин и максимальным давлением 63 МПа). Предполагалось, что в этом материале будут содержаться фрагменты вещества, отложение которого уменьшает пористость прифильтрового пространства и просветы водозаборных щелей.

Отобранный из скважин 1208 и 1106 материал представлял собой темно-бурую мелко-тонкозернистую массу, в которой методом рентгеновской дифракции были обнаружены кварц, слюды (иллит), полевые шпаты, сидерит и родохрозит. Как показали электронно-микроскопические исследования, сидерит и родохрозит образуют почковидные агрегаты и корочки на поверхности песчинок (рис. 5 а) а также входят в состав специфических многокомпонентных композитов (рис. 5 б).

Так как сидерит и родохрозит не могут участвовать в «накапливающемся» кольматации фильтров, которая остается после регенерации, они были рас-



**Рис. 5.** Почковидные выделения сидерита и родохрозита на поверхности песчинок (а) и многокомпонентный скрытокристаллический композит (б).

Линейка 50 мкм.

творены соляной кислотой. Для контроля состав раствора после прохождения реакции был зафиксирован (вес. %): Mn 57.80; Fe 32.11; Si 5.17; Ca 3.19; Ba 1.00; Al 0.74. Поскольку основу этого раствора составляют железо и марганец, можно заключить, что растворились в основном железно-марганцевые соединения.

После обработки соляной кислотой изучаемый материал приобрел светло-бежевый цвет. Под оптическим микроскопом в нем различаются микрообломки кварца и полевых шпатов, тонкозернистая масса и состоящие из этих материалов композиты. Типичный образец такого композита представлен на рис. 6.

Из рисунка видно, что он сложен песчинками и угловатыми микрообломками матричного материала, сцементированными тонкозернистым материалом. Состав этого цемента тщательно изучен с помощью рентгеноспектрального микроанализа в нескольких точках. Результаты представлены в таблице 2.

Данные микроанализов говорят о том, что состав цементирующего материала достаточно однороден как на микроуровне в составе одного фрагмента композита, так и между такими композитами из двух изученных скважин. На дифрактограммах тонкозернистой фракции из этого материала присутствуют

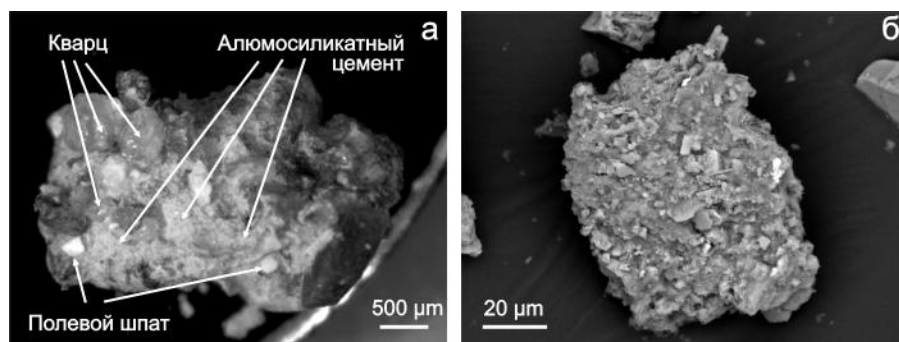


Рис. 6. Алумосиликатный композит (а) и фрагмент его цемента при большем увеличении (б).

Таблица 2. Химический состав цемента кольматирующего алумосиликатного агрегата, вес. %.

Элемент	Скважина 1208						Скважина 1106	
	Точки замеров						Среднее из 6 замеров	Среднее из 3 замеров
	1	2	3	4	5	6		
O	50.11	59.65	59.08	51.72	55.45	58.77	55.80	57.61
Na	1.50	0.89	0.94	0.96	1.54	0.87	1.12	0.45
Mg	0.44	1.13	0.51	0.52	0.97	0.45	0.67	0.32
Al	8.92	8.71	6.24	8.27	9.02	7.27	8.07	11.51
Si	29.31	23.79	29.12	27.89	24.23	26.31	26.78	21.14
K	2.31	1.66	1.36	3.23	2.15	1.73	2.07	2.07
Ca	0.72	0.27	0.36	0.39	0.53	0.25	0.42	0.41
Ti	0.55	0.45	0.36	0.95	0.86	0.54	0.62	0.33
Mn	0.65	0.16	0.00	0.18	0.15	0.22	0.23	0.97
Fe	5.48	3.30	2.03	5.89	5.10	3.59	4.23	5.19

линии кварца, иллита, альбита, анортита и разупорядоченного анортотлаза. Композитов с таким алумосиликатным цементом не встречено ни в одной пробе из водоносных песков. Во всех случаях обнаружения сцементированных песков из наблюдательных скважин роль цемента выполнял сидерит. Поэтому мы полагаем, что такие композиты, состоящие из окатанных матричных песчинок и микрообломков полевых шпатов, пироксенов и кварца, сцементированных тонкозернистым алумосиликатным материалом, являются основным компонентом, кольматирующим водозаборные щели и прищелевое пространство фильтров скважин на месторождении.

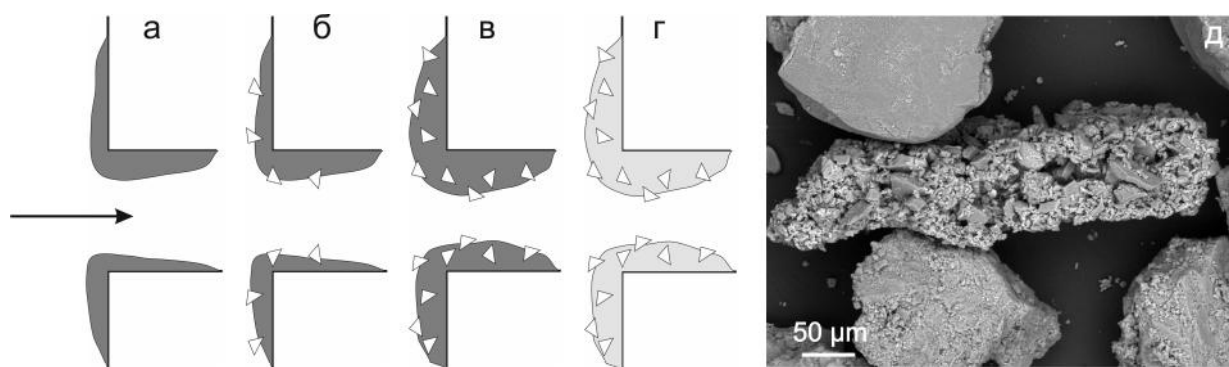
Материал, поднятый из скважины 1310, из которой осуществлялась только откачка подземной воды без мероприятий по внутрисловоу окислению и регенерации, представляет собой хорошо промытый мелко-тонкозернистый песок, в состав которого входят минералы пластовой матрицы – кварц, халцедон, полевые шпаты, кристаллический сидерит, пироксены и амфиболы. Тонкодисперсных сидерита и кремнезема не обнаружено. Эти данные говорят о том, что

при откачке не окисленных в пласте подземных вод заметного кольматажа фильтров не происходит, что подтверждают и данные по определению удельного дебита.

#### МОДЕЛЬ КОЛЬМАТАЖА

На основе полученных данных можно следующим образом представить основные закономерности процесса кольматажа щелей рабочей части и прищелевого пространства фильтров скважин на Тунгусском водозаборе (рис. 7).

Как нам представляется, его основными «инициаторами» являются окисиды и гидроксиды железа и марганца, которые при откачке воды после внутрисловоу окисления осаждаются на внутрисловоу поверхностях песков прищелевого пространства фильтров и водозаборных щелей скважин (рис. 7 а). Эти вновь образованные соединения имеют тонкодисперсную форму и высокую поверхностную активность, поэтому легко «прилипают» к стенкам пор. При этом особенно активно их осаждение идет на щелях и в порах обсыпки непосредственно перед ними,



**Рис. 7.** Модель колюматажа водозаборных щелей и прищелевого пространства фильтров скважин на Тунгусском водозаборе.

Пояснения в тексте, д – колюматирующая корка после обработки HCl.

поскольку именно здесь наибольшая скорость потока воды, количество приносимого материала и сила соударения его с поверхностями, что, по-видимому, способствует прилипанию. Эти области наиболее подвержены колюматажу, что подтверждается эффектом гидравлического скачка уровней – значительным понижением уровня воды над насосами в скважинах относительно уровня воды в пласте непосредственно за обсадной трубой.

Оседающий на водозаборных щелях и в прищелевом пространстве фильтров слой железо-марганцевых соединений непрерывно «армируется» продуктами разрушения песков – приносимыми водой микрочастицами кварца, глинистых минералов, полевых шпатов, сидерита, вторичных минералов, в том числе аморфного коллоидного кремнезема (рис. 7 б, в). В результате на колюматируемых поверхностях образуется корка железо-марганец-алюмосиликатного композита, фрагменты которого рассмотрены выше.

С ростом толщины композитной корки пористость прищелевого пространства обсыпки фильтров снижается, просветы водозаборных щелей уменьшаются, и удельный дебит скважин снижается. Регенерационные мероприятия с применением соляной кислоты вымывают (растворяют) из колюматирующего композита оксиды и гидроксиды железа и марганца и сидерит, а алюмосиликатный каркас остается (рис. 7 г, д). Вероятно, некоторое количество микрочастиц силикатов и алюмосиликатов без железо-марганцевого «цемента» также покидают композитную корку, но многие все-таки остаются, скрепленные глинистыми компонентами и продолжающими свой рост вторичными минералами. В результате регенерации удельный дебит скважин увеличивается, но не в полном объеме, чему препятствует оставшийся на

колюматируемых поверхностях силикатно-алюмосиликатный материал. Повторение циклов «внутрипластовое окисление – откачка – регенерация» приводит к ступенчатому накоплению на поверхностях щелей и прищелевого пространства фильтров нерастворимого колюматанта.

#### ЖЕЛЕЗО И МАРГАНЕЦ ПОСЛЕ ОКИСЛЕНИЯ

В рамках используемой технологии внутрипластового окисления нормируемых компонентов подземных вод предполагается, что оксиды и гидроксиды железа и марганца, образующиеся в зоне геохимического реактора, отгоняются потоком закачиваемой кислородсодержащей воды на ее периферию, где и аккумулируются. Однако минералогические исследования кернов наблюдательных скважин показали, что в них до глубины водозаборных фильтров оксиды и гидроксиды железа и марганца отсутствуют. В то же время в зоне биогеохимических реакторов наблюдается значительное количество тонкокристаллического сидерита, которое может приводить к уменьшению водопроницаемости водоносных слоев на водозаборе. Мы предполагаем, что окисленные соединения железа, образующиеся при внутрипластовом окислении, под воздействием природных подземных вод с высоким содержанием  $\text{CO}_2$  и низкими значениями pH и Eh преобразуются в сидерит, в состав которого включается и некоторое количество марганца. Другими словами, на Тунгусском водозаборе основным коллектором выделившегося (перешедшего в осадок) железа являются не оксиды и гидроксиды, а техногенный сидерит, накапливающийся на периферии реакционной зоны. В то же время количество сидерита внутри реакционной зоны, как правило, понижено из-за его выщелачивания при регенерационных мероприятиях.



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нашими исследованиями установлено, что в водоносном горизонте на Тунгусском месторождении подземных вод интенсивно идут процессы разрушения матричных минералов песков – полевых шпатов, пироксенов, сидерита, в меньшей мере – кварца. В результате этого разрушения в подземных водах месторождения формируются повышенные содержания Na, K, Al, Ca, Si, которые участвуют в образовании вторичных минералов – аморфного кремнезема и глинистых. Растворение и перетложение сидерита приводит к возникновению его вторичной генерации. Кроме того, образуются твердые продукты разрушения – микрообломки полевых шпатов, кварца, темноцветных минералов матрицы. Твердые продукты разрушения вместе с первичными глинистыми, вторичными минералами и образующимися в процессе внутрипластового окисления вод оксидами и гидроксидами железа и марганца участвуют в кольматаже щелей и прищелевого пространства фильтров скважин. Регенерационные мероприятия приводят лишь к частичному восстановлению удельного дебита скважин, поскольку применяющаяся в них соляная кислота выщелачивает только оксидно-гидроксидную часть кольматанта, оставляя практически без изменения ее алюмосиликатную составляющую.

Опыт применения технологии внутрипластового окисления в других регионах показывает, что заметное уменьшение удельного дебита скважин происходит не ранее, чем через 15–25 лет от начала эксплуатации водозаборов. В случае Тунгусского водозабора это явление становится заметным уже через 2–3 года эксплуатации скважин. Нам представляется, что причина такого ускорения процесса кольматажа состоит в исключительно «агрессивном» характере некондиционных подземных вод месторождения, которые интенсивно растворяют матричные минералы песков с образованием большого количества микрочастиц и вторичных минералов. Если бы этого не было, кольматирующий композит в основном состоял бы из Fe-Mn оксидов и гидроксидов, которые легко растворяются при регенерации соляной кислотой.

Исходя из наших данных, исключение из технологии водоподготовки питьевых вод внутрипластового окисления резко замедлит процесс кольматажа, поскольку исчезнет железо-марганцевая составляющая кольматирующего композита. Его алюмосиликатная часть значительно менее интенсивно налипает на поверхности щелей и обсыпки. Процесс кристаллизации пленки вторичных минералов из растворенных

Na, K, Al, Ca, Si, которая, по-видимому, также может «армироваться» микрочастицами, идет неизмеримо медленнее, чем в присутствии Fe-Mn компонентов. Еще более замедлить его можно увеличением размера щелей и крупности засыпки.

Поскольку кольматирующий алюмосиликатный композит очень прочный и не растворим в кислотах, регенерационные мероприятия с закачкой в скважины соляной кислоты на Тунгусском водозаборе мало эффективны. По-видимому, работоспособность скважин в этом случае можно восстановить лишь механическими способами с использованием гидравлических ударов с периодической откачкой образующегося шлама. Нам представляется, что хорошие результаты можно ожидать от применения ультразвуковых вибраторов.

Приведенные данные дополняют результаты выполненных ранее исследований процессов вторичного минералообразования в водоносном горизонте [3, 4, 6, 8] и их роли при применении технологии внутрипластовой подготовки питьевых вод. В то же время известно, что большое влияние на состояние системы вода-порода в водоносном горизонте и их изменение при техногенном вмешательстве оказывает биогенный фактор [2, 5, 7]. По-видимому, для успешной адаптации технологии внутрипластового окисления при подготовке питьевых вод в водоносном горизонте следует учитывать оба фактора.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем и Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН.

Авторы выражают благодарность специалистам АРКАДИС-Рус, МГУ им. М.В. Ломоносова и ГЕОХИ РАН за конструктивное обсуждение проблем кольматажа скважин на Тунгусском водозаборе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долежал Я., Повондра П., Шульцек З. Методы разложения горных пород и минералов. М.: Мир, 1968, 275 с.
2. Кулаков В.В., Кондратьева Л.М., Херлтициус Й., Тесля В.Г. Формирование биогеохимических барьеров при подготовке питьевых подземных вод в водоносном горизонте // Подземная гидросфера: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ООО «Географ», 2012. С. 209–213.
3. Кулаков В.В., Стеблевский В.И., Домнин К.В., Тесля В.Г., Херлтициус Й. Опыт-промышленная эксплуатация pilotной установки очистки подземных вод на Тунгусском водозаборе // Водоснабжение и сан. техника. 2012. № 7. С. 29–35.
4. Кулаков В.В. Взаимодействие подземных вод с горными породами и поверхностными водами в Амуро-Тунгусском междуречье // Фундаментальные и прикладные проблемы

- гидрогеологии: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (XXI совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Якутск, 22–28.06.2015 г. Якутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2015. С. 39–44.
5. Кулаков В.В. Формирование техногенного биогеохимического реактора в водоносном горизонте для получения питьевых подземных вод // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы второй Всерос. конф. с междунар. участием, г. Владивосток, 06–11.09.2015 г. Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2015. С. 71–74.
  6. Кулаков В.В. Водоподготовка питьевых вод в водоносном горизонте на Тунгусском водозаборе некондиционных подземных вод в Хабаровске // Вод. хоз-во России. 2016. № 2. С. 88–97.
  7. Кулаков В.В. Биогеохимические преобразования некондиционных подземных вод в водоносном горизонте для получения питьевых вод // Современное состояние, тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии // Сб. научн. трудов [Электронный ресурс]. II Междунар. научно-метод. конф. / СПб.: СПб. горн. ун-т, 2017. С. 64–69.
  8. Кулаков В.В., Бердников Н.В. Изменение минералогического состава водоносного горизонта при внутрипластовой подготовке питьевых вод // Подземные воды Востока России: Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием), г. Новосибирск, 18–22 июня 2018 г. / Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; Ин-т земной коры СО РАН, Сиб отд-ние Рос. акад. наук и др.; Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. С. 276–280.
  9. Шварцев С.Л. Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами. Обзор // Геология и геофизика. 1991. № 12. С. 16–51.

*Рекомендована к печати О.В. Чудаевым*

После доработки 26.07.2018 г.  
принята к публикации 24.11.2018 г.

*V.V. Kulakov, N.V. Berdnikov, V.O. Krutikova, E.E. Arkhipova*

### **Natural and technogenic mineral formation in the aquifer of the Amur-Tunguska interfluve**

Changes in mineralogical composition occurring in the course of in-situ preparation of drinking water have been studied based on the data from the monitoring wells of the Tunguska groundwater intake. Intensive dissolution of feldspars, pyroxenes, siderite, and, to a lesser extent, quartz with secondary minerals (amorphous silica, clay minerals and secondary siderite) formation occur in the aquifer of the Tunguska intake. In addition, solid products of the destruction are formed including microfragments of minerals, which together with the primary clay, secondary minerals and oxides and hydroxides of iron and manganese originated in the process of intra-layer oxidation of water participate in the colmatation of cracks and the slit space of well filters. Regeneration actions result only in a partial recovery of the specific flow rate of wells, since the hydrochloric acid used in them leaches only the oxide-hydroxide part of the colmatant, leaving virtually unchanged its aluminosilicate component.

**Key words:** mineral composition, aquifer, iron, manganese, silica, in-situ water treatment, Tunguska water intake, Far East of Russia.