

И.А.ТАРАСЕНКО, Н.А.ЧЕПКАЯ, Т.Н.ЕЛИСАФЕНКО, А.В.ЗИНЬКОВ,  
И.В.КАТАЕВА, И.В.САДАРДИНОВ

## Экологические последствия закрытия угольных шахт и меры по предотвращению их отрицательного воздействия на регион

*Массовое закрытие шахт, как в Приморском крае, так и в других регионах, привело к возникновению различных экологических проблем. Одна из них — выходящие на поверхность шахтные воды. Их сброс без предварительной очистки в поверхностные водотоки изменяет химический состав рек. Качество воды в реках из-за этих стоков не отвечает требованиям, предъявляемым к воде питьевых и рыбохозяйственных водоемов. Для защиты от загрязнения необходимы отвод и очистка изливающихся шахтных вод.*

*Осуществлено экспериментальное моделирование очистки шахтных вод. Полученные результаты показывают эффективность использования фильтрующих массивов, сложенных природными материалами, в совокупности с применением биотехнологий.*

***The environmental consequences of the deep coal mines closure and prevention of their negative impact on the region. I.A.TARASENKO, N.A.TCHEPKAIA (Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok), T.N.ELISAPHENKO (Far Eastern Coal Research Institute, Vladivostok), A.V.ZINKOV (Far Eastern State Technical University, Vladivostok), I.V.KATAEVA (Interindustry Research Institute of Fuel and Energy Complex Ecology, Perm), I.V.SADARDINOV (Far Eastern Coal Research Institute, Vladivostok).***

*Mass closure of the deep coal mines both in Primorye and in other regions resulted in appearance of different environmental problems. One of them is discharge of the mine waters. Untreated discharge of abandoned mine drainage flows into the surface currents completely transforms their chemical composition. The river water quality after emptying the drainage water does not meet the requirements for drinking and fishing waters. Tapping and treatment of the coal drainage are necessary for the environmental protection of the surface waters.*

*The experimental modeling of the coal mines discharge treatment has been realized. The results obtained demonstrate the efficiency of using the clearing objects consisting of natural materials in combination with applying biotechnologies.*

---

ТАРАСЕНКО Ирина Андреевна — кандидат геолого-минералогических наук, ЧЕПКАЯ Наталья Александровна — кандидат геолого-минералогических наук (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток), ЕЛИСАФЕНКО Татьяна Николаевна — кандидат геолого-минералогических наук, САДАРДИНОВ Ильяс Васильевич — кандидат технических наук (ОАО «ДальвостНИИПроектуголь», Владивосток), ЗИНЬКОВ Александр Васильевич — кандидат геолого-минералогических наук (Дальневосточный государственный технический университет, Владивосток), КАТАЕВА Ирина Валерьяновна — кандидат биологических наук (Межотраслевой научно-исследовательский институт экологии топливно-энергетического комплекса, Пермь).

Массовое закрытие шахт вызывает ряд негативных экологических последствий: выделение вредных газов, подтопление застроенных участков, активизацию загрязнения подземных вод, выход шахтных вод на поверхность и проникновение их в источники водоснабжения. Учитывая геополитическое положение Приморского края и общий дефицит в нем питьевой воды, чрезвычайно важно предотвратить ухудшение ситуации путем проведения комплекса природоохранных мероприятий.

В южном Приморье в зону влияния угольных шахт попадает значительное количество источников водоснабжения с общим водоотбором до 146 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в том числе наиболее крупные в Приморье водозаборы Находкинский и Южный в долине р. Партизанская и каскад водозаборов в долине р. Шкотовка. Шахтные воды формируются за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностного стока рек, ручьев, а также подземных вод зон дезинтеграции пород. Проникновение атмосферных осадков наиболее интенсивно происходит через провалы с поверхности по трещинам выветривания, тектоническим нарушениям и водопроницающим трещинам над отработанными пластами на глубину до 100 м. Выход шахтных вод на поверхность осуществляется в основном по водоотливным технологическим скважинам, но иногда наблюдается и высачивание этих вод. Сбрасываются шахтные воды непосредственно в реки. Нами исследованы разливы вод ликвидированных шахт «Глубокая» (г. Партизанск) и «Углекаменская» (пос. Углекаменский). Выход шахтных вод на земную поверхность начался в 2000 г.

Воды шахт не соответствовали требованиям ГОСТов, предъявляемым к питьевой воде, по цветности (3—6 ПДК), сухому остатку (до 3,5), натрию (4—9), алюминию (1,8), железу (до 100), марганцу (17), кадмию (6,5—15), мышьяку (1,4), ртути (3), фенолам (5—10 ПДК). К 2002 г. состав изливаемых вод по шахте «Глубокая» изменился незначительно, по шахте «Углекаменская» их качество резко ухудшилось, при этом из гидрокарбонатного состав стал сульфатным (содержание сульфатов достигло 5,6 г/дм<sup>3</sup>), общее солесодержание выросло с 1,5 до 8 г/дм<sup>3</sup>.

Для изучения влияния изливаемых шахтных вод на качество воды в поверхностных водотоках и реках — приемниках шахтных вод — отобрано более 100 проб воды на анализ основных и рассеянных элементов. Нестабильные параметры измерялись полевым методом непосредственно на месте отбора. Для определения компонентов в водах использован индуктивно-плазменный масс-спектрофотометр (ISP) (аналитик В.И.Киселев, ДВГИ ДВО РАН) и фотоколориметр (аналитик В.А.Лагунова, ОАО «ДальвостНИИпроектуголь»).

В результате проведенных исследований выделены два типа слабощелочных (рН 7,8—7,9) вод. Их минерализация составляет 4500 мг/дм<sup>3</sup> для вод первого типа и 1253 мг/дм<sup>3</sup> — для второго. Техногенные воды загрязнены следующими компонентами: нефтепродукты — 0,135 мг/дм<sup>3</sup>, фенолы — 0,02 мг/дм<sup>3</sup>, сульфаты — 3500 мг/дм<sup>3</sup>, аммонийный азот — 4,5 мг/дм<sup>3</sup>, железо — 24 мг/дм<sup>3</sup>, кадмий — 0,015 мг/дм<sup>3</sup>, цинк — 0,2 мг/дм<sup>3</sup>, алюминий — 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, марганец — 1,1 мг/дм<sup>3</sup>.

Мониторинг качества изливаемых вод позволил выявить вариации в их составе в зависимости от сезона. В холодные месяцы (с ноября по март) фиксировалось увеличение содержаний SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. Концентрации железа, наоборот, достигали максимума в летние месяцы. Кроме того, установлено, что в процессе выхода вод на поверхность происходит интенсивное формирование минералов. Установлены следующие новообразованные минералы: тенардит (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), несквегонит (MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O), лепидокрокит (FeOOH) и арагонит (CaCO<sub>3</sub>). Кроме того, в

Таблица 1

**Содержание (% мас.) микроэлементов в иловых отложениях изливов вод  
шахты «Углекаменская»**

Элемент	П-1-8	Скв-7с	Скв-7 р	Элемент	П-1-8	Скв-7с	Скв-7 р
Be	0,0002	0,0004	0,0002	Al	0,0025	> 1	0,0055
As	-	-	-	Mo	-	-	-
Te	-	-	-	V	-	0,015	-
Sc	-	0,0002	-	Ti	-	< 1	-
P	-	-	-	Li	-	0,002	-
Sb	-	-	-	Cu	0,0006	0,0025	0,0007
Pt	-	-	-	Cd	-	-	-
Au	-	-	-	Ag	-	-	-
Ta	-	-	-	Na	0,005	> 3	0,01
Tl	-	-	-	Zn	-	-	-
Mn	0,06	0,15	0,2	Co	-	0,0015	0,0015
Pb	-	0,0003	-	Ni	-	0,0035	0,001
Sn	0,0003	-	0,0004	Zr	-	0,015	-
Mg	0,025	1,5	0,075	Ca	0,1	< 1	0,065
Si	0,025	> 3	0,085	K	-	0,65	-
Nb	-	0,001	-	Sr	0,055	0,035	0,055
Ga	-	0,002	-	Cr	-	0,0045	-
W	-	-	-	Ba	-	0,025	-
Fe	< 10	< 10	< 10	Pd	-	-	-
Ge	-	-	-	Y	0,001	0,0025	0,0015
In	-	-	-	Yb	0,0001	0,0008	0,0006
Bi	-	-	-	B	0,003	0,015	0,0055

Примечание. Прочерк — не обнаружено. Спектральный полуколичественный анализ выполнен в ДВГИ ДВО РАН (аналитики Л.И.Азарова, В.И.Сеченская, Т.К.Бабова).

местах изливов шахтных вод отмечены отложения илообразного вещества, спектральный анализ которого (табл. 1) свидетельствует об интенсивном вымывании из затопленных шахт таких элементов, как Be, Sc, Mn, Pb, Sn, Mg, Si, Nb, Ga, Fe, Al, Cu, Na, Co, Ni, Ca, K, Sr.

Отбор проб воды в реках проводился в истоках рек Тигровая и Постышевка (фоновые значения), непосредственно в местах слияния шахтных и речных вод и в устьях этих рек. Шахтные воды I типа смешивались с водами Тигровой, II типа — с водами Постышевки. Концентрации основных компонентов и микроэлементов в зависимости от места отбора проб приведены в табл. 2.

Анализ данных показал, что сброс изливающихся шахтных вод без предварительной очистки в поверхностные водотоки полностью изменяет их химический состав (рис. 1). Изначально гидрокарбонатно-кальциевые воды Тигровой при впадении шахтных вод становятся натриево-сульфатными, а воды Постышевки — натриево-бикарбонатными. В реках существенно (в 4 раза) увеличивается минерализация. Концентрации основных ионов и тяжелых металлов в местах слияния шахтных и поверхностных вод резко возрастают, иногда на несколько порядков (см. табл. 2). В устьях рек концентрации многих элементов значительно ниже, чем в местах сброса шахтных вод, что вызвано разбавлением вод и осаждением этих элементов в виде новообразованных минеральных фаз по течению рек. Качество воды в реках в результате стока шахтных вод не отвечает требованиям, предъявляемым к воде питьевых и рыбохозяйственных водоемов, в течение всего года.

Таким образом, шахтные воды, попадая в водотоки, нарушают биологическое и гидрохимическое равновесие и создают угрозу не только для здоровья населения,

Таблица 2

**Изменение состава поверхностных водотоков  
при смешении с шахтными водами**

Состав и свойства	Р. Тигровая			Р. Постышевка			Шахтные воды	
	1	2	3	1	2	3	I тип	II тип
pH	6,9	7,5	7,1	7,1	7,7	7,24	7,8	7,9
<i>мг/дм<sup>3</sup></i>								
Минерализация	77	605	357	50	1757	415	4500	1253
HCO <sub>3</sub>	50,8	241	114	27,5	1194	219,6	1600	745
Cl	4,7	8	6,2	2,1	29,5	22,7	11	85,8
SO <sub>4</sub>	7,4	132	183	3,9	50	38	3500	34,8
Ca	5,7	34,6	20,4	6,2	52	40,2	215	42,6
Mg	7,3	31,8	12	1	19	14,59	25	16,7
K	0,97	4,7	0,8	0,8	4,5	1,2	20	2,5
Na	3,7	102	65,3	4,5	337	54,5	1500	213
Fe	0,25	6,7	0,4	0,13	0,37	0,16	23,8	3,1
F	0,2	0,2	0,2	0,1	0,47	0,08	0,82	0,8
<i>мкг/дм<sup>3</sup></i>								
Pb	5,3	40,9	8,6	0	31	15	50	30
Zn	15,3	80	90	20	270	70	200	136
Cu	2,4	12	12	40	170	80	5	11
Mn	2	26	10	1	26	3	1100	438
Cd	2	7	4	2	8	3	10	15
As	1	22	24	1	1	1	4,5	30
Hg	0	3,5	2,5	0	5	2,5	10	10

Примечание. 1 — чистые воды рек (фоновые значения), 2 — воды рек в местах слияния с ними шахтных вод, 3 — устья рек.

но и для рыбных запасов рек и прибрежной зоны Японского моря. Для предотвращения загрязнения необходимы отвод и очистка изливающихся шахтных вод.

С целью очистки загрязненных шахтных вод нами предложено на пути потока воды создать фильтрационный бассейн, состоящий из последовательно соединенных прудов. Перегородку между ними (рис. 2), построенную в виде дамбы и сложенную фильтрующим материалом, следует покрыть биопленкой, состоящей из активного ила, используемого в очистных сооружениях. Его микроорганизмы способны разлагать химические ингредиенты и переводить их в осадок. Шахтные воды, протекая через дамбу, будут частично очищаться. После очистки в дамбе вода поступит в пруд, засаженный водной растительностью, с помощью которой будет осуществляться доочистка воды.

В целом комплекс очистных сооружений должен включать: пруд–отстойник, блок инокуляции, накопительный пруд (приемник–регулятор), фильтрующий массив, пруд–водосборник. На входе и на выходе из пруда–отстойника предусматриваются переливные пороги с козырьком для создания падающей струи 0,5—0,8 м с целью усиления аэрации воды. Движение воды в комплексе будет осуществляться за счет разности высотных отметок входа и выхода сооружения. Для размещения комплекса можно использовать балки, овраги, естественные и искусственные откосы, в том числе откосы дорожных насыпей, при необходимости непосредственно русла временных и постоянных техногенных и естественных водотоков, требующих очистки. В пруде блока инокуляции устанавливаются (подвешиваются) контейнеры (сетчатые мешки из полиэфирной сетки с ячейкой 5 мм) с пористой загрузкой, иммобилизированной инокулятом (микроорганизмами). Перед фильтрующим массивом располагается накопительный пруд для равномерного распределения очищаемой воды при подаче в канал, заполненный фильтрующим материалом. За фильтрующим массивом планируется пруд с водной растительностью.

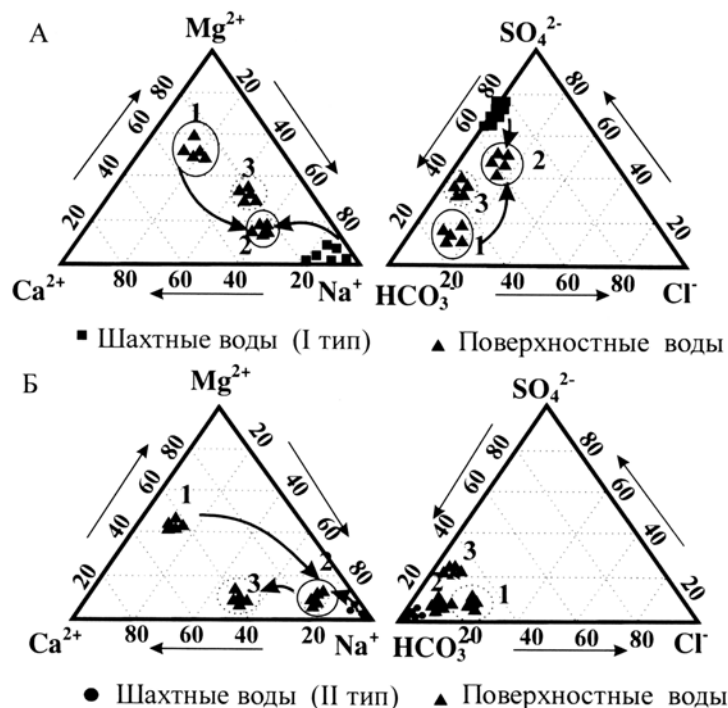


Рис. 1. Диаграммы изменения химического состава вод р. Тигровая (А) и р. Постышевка (Б). 1 — фон-  
 ровый створ, 2 — слияние речных и шахтных вод, 3 — устья рек

На основе этой принципиальной схемы разработаны и созданы лабораторные установки — фильтрационная и две биологические, а также емкость, имитирующая пруд-отстойник.

С целью выбора наиболее оптимального заполнителя для натурных испытаний проводилась серия лабораторных экспериментов. В результате выбраны фильтрующие материалы (горелые породы, углистые аргиллиты и галечники), которые благоприятны по физико-химическим показателям, не размокают и не дают просадки в водной среде и пригодны для лабораторных испытаний.

*Горелые породы*, преимущественно кварц-полевошпатового состава, представлены песчаниками, алевролитами и аргиллитами. По своим физико-механическим свойствам относятся к скальным (70 %) и полускальным (30 %) породам. По среднему минеральному составу это кварц — 46,4 %, полевые шпаты — 40,3 %, сульфиды — 5,04 %, магнетит + гематит — 4,04 %, углистое вещество — 1,50 %, слюды — 2,72 %. *Углистые аргиллиты*, с мелко-тонкозернистой структурой и тонко-слоистой текстурой, содержат мелкие прослойки каменного угля черного и смоляно-черного цвета, состоящие в основном из кларена с высокой степенью углефикации. Сложены аргиллиты в основном следующими минералами и минеральными образованиями: полевые шпаты — 32—35 %, кварц — 35—37 %, углистое вещество — 15—20 %, сульфиды (пирит) — до 3—5 %, слюды и глинистые минералы — 5—10 %, магнетит — 0,5—1,0 %. По крепости и физико-механическим свойствам относятся к полускальным породам, которые можно использовать в качестве материала для сооружения дамбы при очистке сточных шахтных вод. *Галечники* — состоят из окатанных обломков горных пород (диорит, андезит) размером в поперечнике >10 мм.

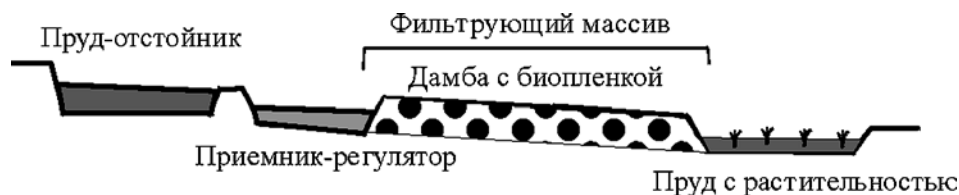


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема очистки загрязненных шахтных вод

Из высших водных растений для лабораторных исследований были выбраны следующие виды: ряска малая (*Lemna minor*), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum*) и элодея канадская (*Elodea canadensis*). Эксперименты осуществлялись в режимах, позволяющих наиболее полно охарактеризовать эффективность выбранного фильтровального и растительного материалов.

Испытания проводились с шахтными водами, изливающимися в нескольких точках: 1) на «Старой насосной» — шахта «Углекаменская»; 2) на ул. Замаараева в Партизанске — шахта «Глубокая».

В результате экспериментов установлено, что уже при отстаивании загрязненной шахтной воды в ней уменьшаются концентрации железа, аммония и алюминия, причем в некоторых случаях ниже ПДК.

Фильтрация шахтной воды через горелую породу приводит к понижению концентрации таких компонентов, как Al, Cr, Fe, Zn,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , при незначительном падении жесткости воды. Уровень ПДК при пропускании воды сквозь горелые породы не достигается. При длительном контакте шахтной воды с горелыми породами происходит уменьшение содержаний только кальция (с 254 до 55,1 мг/дм<sup>3</sup>) и цинка (с 0,0128 до 0,005 мг/дм<sup>3</sup>).

Фильтрация шахтной воды через галечник показала уменьшение в ней концентраций марганца (с 0,466 до 0,074 мг/дм<sup>3</sup>) и уголекислоты (с 1550 до 930 мг/дм<sup>3</sup>). При этом установлено загрязнение очищаемой воды кальцием (с 269 до 384 мг/дм<sup>3</sup>), кобальтом (0,009—0,042 мг/дм<sup>3</sup>) и магнием (114—228 мг/дм<sup>3</sup>).

Эффект фильтрования шахтной воды сквозь углистые аргиллиты выше, чем сквозь горелые породы и галечники. Установлена тенденция снижения концентраций (в мг/дм<sup>3</sup>) алюминия (с 0,272 до 0,102), хрома (0,041—0,011), железа (1,7654—0,2165), цинка (0,2147—0,0485), аммония (1,0—0,2), уголекислоты (1953—1581), сульфат-аниона (3020—1990) и хлора (22,0—15,0).

При длительном контакте ряски, элодеи или роголистника с шахтными водами в воде, профильтрованной как через горелые породы, так и через углистые аргиллиты, уменьшались концентрации аммония, а в воде, профильтрованной через углистые аргиллиты, почти в 5 раз уменьшалось содержание свинца.

В воде, профильтрованной через галечники, растения снижают концентрации свинца, марганца, никеля, кобальта, кальция и алюминия. Например, содержание кальция в воде ряска уменьшает в 3,1 раза, элодея или роголистник — в 2 раза. При этом эффективность очищения довольно высока: полученные содержания ниже ПДК по данному компоненту. При длительном воздействии (11 сут) ряски, элодеи или роголистника на шахтную воду, профильтрованную через галечники, наибольшая эффективность (соответственно 90-, 12- и 15-кратное уменьшение содержаний в очищаемой воде) их воздействия оказывается в отношении марганца. Однако уровень ПДК для данного компонента преодолевает только ряска. Высока также активность извлечения катионов свинца. Ряска, элодея и роголистник

уменьшают концентрацию свинца в шахтной воде соответственно в 3,5; 8,1 и 12,1 раза; цинка — в 3,6; 2,8 и 0,8 раза; кальция — в 3,5; 5,9 и 2,5 раза. Анализ эффективности различных видов растительности показал предпочтительное использование ряски.

Сопоставление результатов лабораторных экспериментов по шахтной воде излива «Старая насосная» с концентрациями предельно-допустимого сброса (ПДС) в р. Тигровая свидетельствует о том, что шахтные воды успешно очищались при фильтрации через горелые породы и углистые аргиллиты. При этом концентрации всех компонентов, кроме сульфат-аниона, достигали уровня ниже ПДС. Растения снижали содержание сульфат-аниона в шахтной воде до уровня ПДС.

Фильтрующий материал из горелых пород, содержащий активный ил с добавлением активных культур *Pseudomonas*, не очищает воды полностью до уровней ПДС по аммонии, железу, меди, цинку, алюминию и марганцу. При использовании же в качестве фильтрующего материала углистого аргиллита почти все показатели по очистке оказались ниже или близкими к ПДС: количество сульфат-аниона после очистки 326 мг/дм<sup>3</sup> (при норме ПДС 697,5), содержание Na + K — 315,0 + 263,5 мг/дм<sup>3</sup> (при ПДС 843).

Исследования показали, что от начального к конечному периодам очистки в биопленке соответственно происходят следующие изменения соотношения бактерий (в %): *Pseudomonas* — 51—65, *Micrococcus* — 12—4, *Bacillus* — 21—28, *Sarcina* — 8—3.

Таким образом, шахтные воды излива участка «Старая насосная» наиболее успешно очищаются при фильтрации через горелые породы и углистые аргиллиты. При этом все компоненты, кроме сульфат-аниона, достигают уровня ниже ПДС. А при добавлении в фильтрующий материал активного ила, содержащего культуры *Pseudomonas*, происходит очистка и от сульфат-аниона до уровня ниже ПДС. В результате достигается полная очистка шахтных вод.

Шахтные воды с излива на ул. Замаараева в Партизанске эффективно очищаются при фильтрации через углистые аргиллиты и галечники без добавления активного ила, содержащего штаммы микроорганизмов. Причем при фильтрации через галечники эффект очищения от сульфат-аниона наступает уже через 3 ч после начала эксперимента и достигается уровень концентрации в 7,1 раза ниже ПДС.

Следовательно, все три вида фильтрационного материала, использованного в лабораторных экспериментах, можно применять в качестве очистного наполнителя для искусственных фильтрующих массивов. Однако при очистке вод с содержаниями сульфат-аниона более 3000 мг/дм<sup>3</sup> наиболее эффективны углистые аргиллиты с биопленкой, содержащей активные штаммы микроорганизмов рода *Pseudomonas*.

Полученные результаты лабораторного моделирования очищения загрязненных шахтных вод показывают эффективность использования фильтрующих массивов, сложенных природными материалами, в совокупности с применением биотехнологий. Предложенная технология не требует дефицитных компонентов и специальных устройств с аэраторами, дополнительных материальных затрат и капиталовложений, исключает внесение химических реагентов и позволяет проводить очистку шахтной воды с наименьшими затратами и в кратчайшие сроки.