

УДК 556.3

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДЕТАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ
ВОД В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ**

Канд. техн. наук
Канд. геол.-мин. наук
Доктор техн. наук

Л.М. Павличенко
М.М. Бураков
Т.Т. Махмутов

Рассматривается построение гидродинамической и гидрогеохимической схемы потока подземных вод в районе интенсивной техногенной нагрузки на основе обработки данных по макро- и микрокомпонентному опробованию участка методом многомерной статистики. Интерпретация результатов осуществляется на основе закономерностей миграции компонентов химического состава подземных вод и схем распределения их нормированных значений по территории.

Интенсивная хозяйственная деятельность в районе Экибастузского каменноугольного месторождения привела к коренному изменению условий питания подземных вод и качественного состава источников питания. В настоящее время основной областью формирования подземных вод района является наиболее возвышенная территория, совпадающая в плане с площадями отсыпки породных отвалов. Породы в отвалах разрыхлены, высоко проницаемы и интенсивно (и практически без потерь) поглощают атмосферные осадки. Наличие в породах отвалов загрязняющих химических элементов в концентрациях, близких или превышающих ПДК, создает благоприятные условия для выноса этих элементов в подземные воды.

Общая схема выноса, установленная на основе имеющегося опыта статистической обработки геохимической и гидрогеохимической информации, представляется следующей. Важнейшим процессом, обуславливающим поступление и накопление в подземных водах ряда ионов, является окисление сульфидных минералов под действием кислорода в водно-воздушной среде, а также за счет бактериологического растворения сульфидов [1]. В результате образуется свободная серная кислота и сульфаты тяжелых металлов. Таким образом, в результате окисления сульфидных минералов воды, циркулирующие в районе отвалов, обогащаются ионами меди, цинка, железа, марганца, в несколько меньшей степени – свинца. Кроме того, увеличение окислительно-восстановительного потенциала

подземных вод вызывает наблюдающееся в последние годы увеличение кислотности атмосферных осадков.

Окисление сульфидов во многом определяется физиологией и биохимией аэробных микроорганизмов. Непосредственно взаимодействуя с минеральными и органическими компонентами среды их обитания или влияя на них через продукты метаболизма (серную кислоту, сульфат окисного железа, ферменты и др.), бактерий-аэробы обеспечивают окисление ряда химических элементов (FeO до Fe_2O_3 , SO до SO_2 и т.п.) и последующую их миграцию или осаждение. Следami деятельности этих бактерий является ион NO_3^- , имеющий, чаще всего, биогенное происхождение.

Процесс окисления сульфидных минералов протекает в природе при наличии более или менее значительной зоны аэрации. Отвалы вскрыши можно рассматривать как мощную искусственно созданную зону аэрации, насыщенную сульфидными минералами, причем площадь контакта этих минералов максимальна за счет дробления и измельчения пород в отвалах, а высокая рыхлость и пористость этих пород обеспечивает беспрепятственный доступ к ним атмосферного воздуха (окислителя) и интенсивно поглощаемой отвалами атмосферной влаги.

Еще одним результатом окисления сульфидов должно быть существенное снижение pH подземных вод, однако последние в районе обладают нейтральной и даже слабощелочной реакцией. Такие величины pH определяются растворением алюмосиликатов, сопровождающимся выщелачиванием подвижных катионов и образованием глинистых продуктов выветривания. В результате гидролиза в растворе должна накапливаться гидроксильная группа OH^- в тем больших количествах, чем больше в нем катионов, соответственно должно резко возрасти значение pH вод. Снижение щелочности в реальном растворе относительно теоретически рассчитанной (pH порядка 11-12) обуславливается нейтрализацией ее образующейся в результате окисления сульфидов серной кислотой, а также углекислотой или органическими кислотами. Растворением алюмосиликатов обусловлены относительно большие концентрации Mg , Si , Al , Sr , Ni .

Как показали наши исследования [6], преобладающие, региональные процессы формирования химического состава подземных вод на различных месторождениях, в районах породных отвалов — окисление сульфидов и растворение алюмосиликатов — не менее чем на 50-60 % определяют химический состав вод.

Для выявления и пространственной детализации интенсивности процессов формирования химического состава подземных вод в зоне влияния породных отвалов Прибортовой и Фестивальной исходные данные обрабатывались компонентным анализом. Как известно [3, 4], в его основу положена следующая гипотеза: наблюдаемые или измеряемые параметры являются лишь косвенными характеристиками изучаемого объекта или явления, на самом же деле существуют внутренние (скрытые, не измеряемые непосредственно) параметры или свойства, число которых мало и ко-

торые определяют значения наблюдаемых параметров. Эти параметры, называемые главными компонентами (ГК), как предполагается, сохраняют всю существенную информацию, содержащуюся во множестве наблюдаемых переменных. И хотя компоненты заранее не известны, компонентный анализ ставит задачу представить наблюдаемые параметры в виде линейных комбинаций ГК и определить их, то есть для каждого объекта указать значение каждой компоненты. Методические вопросы применения компонентного анализа в гидрогеологии и опыт интерпретации его результатов можно найти, например, в работах [5, 8, 9]. Опытные данные обрабатывались по программе, написанной Л.М. Павличенко и Т.Ф. Савиной.

Накопившийся опыт применения компонентного анализа для обработки гидрогеохимических данных позволяет отметить, что макрокомпонентный состав подземных вод дает информацию о динамике потока. Поэтому на начальном этапе статистической обработки информации решалась задача изучения изменений подземного водного и гидрогеохимического стока под влиянием разработки угольного разреза "Восточный" и сопутствующих ему предприятий (в первую очередь – отвалов вскрышных пород Прибортовой и Фестивальный). Соответственно в задаче 1 анализировались результаты макрокомпонентного гидрогеохимического опробования в 1995 г. территории 21 скважиной, каждая проба из которых характеризовалась 13-ю признаками: M (минерализация), pH , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Na^+ + K^+$, NH_4^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , O_2 (бихроматная окисляемость, мг/л). В результате обработки исходного набора данных выделились следующие главные компоненты, объясняющие 95,5 % суммарной дисперсии системы:

I (54,4%): $+ [Cl^-, M, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ + K^+, O_2, SO_4^{2-}]$,
 $- [HCO_3^-, NO_3^-, CO_3^{2-}]$;

II (22,5%): $+ [NH_4^+]$, $- [pH, NO_3^-, NO_2^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}]$;

III (9,3%): $+ [HCO_3^-]$, $- [NH_4^+, NO_2^-]$;

IV (6,5%): $+ [NO_2^-]$, $- [CO_3^{2-}]$;

V (2,8%): $+ [NO_3^-]$, $- [CO_3^{2-}]$.

При их составлении отбирались признаки, нагрузки на которые по модулю были больше значения 0,3, что превышает 95%-ный уровень статистической значимости коэффициентов корреляции с длиной ряда 20 членов. Для упрощения интерпретации в компонентах, имеющих на признаки нагрузки, близкие по модулю к 1, учитывалось количество признаков, достаточное для описания компоненты с точностью не менее 80%.

Поскольку ГК являются автоматически выделенными ассоциациями химических элементов, их можно рассматривать как закодированную за-

пись одного или набора гидрогеохимических процессов, отвечающих этим ассоциациям. Поэтому для интерпретации ГК использовались общетеоретические закономерности миграции химических элементов в подземных водах и схемы пространственного распределения нормированных значений концентраций химических элементов. Следует отметить, что простое совмещение схем распределения нормированных значений исходных признаков не позволяют сделать такие конкретные выводы о динамике подземных вод и детализировать процессы метаморфизации.

Первая и вторая ГК резко преобладают как по вкладу в общую дисперсию системы, так и по количеству больших компонентных нагрузок, поэтому можно считать, что в них находят отражение наиболее интенсивные процессы метаморфизации подземных вод, характерные для всей территории. На их фоне и во взаимодействии с ними протекают локальные (как по интенсивности, так и территориально) процессы, зафиксированные остальными компонентами.

Первая ГК с большими положительными нагрузками объединила все катионы, из анионов с положительными нагрузками в нее попали хлор и сульфат-ион, здесь же присутствует и минерализация. Анион Cl^- – типичный признак процесса испарительной концентрации – стоит в компоненте на первом месте. С отрицательной нагрузкой в компоненте выделились HCO_3^- и CO_3^{2-} – признаки атмосферного питания подземных вод, и NO_3^- – конечный продукт окисления органики.

Такое сочетание знаков нагрузок означает, что повышение концентраций Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Na^+ + K^+$, SO_4^{2-} и увеличение минерализации сопровождается одновременным уменьшением HCO_3^- , NO_3^- , CO_3^{2-} и является типичным проявлением процесса метаморфизации в результате движения подземных вод от областей питания к областям разгрузки. При картировании значений этой компоненты по точкам опробования области распространения больших положительных нагрузок будут характеризовать области разгрузки, а большие (по модулю) отрицательные – области питания.

Максимальное положительное значение этой компоненты приходится на скв.119 (см. рис.), минимальное положительное – на скв.122. Следовательно, подтверждается независимым методом предположение, высказанное выше о сложном характере движения подземных вод: район скв.119-112-122 является на рассматриваемый момент времени (1995 г.) областью их стока, в то время как в ненарушенных условиях он приходился на оз. Экибастуз. Большие положительные значения первой ГК, таким образом, выделяют область дренажа подземных вод карьером Восточный. С отвала Фестивальный продолжается сток в западном направлении, в сторону скв.

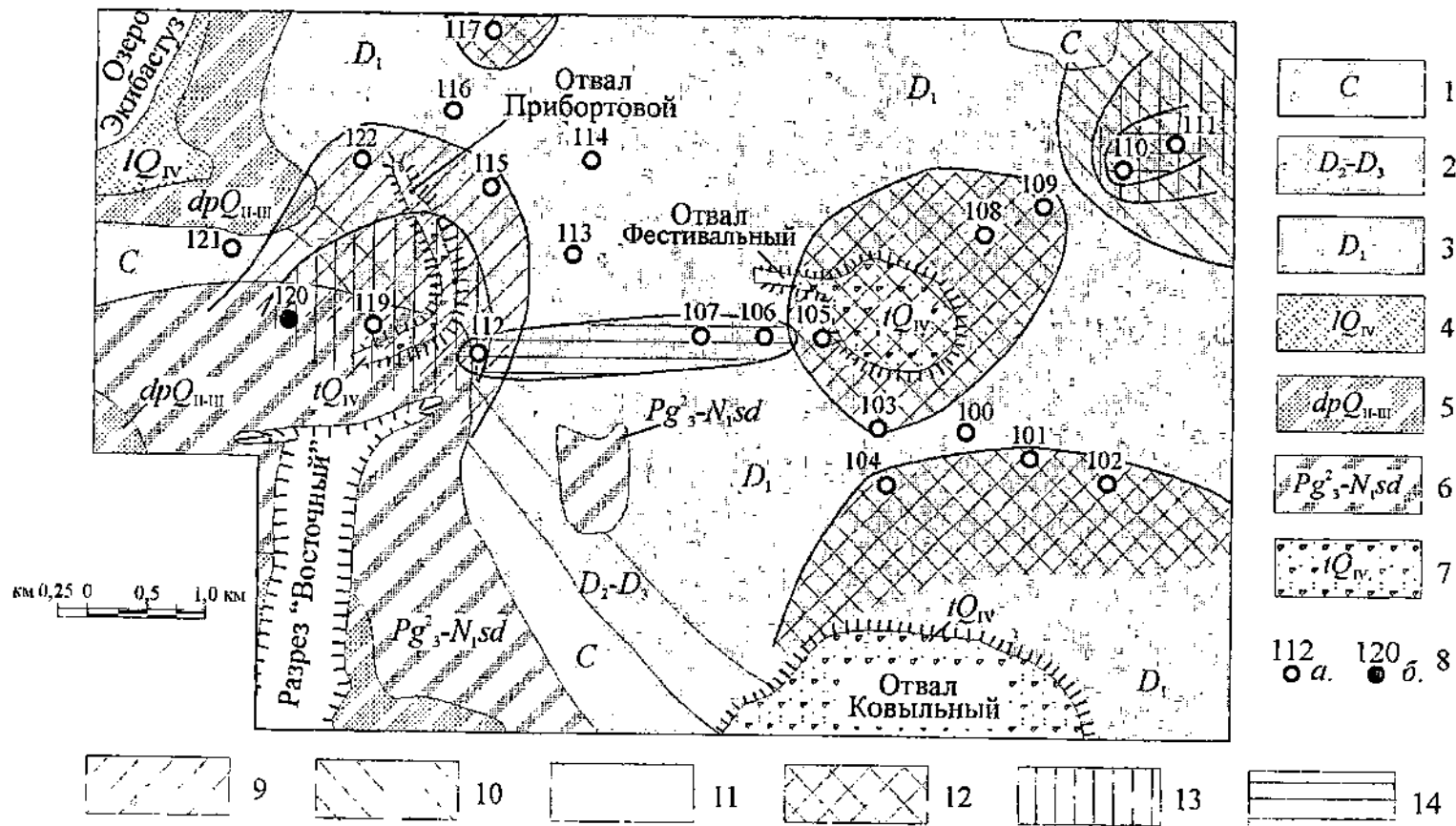


Рис. Схема формирования подземных вод

Условные обозначения к схеме формирования подземных вод: 1-6 – водоносные горизонты и комплексы: 1 – водоносный комплекс трещиноватых осадочных пород карбона. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, пласты каменных углей, 2 – водоносный комплекс трещиноватых осадочных пород среднего и позднего девона. Известковые песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, реже известняки, 3 – водоносный комплекс трещиноватых осадочно-эффузивных раннего девона. Андезиты, базальты, дациты, конгломераты, песчаники, порфириды, 4 – водоносный горизонт спорадического распространения в современных озерных отложениях. Глины, илы, пески, 5 – водоносный горизонт спорадического распространения в средне-позднечетвертичных делювиально-пролювиальных отложениях. Суглинки, глины с прослоями и линзами песков, 6 – водоносный горизонт спорадического распространения в отложениях позднего олигоцена – раннего миоцена (шидертинская свита). Глина с прослоями песка, гравия, песчаники; 7 – водопроницаемые, но практически безводные отложения – техногенные и техногенно-переработанные породы отвалов; 8 – скважины наблюдательной сети: а – вскрывшие подземные воды, б – безводные; 9-10 – зоны разгрузки подземных вод: 9 – дренированные (зона влияния разреза "Восточный"), 10 – локальная зона разгрузки подземного потока с отвала Фестивальный; 11 – зона транзита и регионального атмосферного питания подземных вод; 12 – зоны с наиболее благоприятными условиями атмосферного питания; 13-14 – зоны накопления мигрирующих тяжелых металлов: 13 – Sr, Ti, Mn, Si; 14 – V, Mo

119 и 112, отмечается и дополнительный сток в восточном направлении, где областью стока является район расположения скв. 111 и 110.

Подтверждается и область питания – она занимает основную часть исследуемой территории и характеризуется в задаче примерно одинаковыми условиями – нет больших по модулю отрицательных значений, то есть образовавшаяся корка на породных отвалах быстро уравнивает их с естественными участками по условиям поглощения атмосферного питания. Условия испарительной концентрации определяют процессы метаморфизации подземных вод более чем наполовину – они формируют 54,4 % суммарной дисперсии системы исходных признаков.

Во вторую ГК, объясняющую 22,5 % суммарной изменчивости исходных признаков, с большой положительной нагрузкой выделился ион NH_4^+ , а с отрицательными – pH , NO_3^- , NO_2^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , то есть эта компонента характеризует процесс их противоположного изменения: роста NH_4^+ , сопровождающегося одновременным уменьшением pH , NO_3^- , NO_2^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , либо наоборот. Поскольку окисление NH_4^+

проходит последовательно через стадии NO_2^- и NO_3^- , то естественной является интерпретация второй ГК как характеристики продолжающегося процесса окисления. На это указывает наличие не только его заключительной стадии – NO_3^- , но и промежуточной – NO_2^- . Привязка этого процесса к деятельности аэробных бактерий, окисляющих сульфидные минералы, подчеркивается наличием в этой компоненте аниона SO_4^{2-} , растущего вместе с ростом продуктов переработки органики.

Следовательно, область распространения отрицательных значений этой компоненты выделяет участки интенсивной окислительной деятельности атмосферного воздуха (наличие CO_3^{2-}) и аэробных бактерий (NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-}) в условиях щелочных вмещающих пород (pH). Весь отвал Фестивальный попал в область отрицательных значений второй ГК, а Прибортовой – только своей южной частью.

Третья ГК, объясняющая 9,3 % суммарной дисперсии системы исходных данных, с положительной нагрузкой выделила HCO_3^- , а с отрицательной – NH_4^+ и NO_2^- . Такое соотношение знаков нагрузок свидетельствует об их противоположно направленном изменении: при росте HCO_3^- уменьшается NH_4^+ и NO_2^- либо наоборот. Иными словами, эта компонента может интерпретироваться как характеристика интенсивности атмосферного окисления органики, причем здесь уже окисляется не только NH_4^+ , но и NO_2^- . Область положительных значений этой компоненты покажет участки с интенсивным атмосферным окислением органики и вполне естественным окажется совпадение распространения положительных значений этой компоненты с областями питания с поправкой на наличие органики. Оба породных отвала характеризуются именно такими условиями и попадают в область положительных значений третьей ГК.

Четвертая компонента, описывающая 6,5 % суммарной дисперсии, характеризует следующую стадию атмосферного (CO_3^{2-}) окисления органики – NO_2^- , а пятая ГК – завершение процесса окисления до NO_3^- . Оба отвала характеризуются незавершенностью стадии окисления органики, то есть косвенно подтверждается еще раз активная окислительная деятельность на их территории. Причем если по наличию процессов окисления (IV ГК) оба отвала попали в область положительных значений четвертой ГК, то по степени развития они различаются: весь Фестивальный попал в область положительных значений и пятой компоненты, а возле Прибортового есть участки отрицательных значений (скв.115 и 112), причем

на скв. 115 приходится и самое большое (по модулю) отрицательное значение, то есть отмечается дефицит процессов доокисления органики.

Таким образом, результаты решения задачи 1 позволили выявить основные процессы формирования химического состава подземных вод, тесно увязанные с их динамикой. Детализированы гидродинамические условия территории, прилегающей к разрезу "Восточный": отвалы пространственно совпадают с выявленными локальными очагами наиболее интенсивного питания подземных вод; установлена локальная зона разгрузки подземных вод, пространственно не совпадающая с разрезом "Восточный" (базисом стока территории). Повсеместное присутствие органики в подземных водах является отражением интенсивных окислительных процессов и вероятного загрязнения подземных вод тяжелыми металлами и другими вредными химическими элементами за счет окисления породообразующих минералов зоны аэрации и пород вскрыши в отвалах. Исследование специфики процессов миграции и накопления в подземных водах микрокомпонентов явилось целью решения задачи 2.

Матрица исходных данных в этой задаче включает полный набор признаков из задачи 1, к которому дополнительно подключаются результаты опробования подземных вод на Si , Al , Fe , Ti , Mn , Cu , Sr , Mo , V . В результате обработки исходного набора данных выделились следующие главные компоненты, объясняющие 95,47 % суммарной дисперсии системы (в скобках указаны признаки, нагрузки на которые в этой компоненте составляют $0,25 \pm 0,05$):

I (46,0 %): $+ [Cl^-, M, Sr, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ + K^+, Ti, O_2, Cu, SO_4^{2-}, Mn], - [HCO_3^-]$;

II (16,2 %): $+ [pH, NO_3^-, NO_2^-, V, Mo, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}], - [NH_4^+]$;

III (8,0 %): $+ [NH_4^+, Si], - [Al, Fe, CO_3^{2-}, HCO_3^-, pH]$;

IV (7,2 %): $+ [Mn, Mo, V(Fe)], - [Si, CO_3^{2-}, (pH, Cu)]$;

V (6,0 %): $+ [HCO_3^-, Si, Mo], - [NH_4^+, CO_3^{2-}, V]$;

VI (4,2 %): $+ [Fe, NO_2^-, (Si)], - [(CO_3^{2-})]$;

VII (3,3 %): $+ [Al, Si(Mo)], - [NO_2^-]$;

VIII (2,6 %): $+ [Al, NO_2^-], + [Mo]$

IX (1,9 %): $+ [V], - [CO_3^{2-}]$.

Введение микрокомпонентов подтвердило наличие процессов окисления сульфидных минералов, складированных в породах вскрыши, в зоне аэрации под действием кислорода в водно-воздушной среде и за счет бактериологического растворения сульфидов, в результате чего образуется

свободная серная кислота и сульфаты тяжелых металлов [2, 7]. Формализованная запись таких химических реакций нашла отражение уже в первой ГК. В нашем случае в результате окисления сульфидных минералов воды, циркулирующие в районе отвалов Фестивальный и Прибортовой, обогащаются ионами стронция, титана, меди, в меньшей степени – марганца (перечисление по мере убывания компонентных нагрузок). Самые большие (превышающие 0,9) нагрузки из тяжелых металлов в первой компоненте приходятся на *Sr* и *Ti*; нагрузка на *Cu* составляет 0,849, а на *Mn* – 0,519, что является прямым следствием валовых содержаний этих металлов во вскрышных породах. Отрицательная нагрузка на HCO_3^- свидетельствует о преобладающем микробном окислении минералов, отраженным в первой ГК. Порядок расположения макрокомпонентов в первой ГК имеет тот же вид, что и в задаче 1, таким образом, динамическая интерпретация компоненты сохраняется и дополняется более четким описанием процессов окисления, неявно (через наличие SO_4^{2-} и результатов переработки органики) присутствующих в первой ГК задачи 1.

Вторая ГК также описывает процессы окисления сульфидов из минералов, но здесь несколько иная специфика извлечения *V* и *Mo*, которая проявляется в сопровождении реакций наличием CO_3^{2-} и продуктов переработки органики – NO_3^- и NO_2^- , то есть указанием на более метаморфизованные подземные воды. Следовательно, эта компонента подчеркивает большую длительность процессов обогащения подземных вод *V* и *Mo* по сравнению со *Sr*, *Ti*, *Cu* и *Mn*.

Поскольку процесс окисления сульфидов протекает при наличии более или менее значительной зоны аэрации, положительные значения второй компоненты приурочены к участкам, где мощность этой зоны максимальна, а, следовательно, окисление сульфидов наиболее интенсивно. Это находит отражение и на схеме распространения значений этой компоненты по территории – положительные значения второй ГК приходятся на участки расположения отвала Фестивальный (причем накопление ванадия и молибдена тоже происходит по потоку подземных вод) и южную часть Прибортового. Однако влияние стока разреза "Восточный" и, возможно оз. Экибастуз, нарушают протекание процессов в северной части отвала.

Компоненты с третьей по шестую описывают процессы, связанные так или иначе, с реакциями разложения алюмосиликатов (во всех компонентах присутствуют кремний, железо и алюминий); их специфика подробно рассмотрена С.Л. Шварцевым [10]. Они проявляются в повышении водородного показателя среды до нейтральной и слабощелочной реакции при наличии мощных окислительных процессов. Так, третья ГК является целиком "алюмосиликатной" – она отражает органическое выщелачивание *Al* и *Fe*, сопровождающееся повышением *pH* при наличии связи под-

земных вод с атмосферой (признаки атмосферного питания подземных вод CO_3^{2-} и HCO_3^-). Поскольку знаки компонентных нагрузок на Al и Fe отрицательные, области активного проявления процессов их выщелачивания совпадут с областями распространения отрицательных значений третьей ГК. Интересно, что весь отвал Прибортовой попал в зону отрицательных значений этой компоненты, в то время как Фестивальный лишь своей северо-восточной частью. Таким образом, эта компонента показала гидрогеохимическую специфику отвала Прибортовой – здесь процессы растворения алюмосиликатов развиты наиболее интенсивно. Большая интенсивность этих процессов отмечается в зоне восточного потока с отвала Фестивальный – в скв. 109 фиксируется максимальное по модулю значение этой компоненты (-2,041).

Четвертая ГК характеризует совместное уравновешенное действие процессов окисления сульфидов и растворения алюмосиликатов – с положительными знаками нагрузок в компоненте выделились преимущественно "окислительные" элементы – Mn , Mo , V с небольшой добавкой Fe – "алюмосиликатного" элемента. Отрицательные нагрузки показали в основном растворение алюмосиликатов – небольшой добавкой к Si является Cu . Схема распределения этой компоненты отразит участки уравновешенного влияния процессов растворения алюмосиликатов (отрицательные значения) и окисления сульфидных минералов (области положительных значений).

Пятая, седьмая и восьмая ГК являются дополнением четвертой, шестая ГК – дополнением второй, девятая – первой. Они имеют небольшие вклады в суммарную дисперсию системы исходных данных, поэтому не имеет смысла на них останавливаться.

Обобщающим результатом этих двух задач является схема формирования подземных вод, детализирующая гидродинамические и гидрогеохимические условия участка, прилегающего к разрезу "Восточный". При выделении областей за основу взято распределение по площади значений первой ГК из задачи 1, которая решалась с целью выявления динамики подземных вод на основе обработки макрокомпонентного опробования территории. Интерпретация и уточнение границ выделенных зон осуществлялось по другим компонентам первой задачи с учетом результатов задачи 2. В схеме можно выделить следующие зоны (см. рис.):

- две зоны разгрузки, различающиеся по условиям и интенсивности процесса: зона 1а является зоной влияния дренирования, то есть фактически зоной влияния разреза "Восточный", а зона 1б – локальная зона разгрузки подземного потока с отвала Фестивальный. По соотношению численных значений компоненты соотношение интенсивности разгрузки дренированием (в зоне 1а) и испарением (в зоне 1б) оценивается как 8:1. Зоны разгрузки выделялись по изолинии +0,5 значений I ГК;

- зона транзита и регионального атмосферного питания (зона 2), традиционно для грунтовых вод совпадающие по площади;
- зоны с наиболее благоприятными условиями атмосферного питания, совпадающие территориально с зоной 3, и выделяемые по значению изолинии $-0,5$ значений I ГК. В пределах этих зон оказываются отвал Фестивальный, локальная зона в районе скв. 117 и зона, ограниченная скв. 104, 101 и 102. Последняя, возможно, является зоной влияния отвала Ковыльный;
- зоны накопления тяжелых металлов, выделяемые по компонентам задачи 3. Здесь отрисовываются зоны накопления мигрирующих *Sr*, *Ti*, *Mn*, *Cu* (4a) и *V*, *Mo* (4б). Две зоны с символом 4a (рис.) совпадают с выделенными зонами разгрузки, а зона 4б – с потоком подземных вод, направленным с отвала Фестивальный в сторону карьера "Восточный".

Таким образом, интерпретация результатов компонентного анализа позволила построить детализированную гидродинамическую схему потока подземных вод на основе обработки данных только по гидрогеохимическому опробованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Германов А.И., Пантелеев В.М., Швец В.М. Генетические связи органического вещества и микрокомпонентов подземных вод. – М.: Недра, 1975. – 136 с.
2. Гидрогеохимические методы поисков рудных месторождений в Центральном Казахстане (Методическое пособие) / Ларионова Г.Ф. и др. – Л.: Недра, 1971. – 152 с.
3. Йёреског К.Г., Клован Д.И., Реймент Р.А. Геологический факторный анализ. – Л.: Недра, 1980. – 223 с.
4. Джефферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии. – М.: Мир, 1981. – 213 с.
5. Павличенко Л.М. Исследование региональных гидрогеохимических процессов на основе компонентного анализа. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ташкент, 1984. – 23 с.
6. Павличенко Л.М., Бураков М.М., Махмутов Т.Т. Факторы формирования химического состава подземных вод на месторождении Коксу в Южном Казахстане // Вестник КазГУ. Серия экологическая. – 1997. – № 3. – С. 41-47.
7. Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия. – Л.: Недра, 1975. – 208 с.
8. Хаустов А.П. Многомерный анализ гидрогеологических систем горно-складчатых областей. – Новосибирск: Наука, 1986. – 112 с.

9. Чесалов С.М. Изучение распределения макрокомпонентов в подземных водах кембрийско-протерозойского водоносного комплекса с использованием некоторых математических методов // Гидрогеологические исследования при решении проблемы сброса промстоков в терригенные породы кембрия. – М.: Изд. МГУ, 1978. – С. 35-50.
10. Шварцев С.Л. Проблема равновесия подземных вод с алюмосиликатными горными породами // Гидрогеология и инженерная геология. – Новочеркасск: Изд. НПИ, 1977. – С. 13-20.

Казахский государственный национальный
университет им. аль-Фараби
Институт гидрогеологии и гидрофизики
им. У.М. Ахмедсафина МО и Н РК