

Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Деменев А.Д.

Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета (ЕНИ ПГНИУ), Пермь, nmax54@gmail.com, khmurchik.vadim@mail.ru, demenevartem@gmail.com

ПРИЗНАКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПРОТЕКАНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На планете существуют два основных типа геохимических обстановок – окислительная и восстановительная – резко отличающиеся как по составу преобладающих газов, так и подвижностью химических элементов и, соответственно, составом преобладающих минералов. При этом для оценки степени окисленности или восстановленности среды используют величину окислительно-восстановительного потенциала Eh. В настоящее время восстановительную геохимическую обстановку принято разделять еще на две – глеевую (или восстановительную без сероводорода) и восстановительную сероводородную, так как при одной и той же величине рН и Eh геохимические условия могут быть резко различными в зависимости от содержания сероводорода [1]. Например, в условиях резковосстановительной среды железо и большинство халькофильных элементов могут быть как очень подвижными (в отсутствие сероводорода), так и практически неподвижными, если в воде есть сульфид- и гидросульфид-ионы, образующиеся при диссоциации сероводорода.

Окислительная геохимическая обстановка характеризуется присутствием в водах свободного кислорода или других сильных окислителей. Типоморфным элементом, т.е. элементом, миграция ионов и соединений которого определяет характерные геохимические особенности протекающих эпигенетических процессов, для окислительной геохимической обстановки является кислород. Железо, марганец, медь, ванадий, сера и ряд других элементов находятся в высоких степенях окисления : (Fe^{3+} , Mn^{4+} , Cu^{2+} , V^{5+} , S^{6+} и др.). Многие минералы трехвалентного железа (лимонит, гидрогетит, гематит и др.) имеют красную, бурую или желтоватую окраску, которую придают вмещающим их породам. Металлы с переменной валентностью в окисленном состоянии обычно обладают меньшей растворимостью, чем в восстановленном, и при окислении выпадают из растворов в осадок.

Глеевая геохимическая обстановка характеризуется отсутствием в водах свободного кислорода и других сильных окислителей, либо очень малым содержанием кислорода; образуется она при избытке органического вещества в отсутствие сульфатов. Типоморфным газом глеевой обстановки является углекислый газ, а иногда и метан. Соответственно, воды содержат много растворенной уголекислоты, часто содержат метан и другие углеводородные газы, а сероводорода нет или его содержание очень мало. В этих условиях легко мигрируют железо и марганец, имеющие низкие степени окисления (Fe^{2+} , Mn^{2+}). Трехвалентное железо может восстанавливаться до двухвалентного состояния микроорганизмами. Минералы двухвалентного железа (сидерит, вивианит и др.) имеют белую, синюю, зеленоватую окраску, которую и придают вмещающим их породам. Как правило, глеевая обстановка сочетается с анаэробным метаногенным сообществом микроорганизмов.

Восстановительная сероводородная геохимическая обстановка характеризуется отсутствием в водах свободного кислорода и других сильных окислителей. Ее типоморфным газом является сероводород. Соответственно, воды содержат много растворенного сероводорода, часто содержат метан и другие углеводородные газы. Образование сероводорода обусловлено в первую очередь, если не исключительно, деятельностью сульфатвосстанавливающих бактерий. Развитие этого сообщества, как правило, определяется поступлением доступного органического вещества. Железо и многие другие металлы не способны к миграции, так как образуют труднорастворимые сульфиды, которые могут цементировать породу. При этом доминирует образование гидротроилита $\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, имеющего черный цвет. Осадочные сульфидные месторождения в большинстве случаев связаны с деятельностью сульфидогенного микробного сообщества в прошлом.

Таким образом, геологическая среда в разных геохимических обстановках характеризуется разными наборами характерных признаков, часть из которых обнаруживается не только инструментально, но и визуально (табл. 1).

Признаки геохимических обстановок

	Окислительная	Восстановительная	
		глеевая	сероводородная
Преобладающие газы	Кислород	Углекислый газ, метан	Сероводород
Окислительно-восстановительный потенциал Eh, мВ	0,15 – 0,7	< 0,15	От -0,5 до -0,6
Окраска пород	Красная, бурая, желтая	Сизая, серая, зеленая	Черная
Преобладающие минералы	Лимонит (FeOOH·(Fe ₂ O ₃ ·nH ₂ O)), гидрогетит (α-FeOOH·nH ₂ O), гематит (Fe ₂ O ₃)	Сидерит (FeCO ₃), вивианит (Fe ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O)	Гидротроилит (FeS·nH ₂ O)
Степени окисления химических элементов	высшие	низшие	низшие

Поскольку микроорганизмы получают энергию от окислительно-восстановительных реакций, представляющих перенос электрона от донора к акцептору, возможность развития микроорганизмов зависит от Eh среды, т. е. геохимической обстановки. По отношению к кислороду микроорганизмы могут быть разделены на несколько групп. *Аэробы* нуждаются в кислороде для дыхания. Среди них *облигатные аэробы* используют в качестве акцептора электрона только кислород. *Микроаэрофилы* требуют пониженной концентрации кислорода. *Факультативные анаэробы* могут переходить от дыхания кислородом к анаэробнозису. *Анаэробы* подразделяют на облигатные и аэротолерантные. Обладая метаболизмом только анаэробного типа *аэротолерантные анаэробы* могут расти в присутствии воздуха. *Облигатные анаэробы* чувствительны к токсическому действию кислорода и не только развиваются в условиях аноксии, но и требуют восстановительной обстановки [2]. Микробное сообщество представляет совокупность взаимодействующих между собой функционально различных микроорганизмов. Его устойчивость обеспечивается адаптационной динамикой с заменой одних видов другими в зависимости от внутренних или внешних причин.

Все микроорганизмы воздействуют на твердый компонент грунта, используя для своего питания содержащиеся в нем химические элементы. Микроорганизмы способны разрушать важнейшие минералы горных пород – силикаты, алюмосиликаты и карбонаты. Микроорганизмы могут также играть роль и в цементации пород. Трансформации твердого компонента грунтов и пород обычно сопряжены с потреблением или выделением газов и, таким образом, с изменением газового состава геологической среды. Потребление газов наблюдается при бактериальных процессах нитрификации, азотфиксации, окислении водорода, метана, угарного газа, сероводорода, сернистого газа, автотрофной ассимиляции углекислоты. Разложение микроорганизмами органических веществ, бикарбонатов, сульфатов в зависимости от условий, в которых оно происходит, ведет к выделению углекислого газа, азота, аммиака, сероводорода, метана, летучих органических веществ и др., тем самым микроорганизмы могут увеличивать поровое давление в грунте и придавать ему плавунные свойства. В результате жизнедеятельности микроорганизмов изменяются состав и ионная сила растворов, их pH, окислительно-восстановительный потенциал и др. При стабильном состоянии грунтов микроорганизмы способны нивелировать колебания газового состава, состава поровых вод и твердого компонента [3].

С течением времени одна геохимическая обстановка может сменяться другой как по природным, так и техногенным причинам. Смена окислительной обстановки восстановительной может произойти в результате заводнения грунтов или затопления территорий, ухудшающих их кислородный режим, так как содержание кислорода, растворенного в воде, значительно меньше его содержания в атмосфере. Наличие при этом доступного для микроорганизмов органического вещества благоприятствует развитию анаэробной микрофлоры. В присутствии достаточного количества сульфатов получают развитие сульфатвосстанавливающие бактерии, а восстановительная обстановка из глеевой может превратиться в сероводородную. Аналогичное изменение вызывает поступление в геологическую среду органических веществ, на окисление которых расходуется содержащийся в среде кислород. Кроме того, пленки из таких веществ (например, нефтяных при нефтяных проливах) на поверхности сред препятствуют поступлению в них кислорода из атмосферы. Смена восстановительной геохимической обстановки окислительной

обстановкой может наблюдаться при поступлении в геологическую среду значительного количества веществ-окислителей, особенно кислорода. Это происходит при карьерной или шахтной добыче полезных ископаемых, когда кислород атмосферы получает доступ к глубокозалегающим породам, в том числе и с водами, просачивающимися с поверхности по трещинам в породах; при закачке в горизонты загрязненных подземных вод окислителей, в том числе воздуха, с целью снижения миграции веществ-контаминантов, особенно тяжелых металлов. При этом происходит угнетение жизнедеятельности анаэробного микробного сообщества, зато могут получить развитие аэробные микроорганизмы.

Так, поступление органических загрязнений в грунтовые воды, а вместе с ними и в синие кембрийские глины, лежащие в основании транспортного тоннеля, привело к развитию в глинах гетеротрофных аэробных и факультативно-анаэробных бактерий, а также тионовых бактерий, вырабатывающих серную кислоту, что привело к деформациям и разрушению тоннельной конструкции [4]. Повышенное загрязнение грунтовых вод канализационными стоками привело к значительному развитию микроорганизмов, в результате чего песчаный грунт приобрел плавунные свойства, а прочность глинистых грунтов снизилась на 30% и более [5]. Отмечается, что пески любого состава могут переходить в состояние истинных плавунцов при их микро- биотическом загрязнении и содержании бактериальной массы более 50 мкг/г, а биохимическая генерация малорастворимых газов (CH_4 , N_2 , H_2) усиливает способность водонасыщенных песков переходить в плавунное состояние [6].

Аварийные разливы и сбросы нефти в карстовые полости на территории Полазнинского нефтяного месторождения, расположенного в Полазнинском карстовом районе Пермского края, привели к образованию на поверхности грунтовых вод в карстовом массиве нефтяной линзы мощностью до 2 м, которая изменила их кислородный режим, что в конечном счете привело к формированию восстановительной обстановки и развитию в грунтовых водах анаэробных сульфатовосстанавливающих бактерий, жизнедеятельность которых может привести к усилению карстового процесса [7].

Аварийные утечки нефти и технологических жидкостей в карстовые полости на территории Кокуйского нефтяного месторождения, расположенного в Иренском карстовом районе Пермского края, также привели к формированию в них восстановительной геохимической обстановки, развитию бактериального процесса восстановления сульфатов и сероводородному загрязнению грунтовых и поверхностных вод, а также атмосферы.

Поступление в водохранилище промышленных сточных вод с высоким содержанием органических веществ привело к развитию в теле грунтовой плотины очагов с глеевой геохимической обстановкой, из которых наблюдался вынос железа, и восстановительной сероводородной обстановкой, в которых наблюдалось образование сульфидных минералов. Лабораторные исследования показали, что активизация жизнедеятельности микроорганизмов грунта может привести к снижению его прочностных характеристик [8-10].

При производстве строительных работ в Курганской области строительным котлованом были вскрыты пиритсодержащие глинистые отложения чеганской свиты, что в условиях окислительной геохимической обстановки привело к развитию в них сернокислотного процесса, опосредованного тионовыми бактериями, и повышению агрессивности грунтовых вод к строительным материалам и конструкциям [11].

Добыча угля на территории Кизеловского угольного бассейна в Пермском крае привела к контакту серосодержащих пород с кислородом воздуха и развитию в них микробиологически опосредованного сернокислотного процесса. Угледобыча сопровождалась складированием на поверхности породных отвалов и отходов переработки угля с высоким валовым содержанием серы, которая в условиях окислительной геохимической обстановки подвергалась окислению тионовыми бактериями, что также привело к развитию в отвалах сернокислотного процесса [12].

Таким образом, смена одной геохимической обстановки другой при нарушении стабильного состояния геологической среды при техногенном воздействии сопровождается соответствующим изменением признаков (табл. 1). С изменением геохимической обстановки в геологической среде происходит и смена бактериального сообщества; получают развитие другие бактериальные процессы, приводящие к иному состоянию свойств геологической среды, которое не могло быть учтено ранее, и, таким образом, эти процессы являются неблагоприятными с инженерной точки зрения. Изменение любого из свойств соответствующей геохимической обстановки при неизменности остальных может являться диагностическим признаком начальных этапов развития неблагоприятных

микробиологических процессов. При наличии таких признаков необходимы специальные исследования, показывающие опасность процессов с инженерно-геологической точки зрения.

Список литературы

1. *Перельман А.И.* Геохимия эпигенетических процессов. М, Недра, 1965. 272 с.
2. *Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н.* Введение в природоведческую микробиологию. М., Книжный дом «Университет», 2001. 256 с.
3. *Максимович Н.Г., Хмурчик В. Т.* Влияние микроорганизмов на минеральный состав и свойства грунтов // Вестник Пермского университета, Сер. Геология, 2012, Вып. 3(16), с. 47-54.
4. *Дашко Р.Э., Панкратова К.В., Коробко А.А.* Исследование инженерно-геологических факторов для оценки динамики разрушения тоннеля на участке автодороги Санкт-Петербург - Киев // Записки Горного института, 2012, Т. 195, с. 24-27.
5. *Дашко Р.Э., Шидловская А.В.* Биотическая и абиотическая компоненты в подземной среде: их генезис и влияние на состояние и свойства песчаных отложений // Записки Горного института, 2012, Т. 197, с. 209-214.
6. *Дашко Р.Э., Котюков П.В., Шидловская А.В.* Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей // Записки Горного института, 2012, Т. 199, с. 9-16.
7. *Maksimovich N.G., Khmurchik V.T.* Remediation of Oil-Polluted Groundwater Aquifers at Karst Region // In: "Engineering Geology for Society and Territory", Vol. 3 "River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources" (Lollino G. et al. Eds.) - Springer, 2015 - P. 417-419.
8. *Максимович Н.Г., Хмурчик В. Т., Деменев А.Д.* Роль микроорганизмов в повышении мутности дренажных вод плотины // Гидротехническое строительство. 2015 (в печати).
9. *Maksimovich N.G., Khmurchik V.T.* The Influence of Microbiological Processes on Subsurface Waters and Grounds in River Dam Basement // In: "Engineering Geology for Society and Territory", Vol. 6 "Applied Geology for Major Engineering Projects" (Lollino G. et al. Eds.) - Springer, 2015 - P. 563-565.
10. *Максимович Н.Г., Хмурчик В. Т.* Микробиологические процессы в грунтовых плотинах // Инженерные изыскания, 2013, № 9, с. 66-71.
11. *Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Денисов А.В.* Историко-геологическая обусловленность геоэкологических проблем Курганского Зауралья // Мат. на- уч.-практ. конф. «Проблемы инженерных изысканий для строительства в Уральском регионе» (Екатеринбург, 3 июня 2003 г.) - Екатеринбург, 2003. - С. 42-45.
12. *Максимович Н.Г., Черемных Н.В., Хайрулина Е.А.* Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна // Географический вестник, 2006, №2, с. 128-134.