

# ПРИРОДНЫЕ ГАЗЫ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И НЕОБХОДИМОСТЬ ИХ УЧЕТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОЦЕНОК

*К.г.-м.н. Е.П. Янин*

Институт геохимии и аналитической химии  
им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

*yanin@geokhi.ru*

Рассматривается газоносность рудных месторождений. Отмечается, что при освоении рудных месторождений содержащиеся в массах рудных месторождений газы ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и др.) могут создавать экологические и гигиенические проблемы. Наличие повышенных концентраций газов и формирование газовых ореолов следует учитывать при проведении инженерно-экологических изысканий, оценок воздействия на окружающую среду, экологических экспертиз и при разработке планов природоохранных и санитарно-гигиенических мероприятий в районах разведки и эксплуатации рудных месторождений.

Горнорудные районы являются районами активного техногенного преобразования окружающей среды. Это связано с изъятием и механическим нарушением значительных массивов земель и особенно с интенсивным загрязнением среды обитания широким кругом химических элементов и их соединений. «Рудная деятельность человечества, – как подчеркивал в свое время В.И. Вернадский, – является одним из больших биогеохимических процессов современной эпохи и вносит новое в геохимию всех химических элементов» [3, с. 229]. Во многом это обусловлено тем, что применяемые ныне технологии позволяют использовать при добыче руд лишь небольшую часть (первые проценты) извлекаемой массы горных пород. Все остальное накапливается в виде отходов, рассеиваемых природными миграционно-ными процессами и являющихся источниками загрязнения окружающей среды химическими элементами [25, 26, 34–36]. Именно процессы и последствия техногенного загрязнения практически всегда (и вполне справедливо) оказываются в центре внимания при проведении инженерно-экологических изысканий, при оценках воздействия на окружающую среду, при проведении экологических экспертиз, при разработке различных природоохранных мероприятий в горнорудных районах.

В то же время в горнорудных районах вокруг залежей руд и особенно в зонах дизъюнктивных нарушений, контролирующих оруденение, формируются достаточно интенсивные газовые ореолы (зоны повышенного содержания в воздухе различных газов). Газоносность рудных месторождений генетически связана с вмещающими газоносными породными толщами: углеводородные газы (особенно метан) приурочены к регионам совместного залегания рудных формаций и осадочно-метаморфогенных пород, содержащих рассеянную органику или угольные и газонефтеносные пласты. Как правило, природные газы крайне неравномерно распределены по площади и разрезу рудного месторождения, что во многом определяется конкретными геологическими условиями. Присутствие значительных объемов газов установлено для многих типов рудных месторождений. Так, А.А. Скочин-

ский [27, 28] обращал внимание на проявления метана в железных, свинцовых, апатитовых, золотых и полиметаллических рудниках, а также при разработке некоторых россыпных месторождений. Л.Н. Овчинников, рассматривая проблемы образования атмохимических ореолов рудных месторождений, показал, что они обычно имеют поликомпонентный состав [17]. В них входят такие компоненты, как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Rn}$ ,  $\text{Ar}$ , пары галоидов ( $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{I}$ ) и др. В настоящее время газовая фаза рассматривается как специфически долгоживущий в геологическом времени след рудообразования, а газы (газовые ореолы) используются при поисках рудных месторождений и геологическом картировании [31].

При освоении рудных месторождений содержащиеся в массивах рудных месторождений природные газы нередко могут создавать достаточно серьезные производственные, гигиенические и экологические проблемы, которые часто не учитываются при проведении соответствующих экологических исследований и при разработке природоохранных мероприятий в районах разведки и эксплуатации рудных месторождений. Существует даже мнение [11], что масштабы миграции горючих газов в рудных месторождениях невелики, поэтому при нормальной вентиляции горных выработок рудников они практически отсутствуют в рудничной атмосфере. Тем не менее с развитием горнодобывающей промышленности, особенно за счет ввода в эксплуатацию новых месторождений, механизации процессов добычи, применения систем разработки с массовым извлечением руды, вскрытия и отработки более глубоких горизонтов все чаще приходится сталкиваться с увеличением количества поступающих в рудничную атмосферу газов [9, 12, 13]. Выделение спонтанного газа в подземные выработки часто достигает таких количеств, что весьма затрудняет проходку горных работ. Это усложняет обеспечение безопасных условий труда горнорабочих и отрицательно сказывается на производительности рудников. В России отмечены значительные выделения горючих газов (в основном метана) в рудниках цветных металлов Норильска, Северного Кавказа (Уруп и др.), Магадана, апатитовых (Хибины), алмазных (Якутия) и других. За рубежом такие газопроявления отмечаются в железорудных (Кривой Рог), золотых (Казахстан, ЮАР), серных и урановых (Узбекистан), полиметаллических рудниках (Канада) и др. Поступления углекислого газа в горные выработки наблюдаются в некоторых рудниках Забайкалья (Балей, Тасевский), железорудных Кривого Рога и Румынии (месторождение Харфита).

Этот факт – наличие повышенных концентраций различных газов и формирование газовых ореолов (в сущности, зон загрязнения) в районах расположения рудных месторождений – следует учитывать при разработке проектов освоения последних, при проведении инженерно-экологических изысканий, оценок воздействия на окружающую среду, экологических экспертиз и при разработке планов природоохранных и санитарно-гигиенических мероприятий.

Анализ геологического строения рудных месторождений, при освоении которых отмечены устойчивые выделения природных газов, показал, что их газоносность обусловлена, как правило, газами, чуждыми по генезису самому полезному ископаемому и связанными с залеганием вблизи рудоносных формаций газопронизывающих и газовмещающих толщ, преимущественно седиментационно-метаморфогенных, содержащих каменный уголь, битумы и флюиды (газ, нефть, вода) [13]. В общем случае рудные месторождения полезных ископаемых содержат два типа газов: газы метаморфического (химического) происхождения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и др.); газы ра-

диоактивного происхождения (He, эманации Ra, Th, Ar, Xe) [2, 6, 7, 29]. Согласно [21, 31, 32], для рудных месторождений особенно характерно присутствие следующих природных газов: углекислый газ, кислород, азот, углеводородные соединения, водород, сероводород, сернистый газ, галоидные соединения углерода, оксид углерода, аммиак, редкие газы (аргон, криптон, ксенон, радон, неон и гелий) (табл. 1).

Выделяются четыре основных вида связи газовых компонентов с рудными телами [32]: 1) Скопления газов в рудных телах, локализованных в тектонически ослабленных зонах, являющихся основными путями перемещения как рудообразующих растворов, так и природных газов. 2) Скопления газовых компонентов в результате протекающих в зоне окисления рудных месторождений химических реакций. В зоне окисления сульфидных руд, в частности, происходит образование сульфатов из сульфидов. Отмечается связывание кислорода и образование серной кислоты и сульфатов. Последние, взаимодействуя с карбонатными растворами, выделяют углекислый газ, и в результате происходит обеднение пространств (особенно замкнутых) кислородом и обогащение углекислым газом, сероводородом и сернистым газом. 3) Появление в аномальных концентрациях газовых компонентов продуктов радиоактивного распада (к числу этих компонентов относятся радон, торон, гелий, водорода, тяжелые углеводородные газы). 4) Эндогенные газовые ореолы рудных тел, образованные газами, заключенными в газово-жидких включениях рудных тел и окружающих их литохимических (первичных) ореолов.

Согласно обобщению [13], природные газы, осложняющие разработку рудных месторождений, связаны с определенными геологическими условиями (табл. 2): 1) метан, нередко с примесями его гомологов и водорода, – с совместным залеганием руд и осадочно-метаморфогенных пород, содержащих органику, как концентрированную в виде угля и нефти (Якутия, Норильск, Средняя Азия, Ярега, СУБР. Никитовка и др.), так и рассеянную (Уруц, Кривой Рог, Миндяк, Бестюбе, Восток-2, Дальнегорск); 2) существенно водородные газы – с массивами ультраосновных (дунитовых) пород (Нижний Тагил, Хромтау, Албания); 3) углекислый газ – с районами альпийской складчатости (Карпаты, Кавказ, Забайкалье, Приморье); 4) сероводород – с водоносными комплексами битуминозных пород с застойным режимом и месторождениями серных руд (Мирный, Средняя Азия).

Состав природных газов рудных месторождений, как уже отмечалось выше, обычно достаточно сложный, а происхождение каждого из основных газовых компонентов отличается полигенностью, но в основном обусловлено метаморфизмом органики в различных термодинамических условиях [13]. В свою очередь, распределение природных газов по площади и разрезу рудных месторождений характеризуется, как правило, неравномерностью, локальной приуроченностью скоплений к газогенерирующим и газоконсервирующим литологическим и структурным элементам. Газовая зональность определяется пространственным расположением газоносных и экраняющих горизонтов, дегазирующих элементов и рудоносных формаций. Коллекторские свойства горных пород, слагающих газоносные рудные месторождения, характеризуются большим разнообразием. Наиболее высокой газемкостью обладают угленосные и битуминозные отложения, газонасыщенные водоносные комплексы и отдельные горизонты и зоны, отличающиеся повышенной пустотностью. Для различных типов коллекторов значимость отдельных форм состояния газов (свободное, растворенное, сорбированное, микровключенное, кристаллогидратное) различны. Для безугольных сухих

горных пород основное значение имеет свободный газ, для угленосных пород – сорбированный, для водо- и нефтеносных пород – растворенный, для некоторых изверженных и соляных пород – микровключенный, а для отдельных участков трещиновато-пористых пород распространения вечной мерзлоты – кристаллогидратный.

В особую группу могут быть выделены газы флюидных включений в минералах, которые эмитируют (экстрагируются) в окружающую среду в процессах обогащения руд (особенно при тонком измельчении пород и при нагревании их до высоких температур). Например, на Богунайском золоторудном месторождении во флюидных включениях кварца, пирита, халькопирита, галенита и сфалерита из золотоносных кварцевых жил установлены  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ , соединения, содержащие серу ( $CS_2$ ,  $O_2S$ ,  $COS$ ,  $C_2H_6S_2$ ), азот ( $C_3H_7N$ ,  $C_3H_7NO_2$ ,  $C_4H_8N_2O$ ), алифатические углеводороды (парафины, олефины), арены, кислородсодержащие углеводороды (спирты, эфиры, альдегиды, кетоны) [24]. Среди газовых компонентов рудных месторождений ведущую роль часто играет углекислота, обнаруженная в 90% флюидных включений минералов гидротермального генезиса, на втором месте находится метан, третье занимает азот, значительно реже обнаруживаются  $H_2S$  и  $C_nH_m$ , при этом  $H_2$  и  $CO$  встречаются еще реже [5]. Состав и концентрации газов варьируются в широких пределах: концентрация  $CO_2$  может достигать 8 моль/кг раствора;  $CH_4$  – 3 моль/кг раствора. Нередко в составе рудообразующих флюидов присутствует  $H_2S$  в виде собственной фазы высокой плотности. Возникающие в рудных телах микротрещины обуславливают высвобождение палеофлюидов из газово-жидких включений и миграцию рудных газов к земной поверхности [31, 37]. Микрогазохимические компоненты адсорбируются в припочвенном слое над слепыми рудными телами, что приводит к изменениям физико-химических параметров растительности и почв, в том числе и их спектрально-отражательных характеристик.

Как отмечает Н.Г. Матвиенко [13], в настоящее время ряд стратегически важных рудных месторождений и регионов столкнулись с условиями многофазового насыщения массивов газообразными, жидкими и твердыми флюидами и выделения в горные выработки сложного состава и состояния веществ со взрывоопасными и токсичными свойствами. Это, по мнению автора цитируемой работы, определяет необходимость изучения природы такого сочетания негативных условий и разработки основ обеспечения безопасности освоения месторождений с учетом характера и состава насыщения указанными флюидами. Согласно современным представлениям о формах нахождения флюидов в пористых твердых средах, существование природных газов в недрах земной коры возможно в следующих фазовых состояниях: свободное (трещины, каверны, поры); сорбированное в различных вариантах; растворенное в жидкостях (вода, нефть); кристаллогидратное (клатратное) – при наличии свободной воды в трещинах и порах, диаметр которых составляет несколько сотен ангстрем, и при соответствующих термобарических условиях. Анализ результатов изучения газоносности рудных месторождений показывает, что их газовый фактор представлен, как правило, несколькими видами флюидонасыщения [13] (табл. 3). Наиболее многофазным флюидонасыщением отличаются рудонефтегазоносные, рудоугольные и рудоводогазоносные типы месторождений. При этом природа, характер и виды флюидонасыщения обусловлены газоуглеводородоносностью рудовмещающих формаций и не зависят от природы и генезиса твердого рудного полезного ископаемого.

## Природные газы рудных месторождений [32]

Тип газа	Основные источники природных газов	Характер газовойделений	Газовые компоненты			Примеры месторождений
			основные	иногда встречающиеся в значительных количествах	встречающиеся в виде примесей	
Углекислый, иногда углеводородный	Расположенные поблизости и на сравнительно небольшой глубине	Газирующие минеральные источники; длительное газирование разведочных скважин; крупные и мелкие сульфидные выделения в горных выработках	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S, тяжелые углеводородные газы (гомологи метана – от C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> и выше),	Район Тьрибгузского вольфрамо-молибденового м-ния, Худесское медноколчеданное (Кавказ), Балейское золоторудное (Забайкалье) и др.
Углекисло-углеводородный	Глубоко расположенные магматические очаги, возможно, находящиеся на последнем этапе своей деятельности; осадочные породы, содержащие углестов и битуминозное вещество	То же	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S, тяжелые углеводородные газы (гомологи метана – от C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> и выше), редкие газы	Рудные Северо-Западного Кавказа и др.
Углеводородный	Угльные пласты, нефтяно-газовые породы, породы с органическим веществом, подвергшиеся термальному воздействию со стороны интрузивных тел	Длительное газирование скважин; крупные и мелкие сульфидные выделения в горных выработках	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , тяжелые углеводородные газы (гомологи метана – от C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> и выше), He	H <sub>2</sub> S, редкие газы	Норильские медно-никелевые, алмазные Якутии и др.
Углеводородно-азотный, крайне редко – азотно-водородный	Метаморфические и изверженные породы; незначительная миграция из глубин	Слабое, эпизодическое газирование; интенсивное газирование отмечается крайне редко, главным образом мелкие сульфидные выделения в горных выработках; крупные – очень редко	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , He,	тяжелые углеводородные газы (гомологи метана – от C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> и выше), H <sub>2</sub> S, редкие газы; редко – NH <sub>3</sub>	Хибинские апатито-нефелиновые, железорудные Даннемора (Швеция) и др.

**Газоносные рудные месторождения, характер основного газового, коллектора, формы газоразделений и опасные явления [13]**

Типы газоносности, регион	Основные газы	Характер коллектора	Формы скоплений	Газообильность, тыс. м <sup>3</sup> /сут	Опасные случаи
Рудонепфтегазоносные: алмазные (Якутия), титановые (Коми), урановые и серные (Средняя Азия)	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , H <sub>2</sub>	Нефтегазоносные трещиноватоносные пористые породы	Газонепфтеприток, суффляры, выбросы, дегазация нефти	1,5 – 30,0	Взрывы и загорания
Рудоугольные: медно-никелевые (Норильск), полиметаллические (Кавказ, Приморье), золоторудные (ЮАР)	CH <sub>4</sub>	Угольные пласты угленосные породы	Газоотдача угольных пластов и пород, суффляры, выбросы	0,6 – 15,0	Взрывы и загорания
Рудосланцевые: железорудные (Кривой Рог), бокситовые и золоторудные (Урал, Казахстан)	CH <sub>4</sub>	Породы с включениями угля	Мелкие струи, газоотдача отбитых пород	0,5	Загорания
Рудодотогазоносные: алмазные (Якутия), серные (Ср. Азия и др.)	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S	Водоносные комплексы	Газоводоприток, выбросы, газоотдача вод	0,2 – 8,0	Загорания, отравления
С газовыми включениями в изверженных породах: апатитовые (Хибинь), редкоме-талльные (Повозеро)	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub>	Изверженные породы	Мелкие струи, газоотдача отбитых пород	до 0,1	Загорания
Водородоносные: хромитовые и платиновые (Урал, Албания)	H <sub>2</sub>	Массивы ультраосновных пород	Газовые струи	до 0,1	Загорания
Углекислоносные: золоторудные и сульфидные (Забайкалье, Приморье, Карпаты, Кавказ)	CO <sub>2</sub>	Обводненные массивы альпийской складчатости	Газовые струи, газоотдача вод	до 12	Отравления

Виды флюидонасыщения газоносных рудных месторождений [13]

Типы газоносности, регион	Основные газы	Основные источники флюидов	Фазовое состояние газов (в порядке уменьшения доли в общем содержании)	Формы газоразделений	Максимальное содержание газов, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Рудонефтегазоносные: алмазные (Якутия), титановые (Коми), урановые и серные (Ср. Азия)	СН <sub>4</sub> , С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub> , Н <sub>2</sub>	Нефтеносные вмещающие и рудоносные формации	Растворенные в нефти и водах свободный, газогидратный	Газонефтеприток; суфляры; дегазация нефти; разложение газогидратов	В нефти 700, в водах 7, в гидратах 240
Рудоугольные: медно-никелевые (Норильск), полиметаллические (Кавказ и Приморье), золоторудные (ЮАР)	СН <sub>4</sub>	Угленосные отложения	Связанный с угольным веществом (сорбированный и в виде твердого раствора), свободный растворенный в водах, метангидратный?	Газоотдача угольный пластов и пород; суфляры, выбросы	В углях 70
Рудосланцевые: железорудные (Кривой Рог), бокситовые и золоторудные (Урал, Казахстан)	СН <sub>4</sub>	Угленосные отложения	Сорбированный, свободный растворенный, метангидратный?	Мелкие струи; газоотдача отбитых пород	В сланцах 10
Рудоводогазоносные: алмазные (Якутия), серные (Ср. Азия и др.)	СН <sub>4</sub> , Н <sub>2</sub> S	Водоносные массивы	Растворенный, свободный, Н <sub>2</sub> S химически связанный, газогидратный?	Газоводоприток; газоотдача вод; выбросы	В водах 7
С газовыми включениями в изверженных породах: апатитовые (Хибинь), редкометалльные (Ловозеро)	СН <sub>4</sub> , Н <sub>2</sub>	Зоны во вмещающих породах	Свободный, микровключенный	Мелкие струи; газоотдача отбитых пород	1
Водородоносные: хромитовые и платиновые (Урал, Албания)	Н <sub>2</sub>	Обводненные зонитрициноватых пород	Свободный; растворенный	Газовые струи	0,1
Углекислотноносные: золоторудные и сульфидные (Забайкалье, Приморье, Карпаты, Кавказ)	СО <sub>2</sub>	Водоносные массивы	Растворенный, свободный, газогидратный?	Газовые струи; газоотдача вод	до 20

Одной из особенностей Хибинского и Ловозерского щелочных массивов является насыщенность их необычными для магматических комплексов водородно-углеводородными газами разных морфологических типов (форм нахождения) [1]. Основными морфотипами являются газы закрытых пор (микровключенные, окклюдированные газы – ОГ), находящиеся главным образом в вакуолях флюидных микровключений в минералах, и свободно (спонтанно, самопроизвольно) выделяющиеся газы (СГ), которые обычно заполняют системы в той или иной степени связанных трещин (чаще микротрещин) и другие полости в породах [5, 20]. ОГ могут экстрагироваться лишь при тонком измельчении пород или нагревании их до высоких температур, а СГ выделяются из пород при выходе их скоплений или газоподводящих зон на дневную поверхность и при вскрытии, например, шпуром, скважиной или горной выработкой. В некоторых отношениях переходной формой нахождения между двумя основными являются диффузно-рассеянные газы, также отчасти способные к самопроизвольному выделению [15, 16]. Установлено, что в пределах рудных месторождений Хибинского и Ловозерского щелочных массивов главным компонентом газовой фазы является метан, подчиненными – молекулярный водород (иногда может доминировать) и этан [1]. В качестве микрокомпонентов присутствуют более тяжелые гомологи метана (до пентанов включительно), непердельные углеводороды и гелий. Сравнительно редко и в незначительных количествах обнаруживаются оксид и диоксида углерода. Окклюдированные газы представляют преимущественно лишь научный (геохимический) интерес. Напротив, изучение свободных газовывделений всегда имело практическую направленность, в первую очередь потому, что являясь горючими и взрывоопасными, компоненты СГ могут накапливаться до опасных концентраций в атмосфере подземных рудников, создавая тем самым серьезную угрозу нарушения технологического цикла ведения горных работ, а также здоровью и жизни горняков [4, 18]. Поэтому газознность (условия локализации, состав, содержание в породах, характер и масштабы выделения газов) стала неотъемлемой частью горно-геологической характеристики этих месторождений. На рудных месторождениях Хибин наблюдалось явление так называемой струйной миграции газов (интенсивный поток газов) [33]. На Хасутском рудном поле Малкинского рудного узла (Северный Кавказ) установлены повышенные уровни концентраций водорода, радона, метана и углекислого газа в почвенном воздухе [19]. Балейские золоторудные месторождения, расположенные в Восточном Забайкалье и являющиеся одними из крупнейших в России, отличаются специфическими особенностями от большинства золоторудных районов нашей страны [9]. К этим особенностям относятся: состав руд, близповерхностные условия формирования месторождений, геологическое строение, а также их высокая газознность. В процессе ведения горных работ, особенно на глубоких горизонтах, рудничные газы стали большой помехой, и борьба с ними потребовала всестороннего изучения условий газознности Балейских месторождений. В результате проведенных наблюдений за газовыделениями на различных горизонтах рудников было установлено, что основная масса природного газа поступает в рудничную атмосферу в виде «сухих» газовых струй или спонтанного газа, выделяющегося из высокоминерализованной воды. В большинстве случаев эти газопроявления приурочены к наиболее молодым крутопадающим нарушениям северо-восточного простирания, выполненным, как правило, кварцевыми рудоносными жилами. Выходы природного газа в горные выработки были отмечены также и из тектонических

нарушений, не выполненных жильным материалом. В результате произведенных анализов свободно выделяющегося газа выяснилось, что он почти целиком состоит из углекислого газа (99–100%) и лишь в отдельных пробах отмечается незначительное содержание азота и метана. В результате проведенных исследований состава рудничного воздуха на горизонтах рудников, а также изучения материалов горноспасателей было установлено, что концентрация углекислого газа в рудничной атмосфере составляет 0,1–7%; с глубиной и приближением горных выработок к тектоническим нарушениям (кварцевым жилам) она резко возрастает, достигая 27%.

Как уже следует из вышеприведенных материалов, газом, широко представленным в генезисе рудной минерализации, является метан [8, 15]. Поступление метана непосредственно из почвы обусловлено активностью метатрофных микроорганизмов, изменяющейся в зависимости от состава и термического режима почвы [30]. На недавно открытом крупном урановом месторождении в пределах Новоконстантиновского рудного поля при проведении горных работ неоднократно фиксировались газопроявления в виде тумана с характерным запахом газоконденсата. Газопроявления сопровождался возгоранием метана [10]. На Новоконстантиновском урановом месторождении на глубине 2,2–2,5 км выявлено скопление метана [11]. Диаметр куполообразного газового месторождения достигает 8 км. Предполагаемое давление газа в залежи составляет 450 атмосфер. Исследования путей миграции природного газа метаморфического происхождения на поверхность и в горные выработки рудника Новоконстантиновского уранового месторождения показали, что наиболее вероятным проводником природного газа являются геологические нарушения (разломы). Механизм газовыделения в урановом руднике можно представить следующим образом. При пересечении разломов горными выработками происходит их осушение и, как следствие, увеличение газопроницаемости тектонических трещин. Осушение разломов приводит также к снижению гидростатического давления на газ, находящийся в залежи. Учитывая, что горные работы проводятся на глубине 500 м, снижение гидростатического давления должно произойти на 50 атм. Дальнейшее ведение работ на глубинах до 1200 м приведет к снижению давления на 120 атм. Увеличение газопроницаемости тектонических трещин глубинных разломов и снижение гидростатического давления на газ вызовут рост интенсивности его миграции из залежи к поверхности и в горные выработки рудника. Предложено выделить угрожаемые зоны в выработках, пересекающих указанные разломы, с последующим контролем и применением мер безопасности. На одной из шахт Новоконстантиновского уранового месторождения уже было зафиксировано выделение метана. После взрывных работ даже произошло его возгорание в опережающей горизонтальной скважине, пробуренной в тектоническое нарушение с целью изучения обводненности данной зоны.

Метанообильность рудоугольных месторождений определяется, естественно, их угленосностью, газоносностью угля и масштабами горных работ в газоносных породах. Интенсивные и длительные (до 10–15 лет) поступления метана наблюдаются в выработках, пройденных по угольным пластам и вмещающим их пористо-трещиноватым породам [23]. Наиболее метанообильными из отечественных рудников являются рудники Норильского района, при освоении которых неоднократно происходили внезапные выбросы угля и газа, суфлярные и обычные газовыделения, а абсолютная метанообильность достигала 8–15 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Постоянные выделения метана происходят с 1948г. в руднике «Заполярный», в котором многие выработки

проходятся по угольным пластам и вмещающим их осадочным и изверженным породам. За весь 60-летний период наблюдений в выработки этого рудника выделалось не менее 50 млн. м<sup>3</sup> метана. Характерной и весьма важной особенностью является приуроченность интенсивных газопроявлений к выработкам первой очереди проходки (стволам, квершлагам, штрекам), проведенным как по угольным пластам, так по осадочным и изверженным породам, включая рудоносные. Заблаговременная (за 3–5 лет до выемочных работ) проходка капитальных и подготовительных выработок оказывает, как правило, глубокое деггазирующее воздействие на трещиноватый массив, приводящее в условиях этого рудника к отсутствию газо-выделений из трещин при очистной выемке руды. Только на одном участке для достижения такого эффекта пришлось применить деггазационную систему из выработок и скважин, пройденных по угольному пласту. Этой системой было за 3 года извлечено более 2,4 млн. м<sup>3</sup> метана.

Из зарубежных месторождений следует отметить золоторудные ЮАР, на которых природные условия газоносности (первичные источники газа – метанугольные пласты, залегающие в породах кровли рудовмещающих формаций, вторичные – трещиноватые зоны и горизонты, нередко обводненные) (Н.М.В. Eschenburg, 1980), цит. по [13]). Метанообильность некоторых рудников ЮАР достигала 60 тыс. м<sup>3</sup>/сут. При вскрытии газоносных трещин скважинами и выработками происходит выделение метана (иногда с примесями водорода) в форме суфляров. На руднике «Виргиния» (ЮАР) очистным забоем (лавой) была вскрыта на глубине 1 км трещиноватая зона, из которой происходило в течение нескольких лет выделение метана с первоначальным дебитом более 42 м<sup>3</sup>/мин. При освоении обводненных газоносных месторождений масштабы газовыделений определяются притоком вод, их газонасыщенностью, составом газов. Обычно наиболее значительны объемы поступлений в горные выработки хорошо растворимого углекислого газа. Интенсивные выделения метана отмечаются при вскрытии напорных газодоносных скоплений. Водоносные породы отдают на 1–2 порядка больше жидкости по объему, нежели метана. Газоотдача сероводородоносных вод существенно зависит от их кислотности: при pH > 8 выделение сероводорода практически не происходит [13].

Наиболее сложными по характеру и интенсивности газопроявлений являются газодонефтеносные и газоугленосные рудные месторождения [13]. Так, при газоносности, представленной угленосными породами, освоение рудных месторождений сопровождается всеми известными формами газопроявлений: от внезапных выбросов метана, угля и породы до спокойной газоотдачи обнаженных поверхностей угленосного массива и отбитых от него пород. При освоении газонефтеводоносных месторождений твердых полезных ископаемых также происходит несколько видов флюидопроявлений – от фонтанных газожидкостных проявлений (в основном в разведочных и опережающих скважинах) до спокойной газоотдачи излившейся жидкости и обнаженного породного массива. Проявления выбросного типа как газугольного, так и газожидкостного состава происходят при вскрытии коллекторов в зонах высокого пластового давления, поэтому прогнозу таких зон при ведении горных работ должно уделяться особое внимание. Проблема обеспечения газобезопасности освоения месторождений твердых полезных ископаемых в условиях газонефтеносности вмещающих массивов по своей сложности может быть отнесена к разряду уникальных в горном деле, таких как борьба с внезапными выбросами угля и газа и горными ударами. Ее решение актуально для ряда горнопромышленных регионов. Ос-

новными видами опасностей, возникающих при освоении газонефтеносных месторождений, являются газодинамические проявления в виде выбросов флюидов (газ, вода, нефть) и пород, газоотдачи в окружающую среду излившейся нефти, вод и битуминозных пород, испарений легких фракций нефти, образование взрывчатых газоздушных смесей, создание пожароопасной обстановки. Факторами, определяющими характер опасностей и сложность их предупреждения, являются состояние нефти, ее свойства, баротермические условия флюидонасыщения, распределение газонефтеносных скоплений в массиве и их пространственное расположение относительно выработок рудников. Нефтеносные породы независимо от характера нефтенасыщения (жидкое, полужидкое, твердое состояние) содержат природные газы, в основном углеводородные, но иногда с примесями водорода, сероводорода и других газов. Газы находятся в свободном и растворенном состояниях как в нефти, так и в сопутствующей ей воде. Основные количества углеводородных газов, представленных в основном метаном, находятся в растворенном в нефти состоянии, так как их растворимость в ней на несколько порядков выше, чем в водах. Газоносность жидкой нефти зависит от давления и свойств нефти и может достигать 80–120 м<sup>3</sup> на кубический метр нефти. Газоносность неподвижной нефти и твердых битумов, являющихся, как правило, продуктами процессов преобразования жидкой нефти, в результате которых теряются ее подвижные компоненты, включая газ, отличается низкими величинами (озокерит) или даже полной потерей газовой фазы (асфальтит).

Обобщение данных по изучению газового фактора практически всех 30-ти отечественных газоносных рудных месторождений, осваиваемых 40 рудниками и шахтами, позволили установить закономерности приуроченности, состава, характера и интенсивности выделений природных газов при их освоении [13]:

- газопроявления на месторождениях и в рудниках происходят не повсеместно, а лишь в пределах локальных участков или горизонтов, содержащих газы или газированные жидкости, и отмечаются, как правило, при работах первой очереди: бурение скважин, шпуров, проходка выработок;

- состав выделяющихся газов определяется типом коллектора: на газонефтеносных и угленосных рудных месторождениях они представлены углеводородами с преобладанием метана и примесями азота и водорода; в начальный период газопроявлений содержание Н<sub>2</sub> бывает высоким;

- при бурении разведочных и опережающих скважин на рудогазонефтеводоносных месторождениях (особенно на территории распространения покровной толщи многолетнемерзлых пород) происходят фонтанные флюидопроявления при вскрытии коллекторов с начальным дебитом взрывоопасных газов до 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут и высоким содержанием Н<sub>2</sub>;

- в рудниках наблюдаются практически все возможные формы газовыделений: быстрая дегазация разрушенных при отбойке горной массы и гидратов: газовые струи, включая суффляры; истечение через обнаженные поверхности пород, в том числе содержащих газогидраты; газоотдача жидкостей; выбросы газов, а также газов и жидкостей; выбросы газов, углей и пород; характер газовыделений определяется типом коллектора и видом его насыщения;

- интенсивность газовыделений изменяется в широком диапазоне: газообильность рудников колеблется от 40–80 м<sup>3</sup>/сут до 30–42 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Наиболее значительны дебиты газов на месторождениях с многофазовым флюидонасыщением, связанных с угле- и нефтегазоносными отложениями (при выбросах до 30–42 тыс. м<sup>3</sup>/сут, при обычных выделениях 1,5–8,0 тыс. м<sup>3</sup>/сут);

- не отмечается зависимости газообильности рудников от их производительности.

Природа и параметры флюидонасыщения рудного месторождения, его геотектоническое строение и коллекторские свойства вмещающих и рудоносных пород обуславливают приуроченность, характер, состав и интенсивность газожидкостных проявлений и закономерности их влияния на газобезопасность геологоразведочных и горных работ (табл. 4). Точность расчета ожидаемой газообильности горных выработок и рациональное применение мер борьбы с газовыделениями в них возможны только при наличии исчерпывающих данных по газоносности месторождения: распределения природных газов в рудовмещающей толще, геологических факторов, определяющих такое распределение, генезиса отдельных газовых компонентов и др. [10].

С позиций производственной безопасности все месторождения (по газовой ситуации) могут быть разделены на пять типов [22]:

I тип – месторождения, при разработке которых выделения газов обусловлены рассеянной органикой, газовыми включениями в рудах и вмещающих породах. Интенсивность газовыделения низкая, газообильность рудников не превышает 500 м<sup>3</sup>/сут. К этому типу относятся железорудные месторождения Кривого Рога, Хибинские апатитовые, золоторудные Бестюбе и Миндяк.

II тип – обводненные месторождения, в которых выделения газов в выработки обусловлено в основном газоотдачей подземных вод. К месторождениям этого типа относятся: Якутские кимберлитовые трубки, Урупское колчеданное месторождение, Николаевское свинцово-цинковое месторождение. Метанообильность рудников колеблется от 200 м<sup>3</sup>/сут (Уруп) до 5000 м<sup>3</sup>/сут (карьер «Мир»),

III тип – месторождения, в строении которых принимают участие угольные сланцы, пропластки и пласты угля. Интенсивность газовыделений колеблется от 600 до 12000 м<sup>3</sup>/сут. К таким месторождениям относятся полиметаллические Норильские, оловянное Омсукчанское.

IV тип – месторождения, источниками горючих газов на которых являются газонефтеносные породы. Интенсивность газовыделений (от 600 до 15000 м<sup>3</sup>/сут) определяется давлением газов и проницаемостью массива. К этому типу относится Подольское колчеданное месторождение.

V тип – месторождения, газоносность которых обусловлена залеганием вблизи от рудных тел угленосных и газонефтеносных пород. Интенсивность газовыделения – от 600 до 20000 м<sup>3</sup>/сут. К таким месторождениям могут быть отнесены Талнахское и Октябрьское в Норильске.

Выделения взрывчатых газов в рудниках проявляются, как правило, с глубины 300 м и более от поверхности (в большинстве случаев на глубине 500–600 м и более). В общем случае в рудниках возможны следующие виды выделения газов [22]: обыкновенное (газоотдача обнаженных поверхностей пород через невидимые поры и трещины); суфлярное (газовые струи и выбросы газов); быстрая дегазация разрушенной горной массы; газоотдача подземных вод. Наибольшее практическое значение имеют суфлярные выделения и дегазация разрушенной горной массы. В общем случае характер выделения и газообильность рудников определяются природными и горно-техническими факторами, такими как вид источника газовыделения, степень газонасыщенности месторождения, развитие горных работ в пределах газоносных горизонтов и участков.

Влияние многофазной флюидизации на обеспечение газобезопасности освоения рудных месторождений [13]

Типы месторождений	Фазовое состояние газов	Формы проявления	Дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности*
<i>Рудогазонефтеносные:</i> - алмазные (Якутия)	CH <sub>4</sub> , TУ-растворенные в нефти и водах, гидратный, H <sub>2</sub> -свободный	Выбросы из скважин, суфляры, газо-нефтеприток, дегазация нефти и вод, разложение гидратов, запоздалая газоотдача взорванных пород	Бурение разведочно-опережающих дегазационных скважин через герметизатор, отвод газожидкостных смесей, дегазация, спецгазострот буровзрывных работ, мониторинг содержания CH <sub>4</sub> и H <sub>2</sub> в воздухе
- титановые (Коми)	CH <sub>4</sub> растворенный	Выбросы из скважин, газонефтеприток, газоотдача нефти и вод	Газонефтеотвод, дегазация, вентиляция
- урановые и серные (Средняя Азия)	CH <sub>4</sub> , TУ, растворенные, свободные	То же	То же
<i>Рудосульфидные:</i> - медноникелевые Норильска и Талнаха - полиметаллические Кавказа и Приморья - золототоруановые ЮАР	CH <sub>4</sub> , сорбированный, гидратный, свободный То же То же	Выбросы газа и нефти, суфляры, газоотдача углей и пород Суфляры, газоотдача углей и пород Суфляры	Дегазация, противовыбросные мероприятия То же Газоотвод
<i>Рудоводогазоносные:</i> - алмазные (Якутия) - серные (Ср. Азия)	CH <sub>4</sub> растворенный, свободный, H <sub>2</sub> S химически связанный	Выбросы из скважин, газоводоприток, газоотдача вод То же	Газоводоотвод, вентиляция, подавление H <sub>2</sub> S То же

\* Здесь не перечисляются обязательные для всех горных работ в условиях выделений взрывоопасных газов требования по вентиляции, применению оборудования во взрывозащитном исполнении, автоматическому контролю содержания взрывоопасных газов.

Таким образом, в районах рудных месторождений формируются газовые ореолы  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и др. В результате ввода в эксплуатацию новых месторождений, механизации процессов добычи, применения систем разработки с массовым извлечением руды, вскрытия и отработки более глубоких горизонтов все чаще приходится сталкиваться с увеличением количества поступающих в рудничную атмосферу газов. Это в значительной мере усложняет обеспечение безопасных условий труда горнорабочих, отрицательно сказывается на производительности рудников и нередко создает достаточно серьезные производственные, гигиенические и в определенной степени экологические проблемы. Наличие повышенных концентраций различных газов и формирование газовых ореолов (в сущности, зон загрязнения) в горнорудных районах следует учитывать при проведении инженерно-экологических изысканий, оценок воздействия на окружающую среду, экологических экспертиз и при разработке планов природоохранных и санитарно-гигиенических мероприятий в районах разведки и эксплуатации рудных месторождений.

## Литература

1. *Асавин А.М., Нивин В.А., Чесалова Е.П. и др.* Геоэкологический мониторинг литосферной газовой эмиссии в Арктике на основе современных беспроводных технологий // <http://www.ras.ru/FStorage/Download.aspx?id=017f4263-4031-4adb-874d-15fef4f07901>.
2. *Белюсов В.В.* Очерки геохимии природных газов. – М.: Химгеолог, 1937. – 87 с.
3. *Вернадский В.И.* Геохимия марганца в связи с учением о полезных ископаемых // Тр. Конф. по генезису руд железа, марганца и алюминия. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1937, с. 229–246.
4. *Икорский С.В., Нивин В.А.* Опыт изучения горючих газов изверженных горных пород на руднике Ловозерского ГОКа // Горный журнал, 1984, № 11, с. 55–58.
5. *Икорский С.В., Нивин В.А., Припачкин В.А.* Геохимия газов эндогенных образований. – СПб.: Наука, 1992. – 179 с.
6. *Козлов А.А.* Проблемы геохимии природных газов. – М.: Гостоптехиздат, 1950. – 234 с.
7. *Кравцов А.П.* Геологические условия газоносности угольных, рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1968. – 332 с.
8. *Кузин А.М.* Некоторых общих свойствах флюида в геологических процессах, явлениях и закономерностях (к обоснованию единой системы геолого-геофизического изучения недр). Часть 1 // Научное сетевое издание «Актуальные проблемы нефти и газа» / [http://oilgasjournal.ru/vol\\_12/kuzin1.html](http://oilgasjournal.ru/vol_12/kuzin1.html).
9. *Куликова Н.Н.* Геохимия газов золоторудных месторождений Забайкалья. – М.: Наука, 1972. – 115 с.
10. *Лукин А.Е.* Создание учения о нефтегазоносных кристаллических массивах – насущная проблема геологии XXI века // Дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений. К 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина. – М.: ГЕОС, 2011, с. 405–441.
11. *Маркин В.А., Безбородов В.А., Яковенко Е.А., Матвеев С.С.* Исследование процессов миграции природного газа в пределах горного массива Новоконстантиновского уранового месторождения и оценка степени опасности проникновения газа в горные выработки рудника // Способы и средства

создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – Макевка-Донбасс: Изд-во МакПИИ, 2014, вып. 1(33), с. 22–27.

12. *Матвиенко Н.Г.* Газобезопасность освоения рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2000, № 7, с. 31–34.

13. *Матвиенко Н.Г.* Научные основы обеспечения безопасности освоения газоносных рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011, № 1, с. 238–253.

14. *Наумов Г.Б., Миронова О.Ф.* Природа газов флюидных включений в минералах // Докл. IX междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле». Т. 1. – М., 2009, с. 207.

15. *Нивин В.А.* Диффузно-рассеянные водородно-углеводородные газы в породах нефелин-сиенитовых комплексов // Геохимия, 2009, № 7, с. 714–733.

16. *Нивин В.А.* Газовые компоненты в магматических породах: геохимические, минералогические и экологические аспекты и следствия: Автореферат дисс. ... докт. геол.-мин. наук. – М.: ГЕОХИ РАН, 2013. – 51 с.

17. *Овчинников А.Н.* Образование рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 255 с.

18. *Онохин Ф.М.* Горючие газы Хибинского щелочного массива // Советская геология, 1959, № 5, с.109–118.

19. *Парада С.Г., Давыденко Д.Б., Клещев А.В.* Опыт применения в горных районах технологии дистанционной флюидоиндексации для поиска и оценки новых типов руд благородных металлов // <http://old.skgmigt.ru/mountain2010.pdf>.

20. *Петерфильс И.А.* Геология и геохимия природных газов и дисперсных битумов некоторых геологических формаций Кольского полуострова. – М.-Л.: Наука, 1964. – 171 с.

21. *Печук П.М.* Проникновение газов по трещиноватым породам в помещении и выработки. – Киев: АН УССР, 1962. – 112 с.

22. Производственная безопасность: Учеб. пособие. – СПб.: Горный институт, 2005. – 152 с.

23. *Рубан А.Д., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С., Матвиенко Н.Г.* Метан в шахтах и рудниках России: прогноз, извлечение и использование. – М.: ИПКОН РАН, 2006. – 312 с.

24. *Рябуха М.А., Гибишев Н.А., Толмаченко А.А. и др.* Флюиды Богунайского золоторудного месторождения в гранулитах Южно-Енисейского кряжа // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015, с. 158–160.

25. *Сает Ю.Е., Ошищенко Т.А., Янин Е.П.* Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. – М.: ИМПРЭ, 1986. – 99 с.

26. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

27. *Скочинский А.А.* Рудничная атмосфера: Учение о составе и свойствах рудничного воздуха, процессах газовой выделения и газообразования в рудниках и о климатических условиях работы в подземных выработках. – М.: Изд. бюро МГИ, 1931. – 190 с.

28. *Скочинский А.А.* Рудничная атмосфера. – М.-Л.-Новосибирск: Гос. науч.-техн. горное изд-во, 1933. – 162 с.

29. *Соколов В.А.* Геохимия природных газов. – М.: Недра, 1971. – 336 с.

30. *Сывороткин В.А.* Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. – М.: ООО «Геонформцентр», 2002. – 250 с.

31. Фридман А.И. Природные газы рудных месторождений. – М., Недра, 1970. – 192 с.
32. Фридман А.И. Газовая съемка при поисках руд и геологическом картировании. – М.: ИМГРЭ, 1975. – 88 с.
33. Хитаров Н.П., Кравцов А.П., Войтов Г.П. и др. Газы свободных выделений Хибинского массива // Советская геология, 1979, № 2, с. 62–73.
34. Янин Е.П. Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. – М.: Геоинформмарк, 1993. – 50 с.
35. Янин Е.П. Техногенез, недропользование, экологическая геохимия: последствия, проблемы, приоритеты // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Сборник статей / 12-я Межрегиональная научно-практическая конференция, Уфа, 21–23 мая 2018 г. – СПб.: Свое издательство, 2018, с. 420–422.
36. Янин Е.П. Техногенные потоки рассеяния химических элементов в реках горно-рудных ландшафтов // Экологическая экспертиза, 2019, № 1, с. 69–101.
37. Polito P.A., Clarke J.D.A., Bone Y., Viellenave J. A CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-light hydrocarbon-soil-gas anomaly above the Junction orogenic gold deposit: a potential, alternative exploration technique // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2002, v. 2, № 4, p. 333–344.