

# Друг и враг человечества — сера

Доктор  
геолого-минералогических наук  
Л.Я.Кизильштейн

Выразительное словосочетание «качество жизни» прочно вошло в наш обиход. Оно включает в себя многие компоненты, но в первую очередь это питание, жилье, одежда, работа, а также экологические составляющие: воздух, которым мы дышим, и вода, которую мы пьем. Однако если первые четыре фактора в целом имеют положительную динамику — жизнь в среднем улучшается, то этого, к сожалению, нельзя сказать о воде и воздухе: здесь дела обстоят неважно и, несмотря на все усилия человечества, становятся только хуже.

Кто виноват? Виновников легион! Главные среди них — промышленность, транспорт и сельское хозяйство, которые, повышая качество нашей жизни в отношении первых четырех показателей, серьезно снижают его экологическую составляющую.

Что делать? Рецепт прост: нужно сократить поступление в окружающее пространство загрязнителей, а лучше вовсе избежать его. Одним словом, нужно стремиться к безотходному производству, а пока отходы есть, их необходимо очищать от вредных компонентов. Для воды такие технологии разработаны и активно внедряются: воду очищают коммунальные предприятия, существует множество индивидуальных бытовых устройств для очистки воды. Однако очищать воздух в необходимых объемах в обозримом будущем вряд ли будет возможно, и нам остается одно — как можно меньше его загрязнять.

В первую очередь следует обратить внимание на оксиды серы ( $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ), азота ( $\text{NO}_x$ ), углерода ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ ) и твердые частицы — это главные загрязнители как по объему выбросов, так и по токсичности, причем каждый из них заслуживает пристального внимания. Мы остановимся только на оксидах серы, но зато постараемся рассмотреть их все-сторонне.

## Сера полезная

В породах земной коры встречается сера вулканического и осадочного происхождения. И та и другая поступает к местам отложения в составе сероводорода, однако в первом случае газ имеет глубинное вулканическое происхождение, а во втором — биогенное (чаще всего микробиогенное). Остановимся более подробно на втором случае: ведь на примере

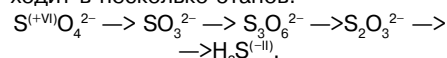
серы можно увидеть не только геохимическую предысторию одного из наиболее мощных загрязнителей воздуха, но и то, как тонкие биохимические процессы в мире бактерий могут привести к формированию крупных месторождений полезных ископаемых.

Люди всегда ценили роль сероводорода в образовании так называемых сульфидных рудных месторождений. Крупнейшие скопления свинца, цинка, меди, никеля, мышьяка, олова, сурьмы, ртути и других химических элементов представлены сульфидами, которые образуются при взаимодействии  $\text{H}_2\text{S}$  с соответствующими ионами. При этом в случае осадочных месторождений вопрос об источнике серы для образования сероводорода долгое время всерьез не исследовали: считалось, что она происходит из органического вещества, которое в осадочных породах присутствует почти всегда.

Однако при более внимательном рассмотрении стало ясно, что содержания серы в органике совершенно не достаточно для образования огромной массы сульфидных руд: в живых организмах ее немного — в лучшем случае доли процента в расчете на сухое вещество. Атомы серы есть только в двух из двадцати аминокислот — метионине и цистеине, да еще в ферредоксине, в некоторых витаминах — и это почти все.

Впрочем, для образования сероводорода существует неограниченный источник серы: это сульфаты, растворенные в воде океанов, поверхностных и подземных водах суши. Им находит применение в своем жизненном цикле уникальная группа микроорганизмов, называемых сульфатвосстанавливающими бактериями.

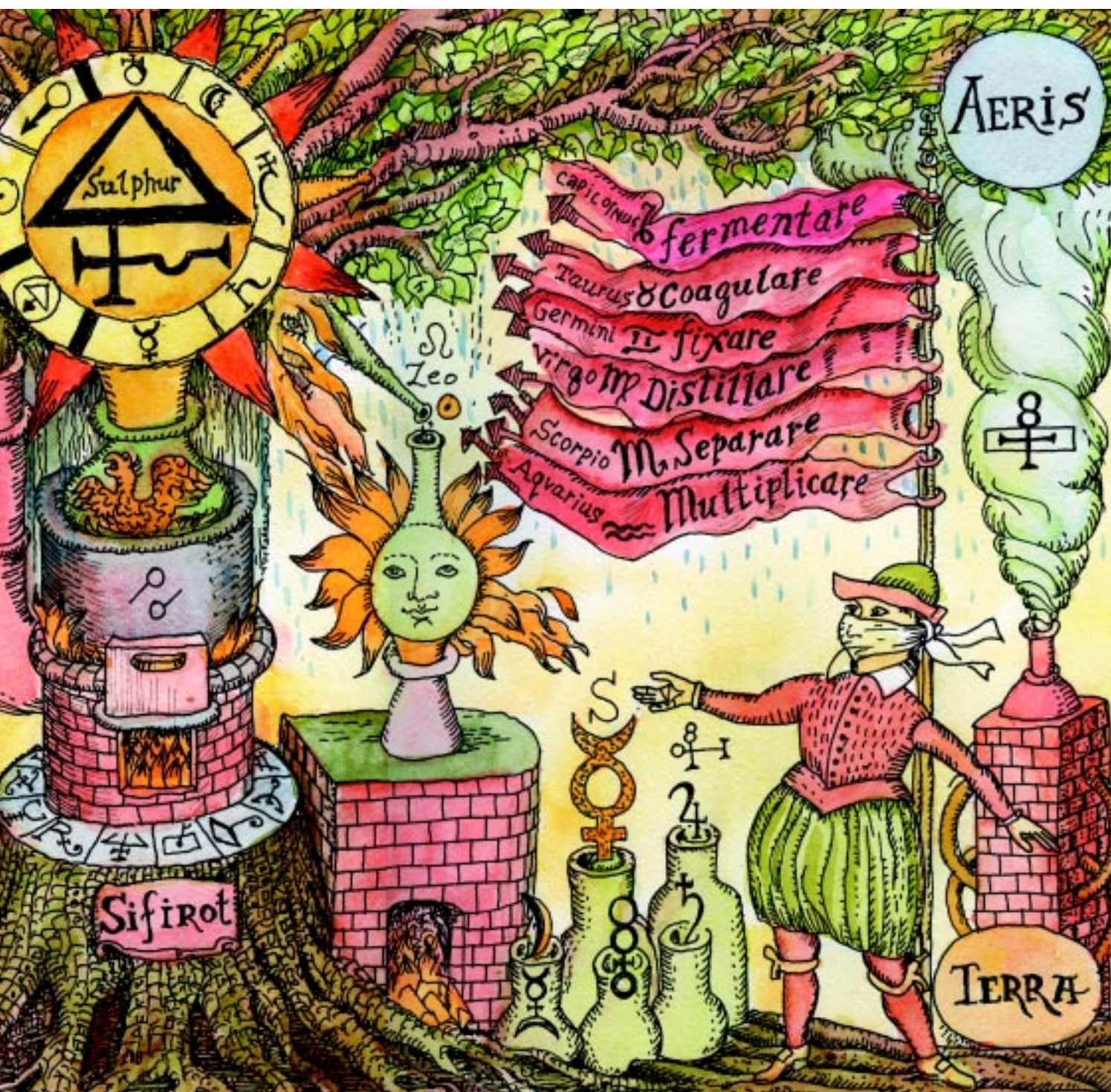
Эти микроорганизмы совершают настоящий энергетический подвиг — они используют предельно окисленную серу сульфатов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) в качестве конечного акцептора электронов при анаэробном окислении (усвоении) органического вещества. В результате положительно заряженная шестивалентная сера ( $\text{S}^{+VI}$ ) восстанавливается до отрицательно заряженной двухвалентной ( $\text{S}^{-II}$ ), что происходит в несколько этапов:



Физиологический смысл этого окислительно-восстановительного процесса (сульфатредукции) состоит в обеспече-



нии энергией жизненных процессов бактерий. Но сульфаты — весьма стабильные химические соединения, поэтому процесс восстановления сам требует немалых энергетических затрат. На восстановление серы уходит большая часть энергии органического вещества, которое усваивают бактерии. При невысоких температурах образования осадочных отложений (в среднем около  $20^\circ\text{C}$ ) этот энергоемкий процесс становится возможным только благодаря тому, что он идет с участием ферментного аппарата микроорганизмов.



## ВЕЩИ И ВЕЩЕСТВА

Неудивительно поэтому, что для питания сульфатвосстанавливающих бактерий пригодна далеко не всякая органика. Этим микроорганизмам подходят только простые легкоусвояемые соединения: ацетат, лактат, аминокислоты, карбоновые кислоты и некоторые другие. А вот сложные органические молекулы, такие, как углеводороды нефти, жирные кислоты, гуминовые вещества, должны предварительно расщепить и переработать в более простые вещества сапрофитные микроорганизмы. С геохимической точки зрения подобная прихот-

ливость производителей сероводорода означает, что масштабы сульфатредукции будут зависеть не только от наличия в среде органического вещества, но и от его состава.

Однако если все условия налицо, то масштабы генерации биогенного сероводорода могут быть просто огромными. Например, благодаря бактериальному сероводороду образовался черный ил Тамбуканского озера вблизи Пятигорска. Ил этот уже много десятилетий используют как лечебные грязи в санаториях кавказских Минеральных Вод и дру-

гих регионах страны. Однако самый впечатляющий пример — это, безусловно, многокилометровая зона сероводородного заражения водной толщи и донных отложений Черного моря (см. «Химию и жизнь» 2001, № 10).

Реакция между сероводородом и ионами металлов приводит к образованию сульфидов. Если, к примеру, в среде присутствуют ионы  $Fe^{2+}$ , то в результате взаимодействия образуется коллоидный моносulfид железа — гидротроилит ( $FeS \times nH_2O$ ). Далее он реагирует с элементарной серой и образует дисulfид желе-

за — мельниконит ( $\text{FeS}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ ), кристаллизация и дегидратация которого дает наиболее распространенный сульфидный минерал — пирит ( $\text{FeS}_2$ ). Если же в осадках присутствуют ионы других металлов, то образуются сульфидные соединения, соответствующие им. Именно в результате реакции биогенного сероводорода с ионами цветных и редких металлов в осадках древних водоемов концентрировались сульфидные минералы, благодаря которым появились впоследствии осадочные сульфидные месторождения, имеющие огромное промышленное значение.

## Сера и топливо

Лечебные грязи, руды, столь необходимые промышленности, — все это примеры использования серы и ее соединений на благо человека. Но в том-то и дело, что производные серы — вездесущи, и те же самые сульфиды, к числу которых относится и пирит, присутствуют порой там, где от них больше вреда, чем пользы.

Каменный и бурый уголь — особые полезные ископаемые, в первую очередь это топливо. Если в нем есть соединения серы, при сжигании они неизбежно загрязняют окружающую среду. А ведь многие угольные пласты буквально напигованы зернами сульфидных минералов. Содержание серы в углях разных месторождений колеблется от менее чем 0,1% до 10–15%. Если сравнить эти цифры со средними показателями содержания серы в породах земной коры (около 0,047%), то напрашивается вывод, что в угольных пластах сера может многократно концентрироваться.

Когда ее доля в угольном веществе превышает 3–4%, угли называют высокосернистыми. Сера в них почти всегда входит в состав пирита, которого иной раз бывает так много, что в прежние времена, как пишет академик А.Е.Ферсман, пирит специально извлекали из угля Подмосковного буроугольного бассейна и использовали как сырье для производства серной кислоты.

Это, однако, оказывалось рентабельным только потому, что пирит образовывал достаточно крупные конкреции, в то время как обычно он рассеян в угольном веществе в виде мелких вкраплений (миллиметры или доли миллиметра в диаметре). Присутствие таких вкраплений, как нетрудно догадаться, — это результат все того же бактериального восстановления сульфатов, происходившего во времена, когда уголь был еще торфом. Особенно много пирита там, где накопление торфа происходило в прибрежно-морской зоне, подобной современной болотам Флориды. Таковы, например, пласты Донецкого угольного бассейна.

Помимо серы, находящейся в составе сульфидов, в угле всегда присутствует

сера сульфатов (здесь ее обычно не более 1% от общего количества) и так называемая сера органическая. Эта последняя — сера, некогда входившая в состав органического вещества растений, из которых формировался торф, а также сера в составе сложных органических соединений, образовавшихся в результате взаимодействия  $\text{H}_2\text{S}$  с органикой. Доля органической серы тоже обычно невелика, но известны месторождения высокосернистых углей, где этот элемент представлен главным образом органической разновидностью (например, некоторые месторождения Иркутского угольного бассейна).

Но вот где органическая сера преобладает абсолютно — так это в нефти, которая, как известно, образовалась из водорослей, а в них серы, как правило, больше, чем в высших растениях. Впрочем, если серой водорослей дело и ограничивается, то в нефти ее оказывается около 1%. Однако не столь уж редко встречаются месторождения с содержанием серы, превышающим 2–3%. Появляются они, по-видимому, тогда, когда в недрах Земли нефть контактирует все с тем же биогенным сероводородом. Деятельности микроорганизмов обязана своей высокой сернистостью нефть некоторых месторождений Приуралья.

После переработки нефти содержащаяся в ней сера переходит в бензин и мазут, и при использовании топлива сернистые продукты поступают в окружающую среду. Учитывая колоссальные объемы потребления бензина, проблема становится настолько острой (см. «Химию и жизнь», 2004, №3), что в странах ЕС решено было ввести с 1 января 2005 года новый стандарт «Евро-4», которому должны соответствовать моторное топливо и двигатели новых автомашин. Согласно этому стандарту содержание серы в моторном топливе сократится втрое и не будет превышать 50 молекул серосодержащих соединений на миллион молекул других веществ (50 ppm).

Большие проблемы создает сера, а точнее, сероводород в составе природного газа некоторых месторождений (например, Прикаспийской низменности). В смеси с сероводородом метан в качестве топлива использовать нельзя: сероводород представляет серьезную опасность даже при незначительной утечке газа, а при его сжигании образуются вредные оксиды серы. Кроме того, этот компонент разрушает буровое оборудование и газопроводы. Поэтому природный газ обязательно очищают от сероводорода, которому, к счастью, тоже есть применение: его используют как сырье для получения элементарной серы — ценного и остродефицитного минерального сырья.

Здесь технологический процесс фактически ускоряет то, чего пока не успела сделать природа. Ведь в естественных условиях избыток сероводорода, кото-

рый не вступил в реакцию с органикой или металлами, в конечном счете окисляется, давая в остатке элементарную серу. Она отлагается в полостях горных пород (трещинах, порах, кавернах), по которым мигрирует  $\text{H}_2\text{S}$ . Так образуются месторождения самородной серы.

В настоящее время серу применяют главным образом при производстве серной кислоты, сульфитов для бумажной промышленности, вулканизации резины, средств защиты растений, при синтезе красителей и изготовлении спичек, но известен этот минерал с незапамятных времен.

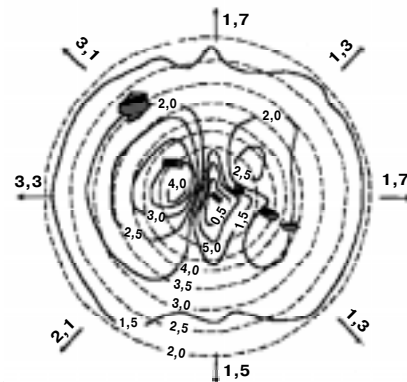
## Сера и горение

В религиозных повествованиях о муках ада сере отводят, как известно, не последнюю роль. Что и говорить, запах у горячей серы и в самом деле неприятный, а продукты сгорания — ядовиты.

Вопрос о преобразовании соединений серы при высоких температурах мы рассмотрим на примере угля, который по-прежнему остается главным загрязнителем воздуха серосодержащими веществами.

При сжигании угля температура в топках современных тепловых электростанций достигает 1500–1800°C. Этого более чем достаточно для полной диссоциации молекул сульфида железа и образования диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), который в составе дымовых газов поступает в атмосферу. Так происходит с большей частью сульфидных зерен, но не со всеми.

Дело в том, что перед сжиганием уголь измельчают в пыль, которую затем через специальные горелки вдувают в камеру котла. При такой технологии частицы угля с содержащимися в них зёрнами сульфидов пребывают в топочной камере ТЭС всего лишь секунды или даже доли секунды. За столь короткое время диссоциировать успевают не все сульфидные зёрна, и потому они зачастую оказываются в составе так называемого «недожога топлива», который улав-



1  
*Деформация поля концентраций  $\text{SO}_2$  под воздействием господствующих ветров (прямоугольниками обозначены населенные пункты в районе ТЭС, цифрами — скорость ветра, м/с)*

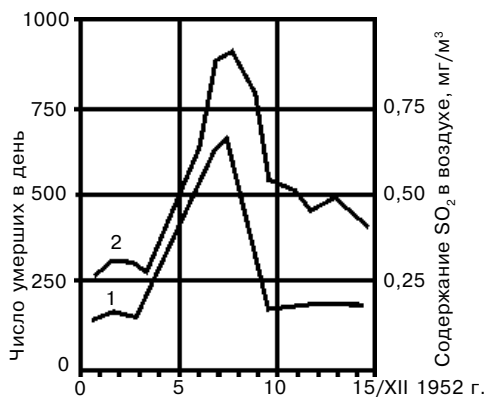
ливают при помощи устройств очистки дымовых газов.

Выброс сернистых соединений в газообразной форме при этом оказывается несколько ниже расчетного, но зато возрастает содержание серы в зольных отходах, что создает проблемы при их использовании в различных технологических цепочках вторичной переработки. Гораздо удобнее, когда образовавшийся при разложении сульфидов  $\text{SO}_2$  реагирует со щелочными и щелочноземельными элементами, образуя сульфаты, например гипс ( $\text{CaSO}_4$ ). Эти соединения тоже улавливаются системами очистки дымовых газов, и к тому же гипс можно выделить из золы и использовать совершенно так же, как природный минерал.

Связывание серы в сульфатах становится возможным благодаря образованию  $\text{CaO}$  при высокотемпературном распаде карбонатов кальция и железа, постоянно присутствующих в углях в виде минералов кальцита и сидерита. Однако по иронии судьбы, там, где карбонатов



2  
Декабрь 1952 года. Центр Лондона в густом смоге



3  
Концентрация  $\text{SO}_2$  в атмосфере (1) и смертность населения (2) во время смога (Лондон, декабрь 1952 г.)

много, угли содержат мало серы (например, угли крупнейшего бассейна Сибири — Канско-Ачинского), и наоборот: там где много пирита, карбонатов для связывания всей серы явно недостаточно (Донецкий бассейн).

И наконец еще одна составляющая выбросов — твердые частицы золы. В энергетике они получили выразительное название «проскок». Тонкими аналитическими методами на поверхности этих частиц была обнаружена пленка сульфатной серы толщиной в десятые доли микрона. Похоже, что при снижении температуры газообразные соединения серы конденсируются на поверхности частиц золы.

Это обстоятельство очень существенно, поскольку именно своей поверхностью, обогащенной соединениями серы, частицы контактируют с тканями легких, куда они попадают при дыхании. Последствия оценить нетрудно.

## Сера в атмосфере

Итак, в результате сгорания топлива сера попадает в атмосферу и начинает свой разрушительный путь в природной среде. Показательны оценки удельных выбросов  $\text{SO}_2$ , отнесенные к единице произведенной энергии при сжигании угля из залежей разных регионов нашей страны (г/кВт·ч): бурый подмосковный уголь — 53,9, каменный донецкий — 21,6, каменный кузнецкий — 3,5, бурый канско-ачинский — 2,6.

При этом общее количество  $\text{SO}_2$ , образовавшегося при сжигании органического топлива, в Российской Федерации составило в 2000 году по приблизительным оценкам 6,7–7,2 млн. тонн; в мире — порядка 18 млн. тонн (оценки колеблются от 14 до 47 млн. тонн).

Свой вклад в загрязнение воздуха вносит не только сжигание угля, но и его коксование для использования в черной металлургии. В этом процессе на тонну переработанного сырья выделяется приблизительно 2,5 кг  $\text{SO}_2$ . Если учесть мировое производство кокса (примерно 450 млн. тонн в год), то легко подсчитать, что суммарный выброс оксида серы при коксовании составляет около 1,1 млн. тонн. И хотя это значительно меньше, чем выбросы при использовании угля в качестве топлива, пренебрегать этим ис-

точником загрязнения тоже нельзя. Проблема выбросов сернистых соединений сохраняется и при других технологиях переработки угля, например при производстве моторного топлива, синтетического горючего газа, термоантрацита, графита, адсорбентов и так далее.

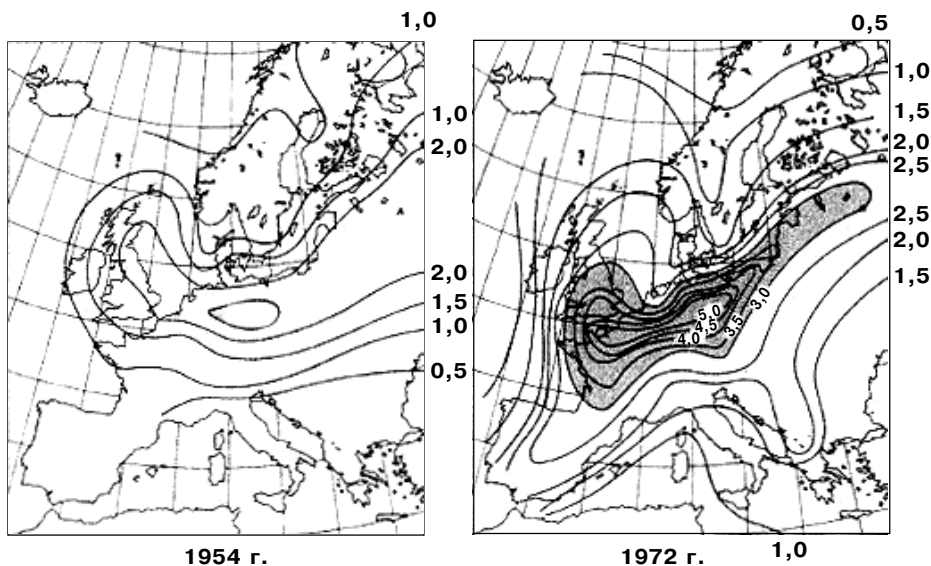
В результате в промышленных районах содержание серы в атмосферных осадках достигает  $20 \pm 10 \text{ мкг/м}^3$ , причем вблизи угольных ТЭС ее может оказаться даже несколько миллиграммов в кубометре, в то время как над океаном, где антропогенное поступление серы в атмосферу почти не сказывается, ее всего  $0,2 \pm 0,1 \text{ мкг/м}^3$ .

Дожди, выпадающие над промышленными районами, вполне заслужили право называться кислотными. Ведь двуокись серы  $\text{SO}_2$ , которую несут в атмосферу промышленные выбросы (в том числе и на поверхности твердых частиц), окисляется за несколько суток до  $\text{SO}_4^{2-}$ , а оксиды серы, взаимодействуя с водяными парами, образуют сильные кислоты —  $\text{H}_2\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . В результате в Западной Европе средний уровень pH осадков достигает 4,0–4,5, а в некоторых промышленных районах мира (например, в Западной Вирджинии, США) бывали случаи, когда с неба лилась настоящая концентрированная кислота с pH 1,5. (Для сравнения: pH чистой дождевой воды — 5,6, а для снежного покрова Антарктиды он и того выше — 6,3.)

При характеристике ТЭС как источника загрязнения специалисты обращают внимание в первую очередь на следующие факторы. Во-первых, это масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу за единицу времени, а она зависит, в свою очередь, от количества сжигаемого топлива и содержания в нем серы. Во-вторых — высота выброса (в случае ТЭС она определяется высотой дымовой трубы): чем выше труба, тем меньше концентрация загрязнителя вблизи поверхности земли, то есть «на уровне дыхания». Кроме того, объем газов, выбрасываемых в единицу времени, зависит от технологии сжигания топлива. Разница между температурой выбрасываемых газов и температурой воздуха в текущий момент времени заметно влияет на характеристики загрязнения атмосферы.

Если бы формирование поля  $\text{SO}_2$  в атмосфере определялось только перечис-





4  
*Среднегодовая концентрация сульфатов в атмосферных осадках Европы (мг серы/л)*

ленными факторами, то изолинии с равной концентрацией загрязнителя представляли бы собой концентрические окружности с центром в районе трубы ТЭС. Однако ветер, а также градиенты температуры и другие метеорологические факторы деформируют поле концентраций загрязнителя (рис. 1), и высокие концентрации оксида серы создаются порой даже в точках, достаточно удаленных от источника выбросов.

## Сера в организме

Ясно, что ничего хорошего от высокого содержания оксидов серы в атмосфере человеку ожидать не приходится — ведь по токсическому действию они занимают одно из первых мест среди загрязнителей воздуха.

Токсичность — показатель реакции организма на действие вещества. Определяется она характером биохимического взаимодействия, а также скоростью поступления вещества в кровь, активностью его метаболических превращений, биохимическими последствиями взаимодействия с клетками и тканями. Кроме того, при оценке токсичности любого вещества необходимо учитывать период его полувыведения — время, за которое содержание элемента после его однократного поступления уменьшается вдвое. Для серы, проникшей в легкие, этот период составляет 94 дня, что совсем немало. Если же вещество поступает в организм постоянно, то через какое-то время устанавливается равновесие. Его описывает так называемая кратность накопления — отношение накопленного количества элемента к величине его ежедневного поступления. Кратность накопления серы в желудочно-кишечном тракте составляет 0,8, в легких — 0,75.

Понятно, что вблизи промышленных предприятий или в районах с неблагоп-

риятным направлением господствующих ветров накопление серы в организме может быстро достичь опасного уровня, а потому, учтя все перечисленные выше показатели токсичности, для каждого вредного вещества вводят норму ПДК — его предельно допустимую концентрацию в воде или воздухе. Предельно допустимая среднесуточная концентрация (ПДКСС)  $\text{SO}_2$  в атмосфере составляет  $0,05 \text{ мг/м}^3$ , и, если этот норматив по каким-то причинам превышает, последствия могут быть самыми печальными.

Примером могут служить трагические события декабря 1952 года в Лондоне, когда плотный смог (рис.2), образовавшийся из-за высокого атмосферного давления и полного отсутствия ветра, держался над столицей Англии почти четыре дня. Данные о составе городского воздуха и смертности лондонцев в этот период, приведенные на диаграмме (рис.3), свидетельствуют об отчетливой корреляции между концентрацией  $\text{SO}_2$  и количеством умерших за эти несколько дней. По оценкам медиков, смог погубил более 4 тыс. человек.

Между тем с конца 1950-х годов до середины 1970-х концентрация сульфатов в воздухе промышленных районов Западной Европы увеличилась не менее чем в два раза (рис. 4). К счастью, эту динамику уже нельзя экстраполировать на современность, поскольку рост энергопотребления в Европе сопровождается довольно эффективными мероприятиями по снижению выбросов серы угольными ТЭС и другими промышленными предприятиями.

## Возвращение на землю

Непосредственным воздействием оксидов серы на организм их разрушительное действие не заканчивается: эти вещества способны понизить качество на-

шей жизни многими способами. Например, вернувшись на землю в составе кислотных дождей, они закисляют почвы, грунтовые и поверхностные воды. В результате падает урожайность сельскохозяйственных культур, ухудшается состояние лесов и пастбищ, снижается продуктивность водоемов. И это только легкий набросок неблагоприятных экологических последствий.

Тем не менее без угля как источника энергии ни сейчас, ни в обозримой перспективе обойтись не удастся — ведь из всех полезных ископаемых, используемых в энергетике (уголь, торф, нефть, газ, горючие сланцы), лишь запасы угля велики настолько, что могут реально обеспечить развитие отрасли в обозримом будущем. В настоящее время 44% электроэнергии в мире производится за счет сжигания угля. Уголь остается энергетическим и технологическим сырьем, цены на которое более стабильны по сравнению с ценами на нефть и газ — эти последние слишком сильно зависят от политической ситуации.

По авторитетным оценкам, 75% добываемого угля используется в качестве топлива, а добывают его в мире более 4 млрд. т в год. На протяжении многих десятилетий Советский Союз был лидером мировой добычи угля, однако сейчас эта престижная позиция России и другими странами СНГ утрачена. На первое место выдвинулся Китай (1,3 млрд. тонн в год), на втором месте США (1,1 млрд. тонн). Стремление развивать угледобывающую отрасль вполне понятно: ведь стоимость строительства угольных ТЭС значительно ниже, чем атомных электростанций равной мощности.

А раз отрасль развивается, то приходится не забывать о том, что энергетика на базе угля создает ряд серьезных экологических проблем, связанных не только с увеличением массы сжигаемого топлива, но и с общей тенденцией ухудшения его качества, в том числе и сернистости. Ведь повсюду в первую очередь разрабатывали наиболее качественные — низкосольные и низкосернистые — угольные пласты, а теперь приходится добывать то, что осталось. Из этого неизбежно следует, что рост потребления энергии должен сопровождаться разработкой и внедрением новых технологий защиты окружающей среды от вредного воздействия угольной энергетики.

## Как не оказаться в аду

Снизить выброс соединений серы в атмосферу можно двумя путями: во-первых, снижая тем или иным способом содержание серы в сжигаемом угле, а во-вторых, извлекая сернистые соединения из дыма ТЭС.

Первый путь представлен разнообразными технологиями. Чаще всего используют гравитационное обогащение, при

котором минеральные частицы отделяются от органического угольного вещества благодаря большой разнице между плотностью минеральных (2,3–5,0 г/см<sup>3</sup>) и органических (1,5–1,8 г/см<sup>3</sup>) составляющих. Если учесть, что плотность основного носителя серы — пирита — составляет 5,0 г/см<sup>3</sup>, мы вправе ожидать заметного снижения содержания серы.

Однако для того, чтобы успешно выделять пирит из угольной массы, ее надо измельчить до частиц, сопоставимых по размерам с зернами минерала (напомним: это доли миллиметра), что, конечно же, абсурдно. Поэтому реальные результаты весьма скромны: сернистость при гравитационном обогащении снижается не более чем на 10–15%, хотя другие виды минеральных включений извлекаются таким способом куда лучше: в отличие от пирита они часто образуют крупные скопления, легко отделяющиеся от органических составляющих. Зольность топлива при этом существенно снижается, а вот большая часть пирита остается в угольном веществе, не говоря уж об органической сере, которая химически связана с органическими компонентами угля.

Много усилий затрачено на разработку химических методов извлечения серы: для этого ее пытаются растворять различными реагентами при повышенных температурах и давлениях. Однако такие подходы требуют больших объемов растворителя, энергетических затрат, да и экологически далеко не безупречны, поэтому стоимость растворения сернистых продуктов в углях пытаются снизить, комбинируя химические технологии с бактериологическими методами окисления пирита. На опытных установках содержание пиритной серы удается уменьшить таким способом на 95%.

Аналогичные результаты можно получить при микроволновом облучении угля, которое приводит к избирательному нагреву сульфидных частиц и их окислению, облегчая взаимодействие серы с растворителями. Однако радоваться пока рано: ведь одно дело — экспериментальная установка, и совсем другое — ежегодная переработка десятков миллионов тонн топлива. Масштабы технологических и экологических проблем, которые могут возникнуть при массовом внедрении методов химического извлечения серы из угля, еще только предстоит оценить, однако сомнения в том, что будущее — за технологиями такого рода, весьма и весьма обоснованны.

К счастью, извлечение серосодержащих веществ из продуктов сгорания угля может быть не менее эффективным методом борьбы с загрязнением воздуха. Одна из таких технологий уже освоена энергетикой — это сжигание угля в так называемом кипящем (псевдооживленном) слое. Суть подхода состоит в том, что топливо под давлени-

ем воздуха как бы всплывает над решеткой топки и сгорает, находясь во взвешенном состоянии.

Температура сжигания в котлах с кипящим слоем составляет 800–1000°C, то есть заметно ниже, чем при сжигании топлива традиционным пылеугольным способом. Это важное достоинство, так как при пониженных температурах уменьшается образование токсичных оксидов NO<sub>x</sub>, возникающих за счет окисления атмосферного азота. К тому же в котлах кипящего слоя горение происходит в сравнительно узкой зоне, благодаря чему в зону горения можно вводить пылевидные карбонаты — известняк, мел или доломит. А в результате, как мы уже знаем, вместо вредных газов SO<sub>2</sub> и SO<sub>3</sub> образуется гипс, который удаляют вместе с золой. Благодаря пылевидным карбонатам концентрацию оксидов серы в выбросе удается снизить на 97–98%, и потому данная система сжигания получила распространение в промышленной энергетике Запада. А недавно и в нашей стране разработан проект мощной теплоэлектростанции с котлами кипящего слоя на базе донецкого антрацитового угля.

Существуют также технологические схемы очистки и утилизации сероводорода из газов, образующихся при коксовании. Коксовый газ часто используют как техническое и бытовое топливо, а между тем исходно он содержит много сероводорода — от 6 до 40 г/м<sup>3</sup>. Норма содержания H<sub>2</sub>S для бытового газа — 0,02 г/м<sup>3</sup>, поэтому коксовый газ тщательно очищают от вредных примесей — и не без экономической выгоды. Здесь нашли промышленное применение методы адсорбции и окисления сероводорода до элементной серы.

За рубежом разработаны технологии одновременной очистки дымовых газов от оксидов серы и азота при помощи ультрафиолета, в результате чего газообразный диоксид серы превращается в твердый сульфат, а оксид азота — в нитрат аммония. С той же целью предложено использовать и другие сильные окислители — частицы высоких энергий или озон.

Экологическую ситуацию в районах угольных ТЭС можно несколько улучшить, увеличивая высоту дымовых труб. В результате загрязнитель будет рассеивать-

ся на большей высоте, и его концентрация в приземном слое воздуха снизится. Понятно, конечно, что это всего лишь перераспределение загрязнителя, но и такая мера может принести пользу тем, кто живет рядом с ТЭС. А вот сокращение числа труб может принести не только относительную, но и абсолютную пользу. Например, замена четырех труб на одну большего диаметра уменьшает выброс примерно на 40%. Этого же можно достичь, снижая скорость выхода газов или их температуру, но и то и другое сопряжено со значительными техническими трудностями.

## Заключение

Подведем некоторые итоги. Тепловую энергию, как мы знаем, использовали еще древние люди, сжигая траву и древесину. С ростом народонаселения и развитием металлургии стало ясно, что если не остановиться, то деревьев надолго не хватит. Настала очередь ископаемой биомассы: сначала угля, а позже — нефти и горючего газа.

Нефть используют преимущественно в двигателях внутреннего сгорания, а природный газ — удобный и сравнительно чистый источник тепловой энергии: на нем работают и крупные ТЭС, и мелкие котельные. Но хотя запасы газа велики, при растущих масштабах его потребления они могут быть исчерпаны за десятки лет, и тогда нам останется только уголь, которого хватит на столетия. Правда, существует еще атомная энергия, но энтузиазма по поводу АЭС в последнее время, как известно, сильно поубавилось.

Конечно, новые источники энергии обязательно появятся, и уже в обозримом будущем, но вряд ли на них можно будет возложить базовую нагрузку достаточно скоро. А раз так, то реальным источником тепловой энергии на долгую перспективу остается только ископаемый уголь, и думать о том, как снизить вредное влияние угольной энергетики на природную среду по-прежнему необходимо.

